



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CICLO XIV

COORDINATORE PROF. STEFANO TRILLO

**Accesso e Instradamento
in Reti Radio Cognitive**

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE ING-INF/03

Relatore
Prof. Gianluca Mazzini

Candidato
Alice Masini

Corelatore
Ing. Guido Riva

Anni 2009/2011

Dedica

Alla mia famiglia, nel senso più lato che si possa pensare.

Ringraziamenti

I ringraziamenti sono sempre la parte migliore, perchè ti riportano alla mente episodi più o meno divertenti, più o meno impegnativi che fanno spuntare un sorriso che altrimenti forse non avresti fatto.

Sicuramente devo ringraziare quella che è la mia famiglia “naturale“, per TUTTO, per esserci. Non tutti hanno la fortuna che ho avuto io di avere una famiglia unita e pazza come la mia.

Un grazie infinito, Francesco, che sei comparso improvvisamente nella mia vita rendendo ciò che è stato orribile, superabile e ciò che è stato bello, meraviglioso.

Un grazie speciale a Luna, bellissima eredità di questi 3 lunghi anni, e a Franco. Vi porterò sempre con me.

Grazie alla Lù, che ora è lontana, ma che spero torni presto perchè mi manca molto.

Grazie alla Vale, con la quale ho davvero condiviso gioie e dolori di questa esperienza; senza di lei non sarebbe stata la stessa cosa. Mi manchi amica mia!

Un grazie ai miei compagni di avventura, Alessandro, Enrico, lo “Switch-Off Team”, Gabriele che mi hanno regalato grandi risate tra le mura della Villa. E non solo.

Grazie ad Elisa..le 3 edizioni del SoftCOM hanno indelebilmente marcato le nostre esistenze. Carissima, non sarà più la stessa cosa, nè per noi, nè per loro!

Grazie a Fides. Che gran donna!

Grazie a Gianluca, l'unica persona che conosco che ha il dono dell'ubiquità. E non sto scherzando.

Grazie a tutti i ragazzi, più e meno giovani, della Fondazione Ugo Bordoni, Guido, Andrea, Dorian, Claudia, Marina, Maria.....Mi hanno insegnato una consapevolezza che non avevo.

Grazie ai ragazzi del CSP di Torino, in particolare Andrea e Matteo, con i quali ho condiviso una bellissima esperienza e che in poche settimane sono riusciti a trasmettermi tantissimo.

Grazie infine a me stessa, perchè è servita tutta la mia tenacia e la buona volontà per arrivare in fondo, nonostante tutto. E mi ringrazio per avercela fatta.

Indice

Premessa	5
1 Cognitive radio	9
1.1 Il paradigma Cognitive Radio	9
1.2 Paradigma ibrido <i>Underlay-Interwave</i>	11
1.2.1 Algoritmi di Sensing	12
1.2.2 Il problema dell' <i>Hidden Node</i>	14
1.2.3 Sensing Cooperativo	15
1.2.4 Algoritmi di previsione dell'interferenza	18
1.2.5 Geolocation Database	20
2 Cognitive Radio e Digital Video Broadcasting	23
2.1 Il problema del <i>Digital Divide</i>	23
2.2 IEEE 802.22: Cognitive Radio Wireless Regional Area Network: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands	24
3 Analisi dell'interferenza prodotta da una rete secondaria verso un sistema primario di tipo televisivo	31
3.1 Modello analitico di valutazione dell'interferenza prodotta da una trasmissione secondaria	31
3.1.1 Scenario con cella isolata e un solo nodo secondario .	32
3.1.2 Scenario a cella isolata e con una rete di nodi secondari	36
3.2 Modello simulativo di instradamento in una rete secondaria con canale soggetto a shadowing log-normale	43
4 White-Fi: l'uso delle frequenze UHF per comunicazioni bidirezionali in ambiente alpino	53
4.1 Premessa	53
4.2 Test in laboratorio	54
4.3 La campagna di misure	54
5 Conclusioni	63

A Stima della distanza in reti wireless con canale affetto da fading alla Rayleigh	65
B Processi di Poisson e loro proprietà	71

Premessa

Negli ultimi anni la richiesta e, conseguentemente, l'offerta di tecnologie e servizi wireless è cresciuta in modo vertiginoso. Sono sempre di più le applicazioni che necessitano di elevate velocità e, conseguentemente di porzioni di spettro sempre maggiori. La risorsa radio, che sembrava abbondante fino a pochi anni fa, sta perciò diventando sempre più rara e preziosa. Nonostante l'enorme passo avanti fatto nello sviluppo delle tecniche di livello fisico per migliorare l'efficienza spettrale, raggiungendo il limite di Shannon in termini di capacità, rimane comunque il problema dell'assegnazione non flessibile delle frequenze. Gli organismi regolatori, quali la Federal Communication Commission (FCC) americana e l'europeo European Telecommunications Standards Institute (ETSI), hanno sempre allocato lo spettro radio in blocchi di frequenze dedicate ad uno specifico servizio [1, 2]; a tali frequenze veniva associata una licenza, che era poi assegnata ad uno o più operatori in grado di fornire il servizio per il quale tale licenza era stata creata. Questo metodo di allocazione garantiva il completo controllo dello spettro assegnato, consentendo una gestione unilaterale dell'interferenza e, di conseguenza, della qualità del servizio (QoS). FCC stessa ha però misurato un'efficienza nell'uso di tali frequenze che varia dal 15% all'85% in relazione alla posizione e all'istante temporale della rilevazione. Questa valutazione mette quindi in evidenza come lo spettro sia in buona misura sprecato e male utilizzato. Successivamente, alcune porzioni dello spettro sono state dedicate all'uso non licenziato ma soggetto a specifiche regole che limitano la potenza di trasmissione in tali bande e obbligano l'uso di strategie di accesso condiviso al mezzo. La possibilità di disporre di frequenze 'gratuite' ha favorito lo sviluppo di nuove tecnologie wireless, come Bluetooth, WiFi, HyperLAN, che hanno avuto una diffusione enorme, entrando a far parte della quotidianità non solo di grandi aziende e pubbliche amministrazioni, ma anche (e soprattutto) dei singoli privati in tutto il mondo. Questo notevole successo è diventato però l'elemento maggiormente limitante di queste tecnologie; il mezzo radio è condiviso e l'accesso a contesa è fortemente limitato dalle interferenze. Quanti più sistemi operano sulla stessa porzione di frequenze, tanto più sarà elevata l'interferenza generata e percepita. Servono perciò nuove strategie di gestione delle frequenze, che consentano la *coesistenza* tra diversi sistemi, in modo tale da migliorare l'efficienza nell'uso dello spet-

tro e consentire una diffusione ancor più crescente delle tecnologie wireless. Tra queste, sicuramente le Cognitive Radio rappresentano per i ricercatori la nuova frontiera dell'uso intelligente della risorsa radio. Tale paradigma consente l'uso di frequenze, normalmente licenziate, per realizzare servizi diversi da quelli per i quali tali frequenze erano state assegnate. Lo sviluppo di reti di questo tipo potrebbe consentire il superamento del Digital Divide in quelle zone rurali e montuose dove non possono essere impiegate, per motivi tecnici ed economici, le normali tecnologie in fibra ottica e ADSL. Tali zone sono coperte invece dal segnale televisivo in banda UHF; tali risorse, ampiamente sottoutilizzate specialmente in queste zone, potrebbero consentire anche a queste aree remote di entrare nell'era digitale. L'importanza dello studio e dello sviluppo di questa tecnologia ha trovato riscontro nella definizione di uno standard, IEEE 802.22, che definisce proprio le caratteristiche di strato PHY e MAC che un dispositivo cognitivo, operante in banda UHF, deve avere. Il vincolo operativo principale posto a tali sistemi è, però, quello di non deteriorare la qualità del servizio degli utenti primari licenziati. Tale richiesta fa direttamente riferimento alla capacità dei nodi cognitivi di stabilire se, dove e quando una risorsa spettrale può essere utilizzata e sotto quali vincoli. Queste questioni si interfacciano con la necessità individuare tecniche e modelli che consentano al nodo cognitivo di individuare risorse utilizzabili e di prevedere l'interferenza che potrebbero generare utilizzando tali risorse. Nonostante le diverse tecniche ormai largamente diffuse in letteratura, tuttavia rimane ancora oggi irrisolto il problema della previsione dell'interferenza tra utenti primari e secondari, oltre che della definizione della funzione di sensing. Gli approcci ad oggi studiati sono molto diversi e sono stati riepilogati nel primo capitolo di questo lavoro. Tuttavia essi presentano, ciascuno, vantaggi e svantaggi; per questo motivo si è deciso, con questo lavoro, di procedere verso una strada differente, che tenesse conto sia delle capacità di sensing di un nodo cognitivo, sia della capacità di previsione che questo può avere sulla base della conoscenza delle caratteristiche dello scenario a cui appartiene. In questo elaborato verrà perciò delineato un lavoro di ricerca che ha permesso di ottenere un modello teorico semplice per la caratterizzazione dell'interferenza di una trasmissione secondaria nei confronti di un sistema primario televisivo. Nel primo capitolo verranno riassunte le principali caratteristiche di un sistema cognitivo, dalle tecniche di sensing, alle architetture, dai modelli di previsione di interferenza tra sistema primario e secondario, agli algoritmi cooperativi; nel secondo capitolo sarà descritto lo standard IEEE 802.22, mentre nel terzo capitolo sarà illustrato il modello teorico/simulativo di previsione di interferenza sopra citato e i suoi possibili impieghi non solo nelle metodologie di accesso alla rete, ma anche nelle strategie di instradamento. Infine nell'ultima parte di questo lavoro verrà descritta la sperimentazione, condotta in collaborazione con il CSP di Torino e riconosciuta dal Ministero dello Sviluppo Economico italiano, dedicata all'applicazione di sistemi WiFi, operanti in banda UHF,

utilizzati per portare la banda larga ad una valle alpina della provincia di Torino.

Capitolo 1

Cognitive radio

1.1 Il paradigma Cognitive Radio

Il termine Cognitive Radio è stato usato per la prima volta da Joseph Mitola III in occasione di un seminario tenutosi presso il Royal Institute of Technology nel 1998 [3]:

“The point in which wireless personal digital assistants (PDAs) and the related networks are sufficiently computationally intelligent about radio resources and related computer-to-computer communications to detect user communications needs as a function of use context, and to provide radio resources and wireless services most appropriate to those needs.”

Si tratta perciò di dispositivi che sono consapevoli dello scenario in cui sono immersi e in base alla loro conoscenza in merito alle risorse a disposizione, alle esigenze dell’utente e alle reti con le quali coesistono, realizzano il servizio richiesto utilizzando la risorsa radio nel modo più efficiente possibile. Accanto al concetto di *Cognitive Radio* si pone perciò quello di *Software Define Radio*, ossia di una interfaccia radio riconfigurabile via software in termini di frequenza utilizzata, banda occupata, potenza trasmessa e modulazione utilizzata. Inoltre, gli algoritmi di allocazione delle risorse non dipendono più soltanto dalle condizioni del canale (*channel-aware algorithms*), ma anche dai servizi da realizzare (*service-aware algorithms*) e dai parametri di rete (*network-aware algorithms*).

Ci si riferisce perciò a sistemi radio che hanno la capacità di valutare l’ambiente radio che li circonda e modificare i propri algoritmi di gestione dello spettro sulla base di *network side information* [4], ovvero informazioni in merito a:

- attività degli altri nodi presenti nel medesimo scenario
- condizioni del canale

- codifica
- tipo di messaggi utilizzati dagli altri dispositivi con cui condivide lo spettro

In base a quale di queste informazioni è a disposizione del nodo, le radio cognitive si distinguono in tre paradigmi fondamentali:

- ***Underlay Paradigm***: si assume che ogni nodo cognitivo debba conoscere l'interferenza che genera ai ricevitori di tutti i nodi non-cognitivi. In questo caso si parla perciò di *secondary user*, ossia *nodi secondari* che non possono interferire significativamente le trasmissioni dei *primary user*, ovvero *nodi primari*, generalmente licenziati. Di questo paradigma si parlerà in modo più dettagliato nei paragrafi seguenti.
- ***Overaly Paradigm***: si assume che ogni nodo cognitivo conosca i messaggi e la codifica utilizzati dai nodi non cognitivi. Ciò avviene quando, ad esempio, i nodi non cognitivi trasmettono messaggi broadcast che contengono le codifiche utilizzate. Questa conoscenza aggiuntiva rispetto al caso precedente ha una duplice funzione:
 - mitigare, o addirittura eliminare, ogni tipo di interferenza percepita dal nodo cognitivo
 - permettere al nodo cognitivo di fungere da nodo *relay* per i nodi non cognitivi, consentendo loro di incrementare il proprio rapporto segnale-rumore (SNR) quel tanto che basta a bilanciare il peggioramento di tale rapporto per effetto dell'interferenza generata dalla rete cognitiva.
- ***Interwave Paradigm***: è basato sull'idea di una *comunicazione opportunistica* e sta alla base della nascita della radio cognitiva. I nodi cognitivi afferenti a questo paradigma utilizzano quelle porzioni di spettro, nella maggior parte dei casi soggette a licenza, che sono inutilizzate e che prendono il nome di *spectrum holes*. Questi "vuoti" cambiano continuamente a seconda della collocazione temporale e spaziale della trasmissione e possono essere utilizzati dai nodi cognitivi per le loro comunicazioni. Questo paradigma richiede una conoscenza forte dell'attività e del tipo di traffico dei nodi non cognitivi, oltre che la capacità di monitorare con continuità l'ambiente radio circostante.

A partire da questi tre paradigmi generali è possibile ottenere approcci ibridi che si avvantaggiano di diverse tecniche; di particolare interesse nel caso di studio in questione, sono i paradigmi *Underlay* e *Interwave* e le loro combinazioni. I paragrafi a seguire sono dedicati alla descrizione delle principali funzioni e caratteristiche di tali approcci.

1.2 Paradigma ibrido *Underlay-Interwave*

Secondo questo approccio i *nodii secondari* possono iniziare una trasmissione **se e solo se** l'interferenza che tale trasmissione genera sui ricevitori primari si mantiene al di sotto di una certa soglia. Spesso accade che, associate a porzioni di frequenza poco utilizzate che consentirebbero il paradigma *Underlay*, si presentino anche porzioni di spettro non utilizzate del tutto (*spectrum holes*), che aprirebbero la strada al paradigma *Interwave*. Siccome le tecniche di stima dalla presenza/assenza di una trasmissione primaria sono pressochè le stesse, diventa difficile discernere in modo netto questi due paradigmi. Per quest motivo tali approcci verranno considerati, nei paragrafi a seguire, come un'unico pradigma ibrido, nonostante essi abbiano alle basi definizioni e caratteristiche diverse.

Osservando la Figura 1.1, quando si introduce un sistema cognitivo, si instaura una sorta di "gerarchia ", in cui l'elemento portante è costituito dal sistema primario, al quale si sovrappongono una o più reti secondarie cognitive, che possono operare nella stessa banda licenziata per gli utenti primari, oppure in banda non licenziata.

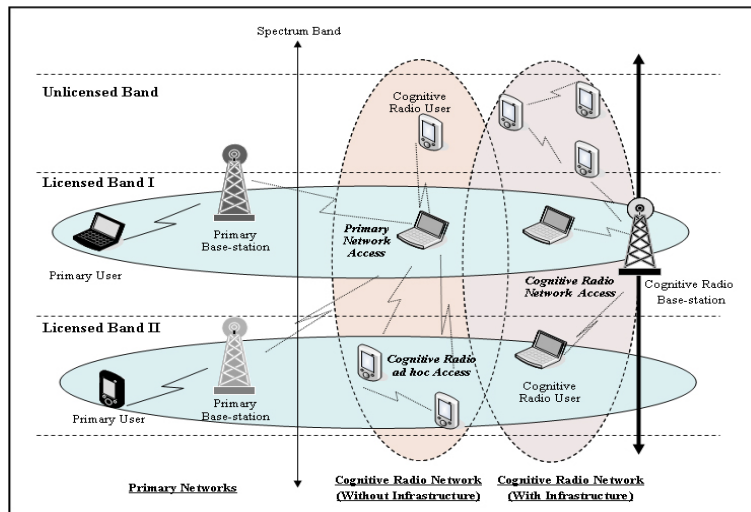


Fig. 1.1: Gerarchia Cognitiva sotto il paradigma Underlay

Per poter comunicare il nodo cognitivo deve conoscere l'interferenza che esso stesso genera verso tutti i ricevitori non cognitivi; l'ottenimento di queste informazioni è relativamente semplice se i nodi secondari possono in qualche misura comunicare con i nodi primari. Tutto ciò diventa complesso se tale comunicazione non è possibile, e lo diviene ancora di più se i nodi secondari non conoscono la posizione dei nodi primari. Questo ultimo scenario è quello generalmente più diffuso; in questi casi le tecniche che il nodo

cognitivo (sotto il paradigma *underlay*) può utilizzare per stabilire la propria possibilità di trasmissione si diversificano in *algoritmi di sensing* e *algoritmi di previsione di interferenza*.

1.2.1 Algoritmi di Sensing

Lo *Spectrum Sensing* rappresenta la funzione grazie alla quale un dispositivo cognitivo ottiene informazioni riguardanti l'uso dello spettro e la presenza di utenti primari in una determinata area geografica e in un determinato intervallo temporale. Essa rappresenta perciò la componente fondamentale che sta alla base del corretto funzionamento di una rete cognitiva. La Figura 2 riepiloga la catena di operazioni che seguono alla realizzazione del sensing:

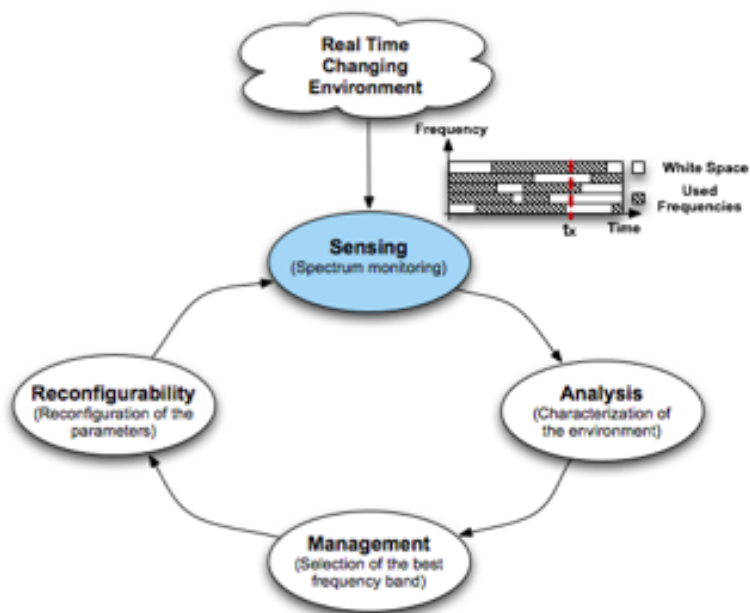


Fig. 1.2: Flusso delle operazioni di sensing

- *Sensing*: l'operazione di monitoraggio vero e proprio dell'ambiente radio circostante mediante diverse possibili tecniche, di cui si discuterà in seguito
- *Analysis*: operazione mediante la quale le informazioni ottenute in fase di sensing vengono elaborate per creare una sorta di 'mappa' dell'uso dello spettro nell'ambiente in cui il nodo cognitivo è collocato
- *Management*: costituisce la fase in cui il nodo cognitivo sceglie quale risorsa spettrale utilizzare per la propria comunicazione

- *Reconfigurability*: il nodo cognitivo riconfigura i propri parametri di trasmissione sulla base delle decisioni che ha preso nelle fasi precedenti.

In [5] vengono riepilogate le tecniche più diffuse e maggiormente studiate per la realizzazione della funzione di sensing, che graficamente vengono riassunte in Figura 3.

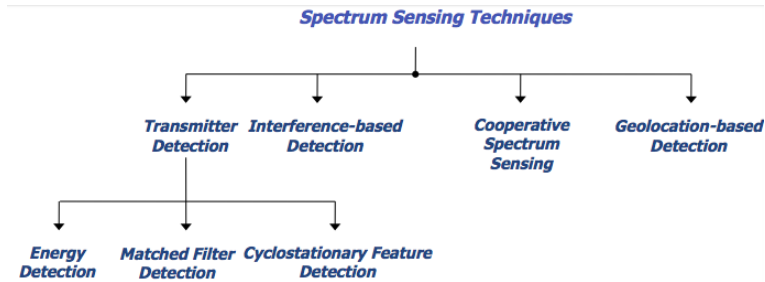


Fig. 1.3: Tecniche di sensing

Energy Detection

Rappresenta l'approccio meno dispendioso in termini di complessità computazionale e implementativa. In questo caso, infatti, il nodo cognitivo non deve conoscere nulla riguardo al sistema primario, rendendo questa tecnica quella più generica e, per questo, anche meno performante in termini di probabilità di miss-detection e falso allarme [6] [7] [8]. In questo caso il nodo secondario stabilisce o meno la presenza di una trasmissione primaria confrontando l'uscita di un energy detector con una soglia (*threshold*) che dipende dalla anche del livello di rumore [?]. Si assume che il segnale ricevuto abbia la seguente forma:

$$y(n) = s(n) + w(n) \quad (1.1)$$

dove $s(n)$ è il segnale ricevuto, $w(n)$ è il rumore additivo gaussiano bianco e n rappresenta l'indice del campione. La metrica di decisione per L'Energy Detection sarà:

$$M = \sum_{n=0}^N |y(n)|^2 \quad (1.2)$$

dove N rappresenta la dimensione del vettore osservato. La metrica M viene poi confrontata con la soglia prestabilita, e sulla base del confronto viene individuata o meno la presenza di una trasmissione primaria.

Dalla soglia fissata dipendono entrambe le probabilità di falso allarme e miss-detection: più alta è la soglia, maggiore sarà la probabilità di non accorgersi della presenza di un utente primario (*miss-detection*), mentre, viceversa, più bassa è tale soglia, maggiore sarà la probabilità di confondere una trasmissione primaria con il rumore (*falso allarme*). Essendo di primaria importanza la protezione del sistema primario, tale soglia viene generalmente fissata a livelli molto bassi, prossimi a quelli del rumore di fondo. Per questo motivo le prestazioni di sistemi cognitivi che utilizzano questa tecnica di sensing sono generalmente basse, in quanto essi operano in regime costante di basso rapporto segnale-rumore (SNR) [9]. Inoltre questa tecnica è fortemente sconsigliata quando il sistema primario utilizza una codifica/modulazione *spread spectrum* [10]. Infine, le ipotesi alla base del corretto funzionamento di questa tecnica decadono nel momento in cui non è più verificata l'ipotesi di stazionarietà del processo caratterizzante il rumore.

Per questo motivo sono nate tecniche computazionalmente più complesse, ma maggiormente affidabili.

Tecniche basate sulla forma d'onda del segnale primario

Per individuare con maggiore precisione un'opportunità di risorsa, il sistema secondario può utilizzare eventuali informazioni in merito alla struttura del segnale primario. La caratterizzazione di elementi peculiari di un segnale, come preamboli, midamboli, segnali pilota, sequenze di spreading, può aiutare notevolmente l'operazione di sensing. In questo caso il nodo secondario, mediante una correlazione tra una copia del proprio segnale e il segnale ricevuto, è in grado di differenziare non solo un segnale primario da un segnale secondario, ma anche due segnali di due sistemi primari differenti [9]. Ogni informazione aggiuntiva aiuta ad aumentare l'affidabilità della tecnica di sensing; d'altra parte però tecniche di *matching filtering* e correlazione incrementano la complessità di elaborazione dei campioni e il ritardo nella formulazione della decisione.

1.2.2 Il problema dell' *Hidden Node*

Quello del *nodo nascosto* o *Hidden Node* è un problema ben noto in letteratura [11]. Esso si presenta quando un nodo non è in grado di riconoscere, attraverso meccanismi di *carrier sensing* la presenza di altri nodi quando questi in realtà sono presenti. Questa *miss-detection* genera collisioni in caso di trasmissione, che possono essere deleterie specialmente quando esse avvengono tra pacchetti di trasmissioni primarie e secondarie.

In Figura 1.4 si può osservare un esempio semplice dello scenario sopra descritto: i nodi 1 e 2 non percepiscono l'uno la presenza dell'altro; i pacchetti generati da questi nodi e diretti al nodo D sono perciò soggetti a

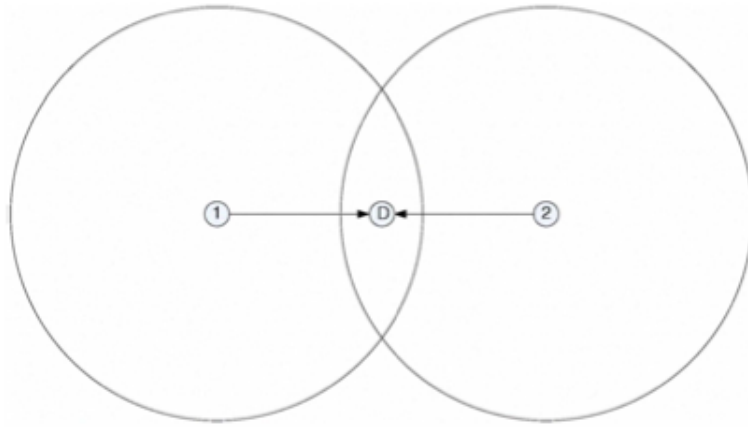


Fig. 1.4: Hidden node: scenario

collisione. In uno scenario cognitivo può accadere che un nodo secondario non riesca a percepire la presenza di un nodo primario interferisca con una trasmissione a lui diretta, nel tentativo di comunicare con un altro nodo secondario.

Questo problema si può presentare qualunque sia la strategia di sensing e qualunque sia il sistema primario; è però molto più frequente quando il sistema primario è televisivo e i ricevitori primari sono passivi [12]. Di questo problema se ne discuterà in modo più approfondito nei capitoli a seguire.

Per questo motivo si è rivelato necessario migliorare le strategie di sensing, inserendo una forma di “intelligenza” aggiuntiva che consentisse ai nodi secondari di condividere le informazioni raccolte dal sensing individuale. Nasce così il sensing cooperativo.

1.2.3 Sensing Cooperativo

La principale assunzione fatta negli algoritmi di sensing precedentemente illustrati si riferisce alla **mancata conoscenza della posizione dei nodi primari**. Se si è in grado di stabilire con un buon grado di sicurezza il livello di segnale (ossia il rapporto SNR) ricevuto da un utente primario, è possibile stabilire, con una certa accuratezza, almeno la distanza che separa il nodo secondario dal nodo primario, anche in presenza di statistiche, quali il fading alla Rayleigh, che possono “alterare” il segnale. In [13], riportato anche in Appendice A, è descritto uno stimatore in grado di individuare la corretta distanza che separa due nodi, semplicemente basandosi sul rapporto SNR ricevuto. La sola distanza però non è sufficiente per stabilire l'esatta posizione relativa di un nodo primario rispetto ad un secondario, in quanto manca l'informazione di angolo. La mancata conoscenza della posizione

esatta degli utenti primari è alla base del problema dell' *Hidden Node*. Per questo, ma non solo, è stato introdotto il concetto di *Sensing Cooperativo*.

Attraverso la cooperazione gli utenti cognitivi possono condividere le loro informazioni di sensing per arrivare ad una decisione più accurata rispetto ad una decisione individuale [14]. Infatti mediante meccanismi di triangolazione e confronto delle informazioni raccolte da ogni singolo nodo secondario, è da un lato possibile rafforzare una decisione che viene presa collettivamente dagli utenti cognitivi, e dall'altro diventa più facile individuare quelle informazioni false che potrebbero condurre ad una decisione sbagliata in merito alle opportunità di risorsa utilizzabili per la trasmissione, migliorando le curve di ROC, ossia le probabilità di falso allarme e *miss-detection*. È inoltre possibile ottenere la convergenza degli algoritmi di sensing cooperativo in tempi molto rapidi, rendendo questo approccio molto utile anche in reti dinamiche. Il miglioramento nelle performance ottenuto grazie alla diversità spaziale utilizzata dal sensing cooperativo è chiamato Cooperative Gain. In Figura 1.5 è riportato uno schema che rappresenta in modo semplice questo concetto.

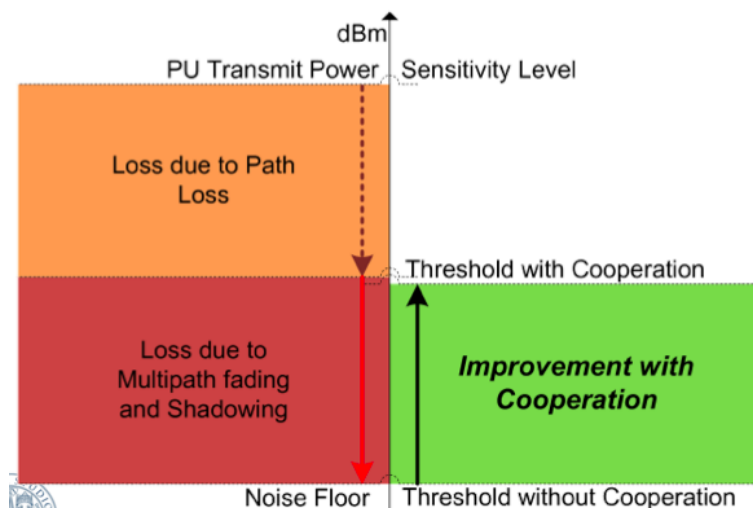


Fig. 1.5: Cooperative gain

Gli algoritmi di sensing cooperativo vengono suddivisi in 3 classi principali:

- **Algoritmi Centralizzati:** un'entità centrale, denominata *Fusion Center*, *FC*, controlla le tre fasi del processo di sensing cooperativo:
 - Seleziona un canale o una banda di frequenze dove fare sensing e informa tutti gli utenti cognitivi di fare sensing in modo individuale

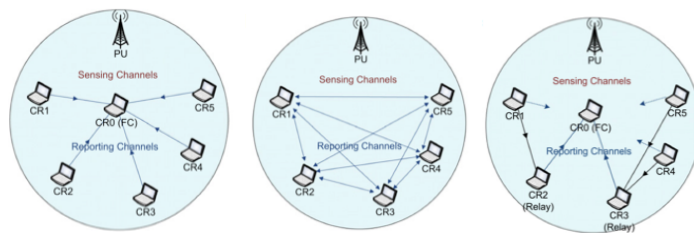


Fig. 1.6: Schemi di sensing cooperativo: centralizzato, distribuito e relay-assisted

- Tutti gli utenti secondari riportano i risultati di sensing attraverso il canale di controllo
- Il FC combina le informazioni ottenute e comunica a tutti gli utenti secondari se è presente un utente primario
- **Algoritmi Distribuiti:** non esiste nessuna unità centrale e gli utenti cognitivi comunicano tra di loro attraverso un canale comune di controllo. Successivamente allo scambio essi, attraverso algoritmi di cooperazione, convergono ad una decisione univoca sulla presenza o assenza di un utente primario.

Una famiglia molto interessante di algoritmi per il sensing distribuito si affida alla emulazione del comportamento di insetti o uccelli per la generazione di processi che portano entità distinte a convergere ad una decisione univoca. Si tratta della teoria della *Swarm Intelligence*, ossia dell' "intelligenza degli sciami". Si rimanda a [15] [16] per ulteriori approfondimenti ed esempi.

- **Algoritmi Relay-Assisted:** questo schema viene utilizzato, sia con approccio centralizzato che distribuito, nel caso in cui il canale di controllo sul quale devono essere trasmesse le informazioni di sensing è di scarsa qualità. secondo questo schema i nodi secondari che dispongono di un canale per il trasferimento delle informazioni più affidabile vengono usati come "relay".

Le tecniche di sensing cooperativo ad oggi sviluppate possono però introdurre anche alcuni svantaggi, che a volte vanno ad annullare i benefici portati dalla cooperazione stessa. Il principale svantaggio risiede nella necessità di avere un **canale di controllo comune stabile** [17] [18]. È sconsigliabile individuare il canale di controllo fra le stesse risorse ottenute mediante il sensing, in quanto:

- **deve essere comune a tutti i nodi secondari.** Nodi con posizioni diverse possono avere a disposizione diverse risorse spettrali, non

necessariamente sovrapposte. Ciò significa che la scelta del canale di controllo tra le *opportunità spettrali* potrebbe escludere alcuni nodi secondari

- **deve essere sempre disponibile.** Il canale di controllo deve essere sempre a disposizione dei nodi secondari, anche in presenza di mobilità di questi ultimi.
- **sottrae risorse preziose alla trasmissione dati.** In questa modalità si riduce la data rate netta raggiungibile, diminuendo così l'efficienza nell'uso dello spettro.

La scelta di utilizzare la banda ISM per realizzare il canale di controllo attraverso lo standard IEEE 802.11, in ciascuna delle sue declinazioni provoca diversi problemi:

- Essendo la banda non licenziata, essa risente dell'interferenza di altri sistemi. Il canale di controllo per la rete cognitiva potrebbe risultare instabile e molto interferito.
- La copertura in banda ISM ottenuta da ciascun nodo potrebbe essere molto diversa da quella che esso otterrebbe utilizzando le risorse spettrali individuate mediante il sensing. Ciò comporta la creazione di una nuova topologia di rete per il controllo, che potrebbe essere completamente diversa da quella considerata per la trasmissione. Tutto questo introduce complessità al sistema, che si traduce in maggiore latenza e minore affidabilità delle informazioni a disposizione.

Esistono algoritmi di cooperazione che non utilizzano il canale di controllo comune; questi sono in prevalenza di tipo *biologically-inspired*, come quelli riportati in [15] [16]. Tali algoritmi però sono noti per la loro lentezza nella convergenza quando la rete assume dimensioni abbastanza grandi. Diventano perciò poco efficaci quando si ha a che fare con reti ad-hoc cognitive di discrete dimensioni.

La scelta perciò non è né univoca né ottimale, ed è il risultato di un compromesso tra efficienza, affidabilità, scenario primario e secondario, disponibilità di risorse.

1.2.4 Algoritmi di previsione dell'interferenza

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto come gli utenti secondari debbano, in primo luogo, essere in grado di rilevare la presenza di utenti primari e successivamente stabilire quali porzioni dello spettro possono utilizzare per realizzare le proprie trasmissioni, senza danneggiare la qualità percepita dal sistema primario. L'approccio più semplice consiste nel limitare la potenza

di trasmissione dei nodi secondari, utilizzando dei valori di soglia che dipendono dalla distanza del nodo secondario dal trasmettitore primario. Questo approccio non è però molto efficiente quando si introduce la *mobilità*.

Tradizionalmente, quando si parla di mobilità ci si riferisce al concetto di *mobilità spaziale*, ovvero la condizione per cui i nodi cambiano la loro posizione nel tempo; quando si ha a che fare con sistemi cognitivi, si introduce un concetto nuovo: la **mobilità dello spettro**. A differenza delle reti tradizionali, in questo caso, le porzioni di banda a disposizione per la trasmissione non sono sempre disponibili, ma possono variare nel tempo e nello spazio a seconda dell'attività variabile degli utenti primari, insieme con l'eventuale mobilità spaziale degli stessi nodi primari, o degli utenti secondari. Questo fatto incide anche sul controllo della topologia di rete da parte del sistema cognitivo, che non è sempre in grado di stabilire con certezza se la "scomparsa" di un vicino sia dovuta alla comparsa di un nodo primario oppure all'effettiva sua assenza.

Queste questioni vanno ad incidere sulla imprevedibilità con cui un nodo secondario può vedere apparire nuove fonti di interferenza, rendendo l'approccio a soglia fissata poco flessibile ed efficiente. Per questo motivo la FCC Spectrum Policy Task Force ha inizialmente proposto una nuova metrica, denominata *temperatura di interferenza*, che altro non è che il *massimo valore di interferenza tollerabile, in una certa banda e in una determinata posizione, per cui il ricevitore può continuare a funzionare in modo soddisfacente* [19] [20]:

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(F_c, B)}{kB} \quad (1.3)$$

dove $P_I(f_c, B)$ è l'interferenza media in Watt sulla banda B (Hz), f_c è la frequenza di centro banda, k è la costante di Boltzmann (1.38×10^{-23} Joule/Kelvin).

Questo parametro fissa il limite che non deve essere superato dalla somma del rumore esistente e dell'interferenza generata dal nodo secondario. Perciò prima di ogni trasmissione, ogni nodo cognitivo deve misurare la temperatura di interferenza e calcolare quindi la giusta banda e la giusta potenza da utilizzare per la trasmissione, in modo da soddisfare i propri requisiti e, soprattutto, i requisiti di qualità specificati dal sistema primario.

In Figura 1.7 è riportato il concetto di temperatura di interferenza. Una volta fissato il limite, ogni nodo secondario può sfruttare il gap esistente tra tale limite e la soglia di rumore, accedendo quindi a nuove opportunità spettrali, senza però penalizzare gli utenti primari.

Come descritto in [20], tuttavia la capacità ottenibile con questo approccio è decisamente limitata, se comparata con l'interferenza che i nodi

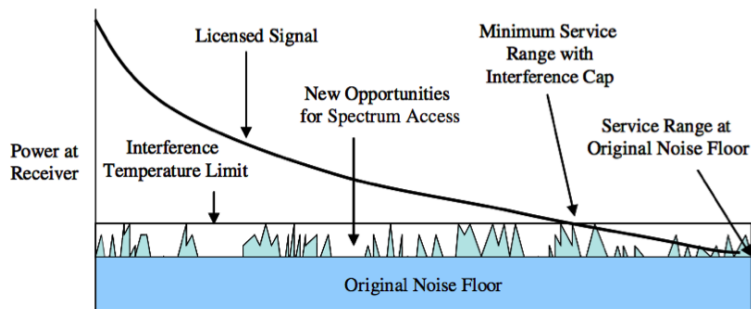


Fig. 1.7: Concetto di temperatura di interferenza

secondari generano nei confronti del sistema primario. FCC ha inoltre dichiarato che questa strada risulta di fatto non percorribile, in quanto troppo limitativa e poco flessibile; per queste ragioni, nel Maggio del 2007, FCC ha chiuso il programma di sviluppo e implementazione di questo tipo di tecnica.

1.2.5 Geolocation Database

Tutti gli approcci precedenti assumevano che i nodi secondari fossero completamente autonomi nello stabilire la presenza o meno di opportunità spettrali da poter utilizzare; le tecniche di sensing e di previsione di interferenza sono individuali e al più possono essere rese più performanti utilizzando dei meccanismi cooperativi. Esiste però un altro tipo di approccio, denominato **database-assisted**. Esso prevede che ogni nodo secondario che conosce la propria posizione all'interno dello scenario possa accedere ad un *database georeferenziato* che contiene informazioni sui canali disponibili, i livelli di interferenza e le potenze da utilizzare in riferimento alla posizione in cui il nodo si trova. Tale approccio è molto utile specialmente in quei casi, come quello in cui il sistema primario è televisivo, in cui la rete secondaria non è in grado di "percepire" la presenza dei ricevitori primari poichè passivi.

In questi casi infatti al nodo secondario non è richiesta nessuna intelligenza particolare, in quanto tutto è demandato ad un organo più o meno centralizzato che assegna al nodo secondario le risorse spettrali più adeguate e comandando una potenza di trasmissione idonea allo scenario in cui il nodo secondario si trova immerso. Apparentemente tale soluzione sembrerebbe essere quella risolutiva di tutte le problematiche, esposte nei paragrafi precedenti, legate agli algoritmi di sensing e di previsione dell'interferenza. In realtà questo approccio apre una serie di problematiche tutt'altro che semplici:

- Quali informazioni devono essere fornite all'utente secondario?

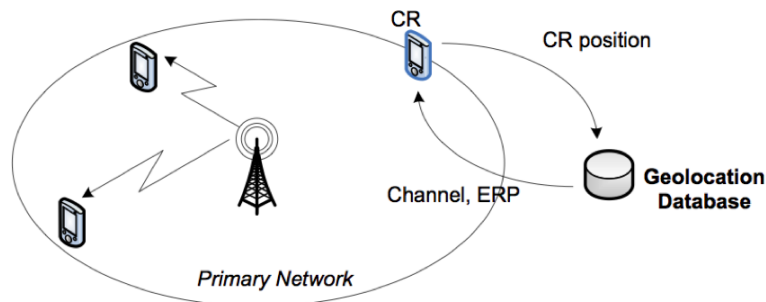


Fig. 1.8: Scenario con geolocation database

Il punto fondamentale sta nel grado di indipendenza che si vuole dare a ciascun dispositivo cognitivo. Intuitivamente il database potrebbe già fornire all'utente secondario la frequenza di lavoro, la banda e la potenza di trasmissione da utilizzare; questo fa sì che l'intelligenza del sistema venga dislocata trasferita dal nodo secondario al database. Se da un lato quindi si semplifica il processo, dall'altro si richiede al database di gestire una complessità molto elevata; esso infatti dovrebbe, in questo caso, elaborare algoritmi molto complessi che tengono in considerazione non solo tutte le informazioni che i nodi secondari gli forniscono, ma anche le relazioni che tra queste informazioni sussistono. Bisogna tenere a mente, infatti, che i nodi secondari non sono entità isolate, ma costituiscono una rete di elementi tra i quali avviene uno scambio di informazioni. L'allocazione di un canale, quindi, non può avvenire in modo indipendente per ogni dispositivo cognitivo, ma deve essere frutto di un processo che consideri le relazioni che esistono all'interno della rete secondaria. La scelta delle informazioni da fornire a ciascun nodo cognitivo deve essere perciò un compromesso tra complessità dell'algoritmo centralizzato del database e complessità che ogni utente secondario può essere in grado di gestire. Oltre a questi due aspetti intervengono inoltre fattori di affidabilità delle informazioni; infatti, quanto più si demanda al nodo secondario, tanto più le informazioni di scenario raccolte saranno soggette ad errori di valutazione, risultando così meno affidabili. Perciò la decisione in merito a quali informazioni è necessario fornire all'utente cognitivo è ancora una problematica aperta; l'analisi è tutt'altro che semplice, come descritto in [21].

- **Con quale frequenza aggiornare le informazioni fornite?**

È abbastanza intuitivo capire che un aggiornamento frequente delle informazioni da fornire ai dispositivi secondari comporta un aggravio

computazionale al database, in quanto esso dovrebbe elaborare i complessi algoritmi del punto precedente diverse volte in un arco temporale che può essere più o meno lungo. È però necessario sottolineare che le *mobilità spaziale e spettrale*, di cui si è discusso nei paragrafi precedenti, impongono un aggiornamento temporale più o meno frequente a seconda di quanto velocemente mutano le condizioni dello scenario. La scelta dell'intervallo di aggiornamento delle informazioni locali è perciò anch'esso frutto di un compromesso tra complessità e affidabilità.

- **Chi si occupa della gestione del database?**

Il database contiene informazioni, riguardanti il sistema, sensibili. La gestione di questi dati perciò è delicata ed è oggetto di discussioni sia tecniche ma anche e soprattutto di natura legale a cui tutt'ora non è stata data risposta definitiva.

- **Come vengono distribuite le informazioni ai nodi cognitivi?**

Anche questa è una problematica che deve essere affrontata. Se si suppone una distribuzione capillare dei dispositivi cognitivi, le richieste di informazioni al database potrebbero essere migliaia contemporaneamente. Questo rischia di congestionare il meccanismo di distribuzione, aumentando la latenza e abbassando la consistenza e l'affidabilità delle informazioni da destinare agli utenti secondari.

Geolocation database e sensing individuale non sono però due concetti mutuamente esclusivi, ma possono essere integrati per creare un approccio ibrido che consenta di ottenere i vantaggi dell'uno e dall'altro, favorendo l'efficienza e la flessibilità.

Capitolo 2

Cognitive Radio e Digital Video Broadcasting

L'intero capitolo è incentrato sulla descrizione delle caratteristiche di un sistema cognitivo che coesiste con un sistema primario di tipo televisivo. Verranno delineate le principali caratteristiche, passando anche attraverso il recente standard IEEE 802.22, collegandosi al problema del *Digital Divide*, di cui la Radio Cognitiva può rappresentare una soluzione.

2.1 Il problema del *Digital Divide*

Il Digital Divide rappresenta l'impossibilità da parte un utente digitale di ottenere una banda per la connessione dati almeno pari a 2 Mbps. In questa situazione si trova, purtroppo, ancora oggi, il 13% della popolazione italiana, situata specialmente in zone rurali e montuose dove non è possibile, e ancor meno economicamente conveniente, portare la connessione ADSL o in fibra ottica.

In molte zone rurali il problema è stato risolto con sistemi in grado di operare nelle frequenze dei 5GHz (approccio tipicamente utilizzato dai WISP - Wireless Internet Service Provider); questa strada diventa però molto difficoltosa da percorrere nelle zone montuose e alpine, in quanto essa richiede che i due nodi in comunicazione tra loro siano in condizioni di perfetta visibilità. Dato di fatto è che la maggior parte delle zone in divario digitale è coperta dal segnale televisivo; questo avviene anche grazie alle ottime caratteristiche di propagazione dello spettro radio nelle frequenze comprese tra i 470 MHz e i 790 MHz, ovvero lo spettro *Ultra High Frequency, UHF*, che consentono di mantenere una buona connettività anche in presenza di condizioni non completamente LoS (*No Line of Sight*).

La transizione dalla TV analogica al digitale terrestre (*Digital Video Broadcasting- Terrestrial, DVB-T*), oltre a liberare quella parte dello spettro intorno agli 800 MHz (*Dividendo Digitale 1-nota a pi* - *pagina- assegnata*

tramite asta agli operatori telefonici) ha permesso una riduzione delle potenze di trasmissione e una maggiore razionalizzazione delle risorse utilizzate. Questo ha favorito lo sviluppo di studi in merito all'applicazione in queste bande del paradigma cognitivo, volto ad alleviare, se non risolvere, il problema del divario digitale. Per questi motivi IEEE ha iniziato un lavoro di standardizzazione e regolamentazione delle procedure che una rete regionale cognitiva deve adottare per poter operare in banda UHF, sfruttando porzioni di spettro non utilizzate, e garantire servizi a banda larga in zone remote e non digitalizzate, senza recare interferenza agli utenti televisivi. Tale standard, uscito nella sua prima versione nel Luglio 2011, prende il nome di IEEE802.22 Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands [22] [23].

2.2 IEEE 802.22: Cognitive Radio Wireless Regional Area Network: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands

Lo sviluppo dello standard IEEE 802.22 è specificatamente dedicato all'applicazione del paradigma cognitivo in banda UHF, dove il sistema primario è quello televisivo; esso definisce le procedure di accesso e di sensing, la struttura dei messaggi e del segnale radio, oltre che lo scenario di riferimento per il quale questo standard è stato pensato. Alla base della possibilità di operare da parte del sistema secondario, lo standard pone la garanzia di protezione della qualità del servizio dell'utente primario, verso il quale l'interferenza prodotta non deve essere percepita.

Scenario

IEEE 802.22 nasce per applicazioni che forniscono accesso a banda larga a zone rurali di con un raggio compreso tra i 17 e i 30 Km, con estensione fino a 100 Km nei casi in cui una topografia dello scenario favorevole lo consente. L'architettura del sistema è gerarchica, con al vertice una *base station*, in grado di servire fino a 255 unità secondarie fisse (*Customer Premises Equipment*, CPE), dotate di antenne outdoor direzionali posizionate a circa 10m dal suolo. L'installazione è perciò del tutto simile a quella della ricezione televisiva.

Lo standard pone anche dei limiti ben precisi allo throughput da garantire: in *download* il picco minimo ai bordi dell'area di copertura non deve scendere al di sotto di 1.5 Mbps, mentre in *upload* non deve stare al di sotto di 384Kbps. Questa è la rate minima necessaria per avere un servizio di videoconferenza.

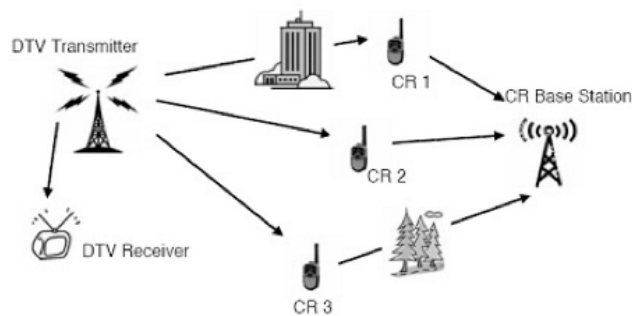


Fig. 2.1: Scenario previsto da IEEE 802.22

L'uso delle frequenze nello spettro UHF consente di avere coperture estese; questo aspetto, se da un lato costituisce un vantaggio in quanto riduce il numero di elementi di rete, dall'altro si riflette negativamente sui ritardi. Per questo motivo i parametri di starto fisico (PHY) devono necessariamente essere ottimizzati per assorbire la dispersione temporale causata dal *multi-path*; la modulazione OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) permette infatti di assorbire ritardi fino ad un massimo di $37 \mu\text{s}$, che altro non è che il ritardo accumulato dal segnale per raggiungere i bordi dell'area di copertura (30 Km). Oltre questa distanza è compito delle funzioni di accesso MAC (*Medium Access Control*), attraverso procedure intelligenti di *scheduling*, assorbire il ritardo aggiuntivo per distanze fino a 100 Km.

Architettura di riferimento di un nodo 802.22

Per semplificare al comprensione della struttura di un nodo 802.22 è possibile individuare dei "blocchi" caratteristici che ne definiscono l'architettura protocollare: lo strato fisico, **PHY**, lo strato di accesso, **MAC**, l'interfaccia verso l'unità di gestione del nodo, **SME** (Station Management Entity) e le interfacce verso PHY e MAC, **PLME** (PHY Layer Entity Management) e **MLME** (MAC Layer Entity Management).

Oltre a questi elementi vi sono, naturalmente, gli strati più elevati della pila (IP, ATM, IEEE1934 etc) e i moduli riferiti al *geolocation* e allo *Spectrum Sensing*, *SSF*, di cui discuteremo più avanti.

Come si può vedere dalla Figura 2.2, al centro della MLME di una Base Station esiste un'entità funzionale che prende il nome di **Spectrum Manager** (SM), dedicata alla gestione dello spettro. Di questa esiste anche una versione più snella e meno complessa (**Spectrum Automation**, SA) presente nella MLME di una CPE. Questa entità ha lo scopo di controllare l'accesso a e l'uso delle risorse spettrali da parte delle CPE servite all'interno

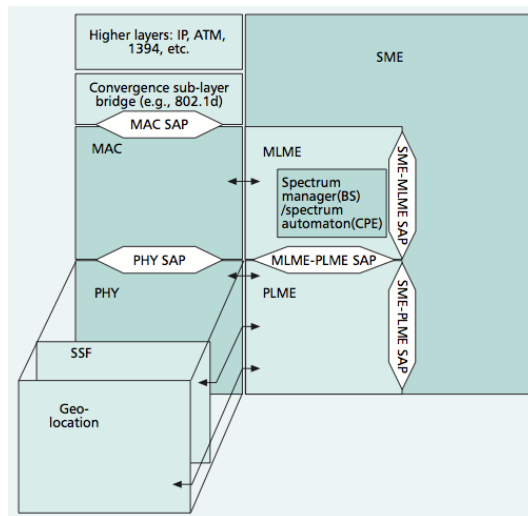


Fig. 2.2: Architettura di riferimento di un nodo IEEE 802.22

dell'intera cella. Dall'altro lato le SA all'interno delle CPE costituiscono una sorta di "intelligenza" di backup, in caso di interruzione temporanea della comunicazione con la BS, consentendo alle CPE un minimo di autonomia nel portare avanti in modo corretto le procedure di accesso e uso delle risorse, incluse le fasi di inizializzazione e di switch di canale.

PHY Layer

IEEE 802.22 definisce una singola interfaccia radio basata su una modulazione OFDMA a 2048 sottoportanti, che garantisce ottime prestazioni anche in condizioni NLoS ed in presenza di multipath [24]. Queste sottoportanti sono distribuite su tutto il canale a disposizione, in modo tale da migliorare la diversità in frequenza; inoltre non è possibile trasmettere cluster di sottoportanti adiacenti a causa dell'elevata interferenza che si potrebbe generare nei confronti del sistema di microfonia wireless, che opera in banda vicina.

Per poter ottenere buone prestazioni anche in condizioni di canale difficili, lo standard prevede quattro differenti prefissi ciclici di durata $\frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}$ di simbolo. Non è previsto invece l'uso di tecniche MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) o beamforming, a causa delle dimensioni non trascurabili delle antenne in questo range di frequenze. IEEE802.22 definisce dodici combinazioni possibili di tre schemi di modulazione (QPSK, 16-QAM, 64QAM) e quattro code-rate ($\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}$), scelti secondo un approccio a *modulazione adattativa*. Inoltre lo standard prevede come obbligatoria la codifica convoluzionale per la correzione degli errori (FEC); sono opzionali invece due diverse varianti di turbocodici e la codifica LDPC, che perÅš comportano

una maggiore latenza nelle operazioni di decodifica e richiedono una ulteriore complessità.

Poichè non è sempre possibile avere a disposizione una coppia di canali televisivi disponibili, lo standard stabilisce una trasmissione TDD (Time Division Duplex), anche se è prevista anche la funzionalità FDD (Frequency Division Duplex) come opzionale.

MAC Layer

Le procedure IEEE 802.22 MAC forniscono la possibilità di utilizzare in modo flessibile ed efficiente le risorse, supportando funzionalità cognitive che permettono la coesistenza sia con il sistema primario televisivo, che con gli altri sistemi 802.22.

Come anticipato in precedenza, il sistema 802.22 è costituito da una rete punto-multipunto, con al centro la Base Station, che controlla l'accesso di un certo numero di CPE che forniscono servizi di accesso a banda larga. Nella direzione di *download* le trasmissioni sono schedate in slot MAC consecutivi, mentre nella direzione opposta, *upload*, il canale $\tilde{\Lambda}$ condiviso tra tutte le CPE secondo uno schema di accesso multiplo di tipo *demand-assigned*, DAMA. È molto importante, ai fini di una corretta gestione degli accessi, la garanzia di sincronismo; per questo motivo BS e CPE devono essere equipaggiate con un sistema di geolocalizzazione, che, grazie ad un orologio assoluto, permette sia una corretta localizzazione ai fini della valutazione dei *white space*, sia la sincronizzazione con le reti vicine. Infatti, lo standard prevede che diversi sistemi 802.22 coesistano nello stessa area; per poter rispondere alla necessità di gestire le interferenze tra diverse reti, 802.22 MAC utilizza il protocollo di comunicazione Coexistence Beacon Protocol, CBP, basato sulla trasmissione di *beacon* tra le diverse celle WRAN [25].

Funzionalità cognitive

La parte più innovativa dello standard riguarda sicuramente le funzionalità cognitive di Bs e CPE. Esse riguardano lo *spectrum sensing* e l'uso di un *geolocation database* per la rilevazione delle opportunità spettrali. In Figura 2.3 è riportato un diagramma che riassume le interazioni esistenti tra le diverse unità funzionali adibite alla gestione dello spettro:

Lo *Spectrum Manager* all'interno della BS prende in ingresso gli output della funzione di sensing (SSF) e le informazioni provenienti dal geolocation database e fornisce una decisione in merito a quali canali è possibile utilizzare e ai livelli di potenza, in termini di EIRP.

In base alla posizione e alle informazioni di sensing fornite dalla CPE, la BS è in grado di fornire a ciascuna CPE le informazioni relative alle risorse spettrali che le CPE stesse possono utilizzare. I passi che a lo Spectrum

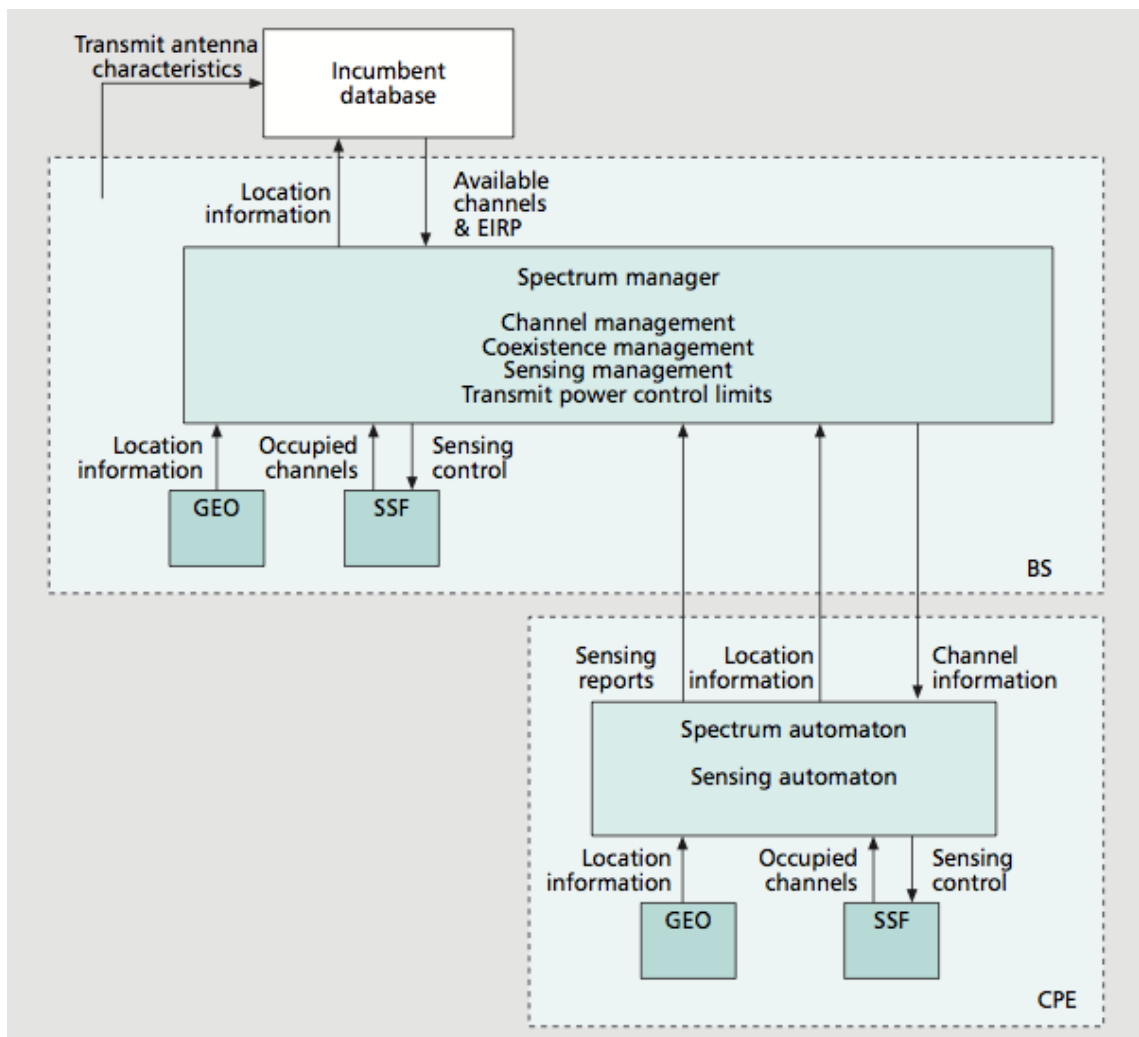


Fig. 2.3: Diagramma delle relazioni tra le unità adibite alla gestione dello spettro

Manager della BS deve compiere prima di dichiarare che un canale è libero sono diversi:

- Attraverso le operazioni sensing è necessario stabilire che il canale N e i canali adiacenti non sono occupati da trasmissioni televisive analogiche o digitali.
- A questo punto, in base alle posizioni delle CPE, lo Spectrum Manager stabilisce se le distanze tra CPE e ricevitori TV sono tali da garantire un'adeguata protezione degli utenti primari. Se tale protezione è insufficiente lo SM può:
 - ridurre l'EIRP della CPE coinvolta, ponendo un limite alla potenza in trasmissione (Transmit Power Control, TPC)
 - se questa riduzione degrada le prestazioni del link secondario, la CPE può essere momentaneamente spenta
 - la BS può diminuire la propria EIRP, abbassando il grado di interferenza; questo però comporta il non raggiungimento delle CPE a bordo cella; lo Spectrum Manager inizierà in quel caso una procedura di cambio di canale, che coinvolgerà però tutte le CPE dell'area coperta dalla BS.

È comunque sempre previsto che l'operatore possa in qualunque momento intervenire manualmente per evitare malfunzionamenti che possono compromettere la protezione della QoS degli utenti primari.

Per quanto riguarda la geolocalizzazione, IEEE 802.22 richiede che la posizione di ogni BS debba essere nota con una tolleranza di 15m, mentre quella di ogni CPE deve essere nota con un margine di errore di massimo 100m. Soltanto dopo aver acquisito, attraverso un sistema GPS, la propria posizione, una CPE può tentare di agganciarsi ad una BS, a cui fornirà tale informazione. Ogni BS ha accesso ad un database che fornisce informazioni non solo relativamente ai canali disponibili e ai valori di EIRP permessi, ma anche all'attività delle altre reti 802.22 in zona. In più il database è anche in grado di stabilire, una volta nota la posizione e le caratteristiche di trasmissione di una CPE, quale sia l'area di interferenza di quest'ultima.

Come già detto in precedenza, a fianco del geolocation database operano le funzioni di spectrum sensing, che analizzano lo spettro in banda televisiva, analogica e digitale, e nelle porzioni di spettro utilizzate dai dispositivi ausiliari a bassa potenza, come i microfono wireless. I parametri caratteristici della funzione di sensing sono quattro:

- sensibilità del ricevitore : -116 dBm per il segnale digitale, -94 dBm per l'analogico e -107 dBm per gli apparati ausiliari
- ritardo nella rilevazione di un utente primario: per tutti i tipi di segnali è 2s

- probabilità di falso allarme: fissata a 0.1
- probabilità di corretta rilevazione: fissata a 0.9.

Tutti gli apparati 802.22 sono dotati almeno di un'antenna omnidirezionale con 0 dBi di guadagno, collocata in esterno ad un'altezza minima di 10m; il sensing viene realizzato in modo indipendente per ogni canale, anche se lo standard non pone nessun veto sul sensing multiplo di più canali contemporaneamente. La funzione di sensing viene attuata nei periodi di "quiete", ossia nei momenti in cui non ci sono trasmissioni tra CPE e BS; tali periodi sono previsti e dimensionati in modo specifico dallo standard.

Infine, nonostante il sensing venga realizzato sia dalla CPE che dalla BS, la decisione finale in merito al risultato dell'operazione viene presa alla Base Station e riportata in un messaggio il cui formato è ben specificato dallo standard. Piena libertà viene invece lasciata nella scelta della funzione di sensing da applicare.

Capitolo 3

Analisi dell'interferenza prodotta da una rete secondaria verso un sistema primario di tipo televisivo

3.1 Modello analitico di valutazione dell'interferenza prodotta da una trasmissione secondaria

Nel primo capitolo di questo lavoro sono stati delineati i principali metodi in base ai quali un nodo secondario può stabilire se una risorsa spettrale è da considerarsi “libera” o meno; oltre alle tecniche di spectrum sensing sono stati elencati altre procedure, come l'uso di un geolocation database e la predizione dell'interferenza generata attraverso il calcolo della *temperatura di interferenza*. Tutti questi modelli prevengono ogni possibile effetto di una trasmissione secondaria su di un ricevitore primario¹, e non tengono conto della possibilità, per i nodi secondari, di utilizzare localmente una frequenza, anche se questa è impegnata, mantenendo bassi i livelli di potenza e senza danneggiare la qualità degli utenti primari.

Da queste motivazioni è nata l'idea di un modello che permettesse il calcolo a priori dell'interferenza generata da un sistema secondario verso un primario, ma senza utilizzare una formula, come quella della temperatura di interferenza, svincolata dalle caratteristiche geometriche dello scenario e dalle informazioni sulla distribuzione dei nodi primari; attraverso il modello proposto, ogni nodo cognitivo può stabilire la percentuale di utenti primari che saranno soggetti a fuori servizio in caso di trasmissione, tenendo in considerazione, però, lo scenario particolare in cui il nodo cognitivo si trova

¹Da qui in poi il sistema primario sarà sempre di tipo televisivo

immerso.. In base a questa informazione il nodo può così scegliere quale risorsa spettrale utilizzare ed eventualmente includere questa informazione in metriche di layer 3 per ottimizzare la scelta del percorso (si veda Capitolo 4).

3.1.1 Scenario con cella isolata e un solo nodo secondario

Si consideri uno scenario semplice, in cui sono presenti un trasmettitore primario DVB-T, K ricevitori primari e un nodo secondario; poichè i ricevitori primari sono passivi, non è possibile, per il nodo cognitivo, stabilire la loro posizione e per questo motivo si assume che essi siano uniformemente distribuiti all'interno dell'area di copertura del sistema primario². Si suppone inoltre che l'outage del sistema primario possa essere misurato come il rapporto tra il numero di ricevitori primari che vanno in fuori servizio a causa di una trasmissione secondaria³ e il numero di ricevitori primari (K) che normalmente vengono serviti dal trasmettitore primario:

$$Outage = \frac{\sum_{k=1}^K event\{\frac{C}{I}|_k < \frac{C}{I}|_{lim}\}}{K} \quad (3.1)$$

Si assume inoltre, senza ledere la generalità, che la densità di utenti primari nell'area corrisponda a λ ; perciò il numero di ricevitori primari nell'area coperta è $K = \lambda A_{cov}$, dove A_{cov} corrisponde all'area coperta dal trasmettitore primario. Il numero di ricevitori primari in outage sarà di conseguenza pari a λA_{int} , dove A_{int} corrisponde alla frazione di area coperta dal trasmettitore primario in cui risiedono i ricevitori primari, il cui SNR scende sotto la soglia minima di qualità a causa della trasmissione secondaria. Si avrà perciò che:

$$\begin{aligned} Outage &= \frac{\lambda[A\{event(\frac{C}{I}(x,y) < \frac{C}{I}|_{lim})\}]}{\lambda A} = \\ &= \frac{A_{int}}{A_{cov}} = \frac{\int_{A_{cov}} Pr\{\frac{C}{I}(x,y) < \frac{C}{I}|_{lim}\} dx dy}{\int_{A_{cov}} dx dy} \end{aligned} \quad (3.2)$$

dove $\frac{C}{I}(x,y)$ è il rapporto segnale-rumore nel generico punto di coordinate (x,y) . Si suppone inoltre che trasmettitore e ricevitore primario e nodo secondario utilizzino antenne omnidirezionali. Questo consente di semplificare il calcolo delle aree descritte prima, in quanto in questo modo possono essere considerate circolari; in realtà questo rappresenta però il caso peggiore, poichè i ricevitori utilizzano antenne direttive, che potrebbero aiutare ad

²La distribuzione uniforme rappresenta quella a massima incertezza

³Il rapporto segnale-rumore, SNR, scende al di sotto di una certa soglia

abbattere l'interferenza percepita, migliorando le condizioni di operatività dei nodi cognitivi. Sotto l'ipotesi di aree di copertura circolari, è conveniente cambiare il sistema di riferimento, passando da un sistemi di coordinate cartesiane ad uno di coordinate polari (r, ϕ) ; questo impone:

$$dxdy = r dr d\phi \quad (3.3)$$

Procedendo con il cambio di coordinate l'Eq. 3.2 diventa:

$$\begin{aligned} Outage &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R Pr\left\{\frac{C}{I}(r, \phi) < \frac{C}{I}|_{lim}\right\} r dr d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\phi} = \\ &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R P_{out}(r, \phi) r dr d\phi}{\pi R^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

dove $P_{out}(r, \phi)$ rappresenta la probabilità di fuori servizio sperimentata da un utente primario posizionato nel punto di coordinate generiche (r, ϕ) all'interno dell'area di servizio primaria e R è il raggio di copertura del trasmettitore primario. Dal punto di vista della rappresentazione geometrica del problema, si consideri la famiglia di curve che rappresenta il luogo geometrico dei punti per i quali il rapporto $\frac{C}{I}$ è costante ed è pari al valore limite.

La Figura 3.1 mostra come queste curve cambino al variare del valore limite (curve in verde); il cerchio blu rappresenta la copertura del trasmettitore primario, quella in rosso il limite di copertura del nodo cognitivo.

Perciò la regione soggetta ad interferenza, nella quale i ricevitori primari saranno in outage, A_{int} è la parte di area di copertura primaria delimitata da una delle curve a C/I costante. Sotto le ipotesi fatte precedentemente, la valutazione dell'outage primario si riduce al calcolo dell'ampiezza di quest'area.

Lo step successivo dell'elaborazione del modello consiste nella considerazione della statistica del canale. Per questo scopo vengono introdotte due variabili aleatorie di fading, g e g , estratte da due processi di Rayleigh differenti. Esse tengono in considerazione le caratteristiche di scattering, legate al fenomeno dei cammini multipli, che riguarda, rispettivamente, il ricevitore primario e il nodo secondario. Il rapporto C/I diviene perciò:

$$\frac{C}{I} = \frac{P_{tx} g^2 r_s^\alpha}{S_{tx} f^2 r^\alpha} \quad (3.5)$$

dove α è il coefficiente di path-loss, P_{tx} e S_{tx} sono, rispettivamente, le potenze di trasmissione primaria e secondaria, r è la distanza del ricevitore

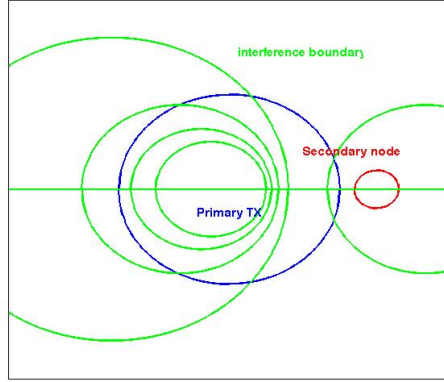


Fig. 3.1: Rappresentazione grafica dello scenario: curve a C/I costante (verde), area di copertura del nodo secondario (rosso), area di copertura del trasmettitore primario (blu)

primario dal trasmettitore primario⁴, r_s è la distanza del nodo secondario dal ricevitore primario. Poichè la probabilità di outage è definita come:

$$P_{out}(r, \phi) = Pr \left[\frac{C}{I} < \frac{C}{I}|_{lim} \right] \quad (3.6)$$

sostituendo l' Eq. 3.5 si avrà:

$$P_{out}(r, \phi) = Pr \left[\left(\frac{P_{tx}}{S_{tx}} \right) \left(\frac{g}{f} \right)^2 \left(\frac{r_s}{r} \right)^\alpha < \frac{C}{I}|_{lim} \right] \quad (3.7)$$

Come si può osservare dall'Eq. 3.7, la probabilità di outage in (r, ϕ) si può calcolare a partire dalla distribuzione cumulativa della variabile aleatoria $X = \frac{g^2}{f}$; come è ben noto ([26]), la funzione densità di probabilità di una variabile di Rayleigh al quadrato è data dalla funzione esponenziale, assumendo che $\sigma = 1$. Perciò si ha che

$$p.d.f._g(g) = e^{-g} \quad (3.8)$$

$$p.d.f._f(f) = e^{-f} \quad (3.9)$$

Da questo si ottiene che:

⁴collocato all'origine del riferimento polare

$$\begin{aligned}
F_X(x) &= \int_0^{+\infty} \int_0^{Xf} e^{-f} e^{-g} df dg = \\
&= \int_0^{+\infty} e^{-f} (1 - e^{-zf}) df = \\
&= 1 - \frac{1}{(x+1)}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

È inoltre possibile descrivere r_s in funzione di r :

$$r_s = \sqrt{r^2 + D_{SP}^2 - 2rD_{SP} \cos(\phi)} \tag{3.11}$$

dove D_{SP} rappresenta la distanza tra il trasmettitore primario e il nodo secondario. Sostituendo le Eq. 3.10 e 3.11 in Eq. 3.7 si ottiene la probabilità di fuori servizio sperimentata da un generico ricevitore primario:

$$\begin{aligned}
P_{out}(r, \phi) &= Pr \left[X < \left(\frac{C}{I} |_{lim} \right) \left(\frac{S_{TX}}{P_{TX}} \right) \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + D_{SP}^2 - 2rD_{SP} \cos(\phi)}} \right)^\alpha \right] = \\
&= 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{C}{I} |_{lim} \right) \left(\frac{S_{TX}}{P_{TX}} \right) \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + D_{SP}^2 - 2rD_{SP} \cos(\phi)}} \right)^\alpha}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Sostituendo questa espressione nell'Eq. 3.4 si ottiene la probabilità di fuori servizio del sistema primario. Questa espressione non è però calcolabile in forma chiusa per tutti i valori di α , ma soltanto per $\alpha = 2$:

$$\begin{aligned}
Outage &= \frac{B}{R^2(B+1)^3} [(B-1)D_{SP}^2 \ln[4BD_{SP}^2] - (B-1)D_{SP}^2] \\
&\quad + \frac{B}{(R^2(B+1)^3) \sqrt{(D_{SP}^2 + (B+1)R^2)^2 - 4D_{SP}^2 R^2}} \\
&\quad \cdot [(B+1)D_{SP}^4 + 2(B^2-1)D_{SP}^2 R^2 + (B+1)^3 R^4] \\
&\quad - \frac{B}{(R^2(B+1)^3) \sqrt{(D_{SP}^2 + (B+1)R^2)^2 - 4D_{SP}^2 R^2}} \\
&\quad \cdot \left[(B-1)D_{SP}^2 \sqrt{D_{SP}^4 + 2(B-1)D_{SP}^2 R^2 + (B+1)^2 R^4} \right] \\
&\quad \cdot \left[\ln[2((B-1)D_{SP}^2 + (B+1)((B+1)R^2 + \sqrt{D_{SP}^4 + 2(B-1)D_{SP}^2 R^2 + (B+1)^2 R^4})] \right]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

dove $B = \frac{C}{I} |lim \left(\frac{S_{TX}}{P_{TX}} \right)$.

Ai fini della dimostrazione della validità del modello matematico, è stato realizzato anche un simulatore MonteCarlo dello scenario, il cui output è stato confrontato con il risultato analitico. Sono stati considerati λA_{cov} nodi primari, distribuiti uniformemente all'interno dell'area di copertura e un nodo secondario (come in Fig. 3.1). Il rapporto C/I limite è stato posto uguale a 19.3 dB, secondo lo standard ETSI per cella isolata in presenza di fading alla Rayleigh [27]. Tutte le antenne sono state considerate omnidirezionali e ci riferisce sempre ai valori di potenza in termini di EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power); la frequenza scelta è pari a 700 MHz. In Fig. 3.2 e 3.3 vengono confrontate le probabilità di outage ottenute con il modello analitico e attraverso simulazione, al variare, rispettivamente, della distanza D_{SP} tra nodo cognitivo e trasmettitore primario (normalizzata rispetto al raggio R) e del rapporto tra le potenze S_{TX}/P_{TX} .

Per ottenere la Figura 3.2 il rapporto S_{TX}/P_{TX} è stato posto uguale a 1/100, mentre in Figura 3.3 la distanza D_{SP} normalizzata è stata posta uguale a 1.5. Queste figure mostrano come il modello analitico sia molto vicino ai risultati di simulazione; inoltre si osserva come l'outage del sistema primario aumenti velocemente all'aumentare della potenza di trasmissione del nodo secondario. Questo conferma come sia necessario utilizzare livelli di potenza dei nodi secondari molto bassi, là dove non ci sono veri e propri "white spaces", ma le frequenze sono utilizzate, anche se con efficienza molto bassa. Queste considerazioni spingono all'utilizzo di un'architettura distribuita e multi-hop per la rete secondaria.

Poichè si considera, in questa fase, il caso a cella isolata, al situazione può solo peggiorare quando si considerano più di un trasmettitore primario co-canale e più di un nodo secondario.

Sarà compito dei paragrafi successivi descrivere il modello analitico e simulativo utilizzato per studiare lo scenario più complesso.

3.1.2 Scenario a cella isolata e con una rete di nodi secondari

Il passo successivo alla formulazione del precedente modello analitico ha costituito l'inserimento di una rete di nodi secondari, invece che un solo elemento cognitivo. Questo complica il modello, in quanto a questo punto l'interferenza verso il sistema primario deriverà da diverse trasmissioni simultanee generate dai nodi secondari [28].

Si supponga che il nodo secondario calcoli la probabilità di outage del primario considerando come interferenza complessiva del sistema secondario quella stessa interferenza da lui percepita, sommata a quella che esso stesso genera, per ogni canale a disposizione:

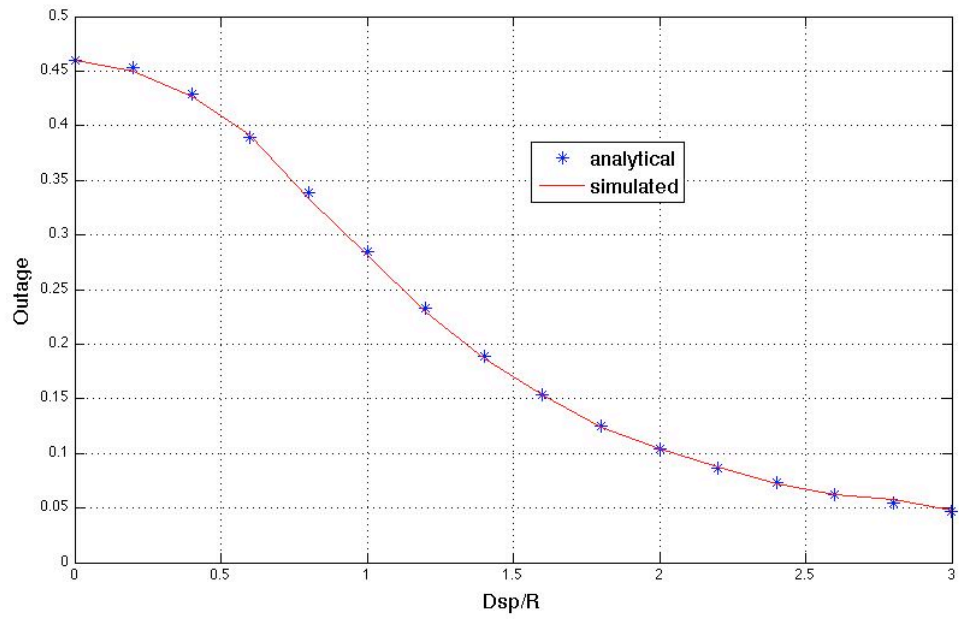


Fig. 3.2: Probabilità di outage vs distanza tra nodo secondario e primario normalizzata

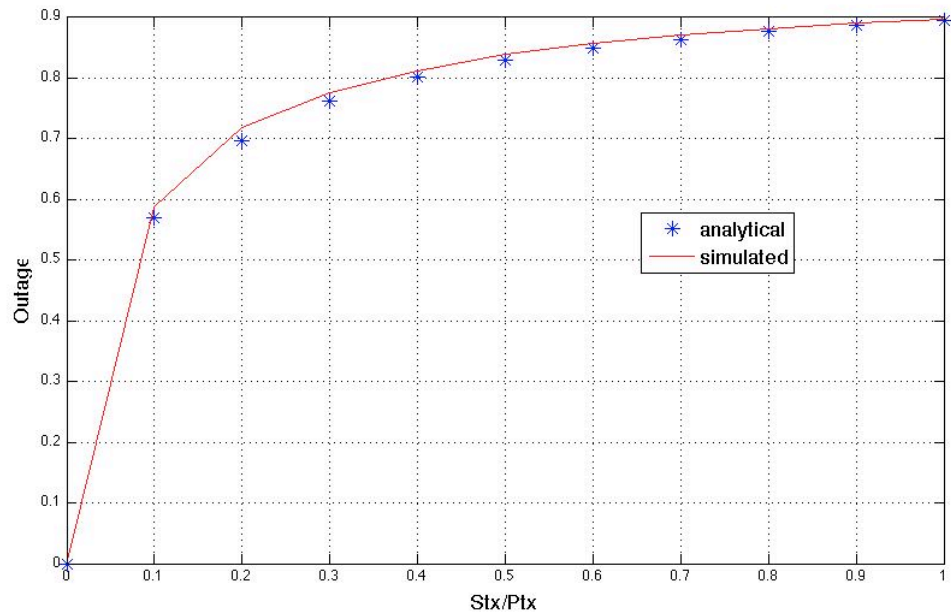


Fig. 3.3: Probabilità di outage vs potenza di trasmissione secondaria normalizzata

$$I_{tot} = I_{generata} + I_{percepita} \quad (3.14)$$

Ciò significa che il nodo secondario suppone che un ricevitore primario a lui vicino si trovi nelle sue stesse condizioni di interferenza, essendo ricevitore primario e secondario del tutto simili dal punto di vista sia dello scenario in cui sono immersi che delle caratteristiche di ricezione. Questa ipotesi definisce in modo univoco lo scenario di riferimento; si assume infatti che la distanza tra ricevitore primario e secondario sia ridotta e inferiore a quella che il nodo secondario ha dai suoi interferenti. Si presuppone perciò che lo scenario sia denso e che i nodi siano lontani dai bordi dell'area; in questa situazione, anche quando la distanza tra il nodo secondario di riferimento e i suoi interferenti è minore della distanza che c'è tra questo e un qualsiasi ricevitore primario, si può sostenere, con buona approssimazione, che tale primario, pur non essendo immerso nel medesimo scenario, sarà affetto da un'interferenza del tutto analoga a quella a cui è soggetto il secondario di riferimento (vedi Figura 3.4).

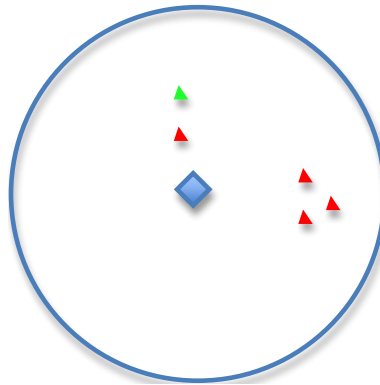


Fig. 3.4: Scenario di riferimento: ricevitore primario (verde), ricevitori secondari (rosso), trasmettitore primario (blu)

Seguendo questa procedura, il nodo secondario può tener conto delle trasmissioni degli altri nodi senza scambiare con questi nessuna informazione ed evitando così la necessità di avere a disposizione un canale di controllo comune.

Detto ciò, ogni nodo secondario stimerà il valore di C/I ricevuto da un generico ricevitore primario collocato nel punto di coordinate (r, ϕ) in questo modo:

$$\frac{C}{I}(r, \phi) = \frac{P_{utile}}{I_{generata} + I_{percepita}} \quad (3.15)$$

dove P_{utile} è la potenza utile al ricevitore primario, $I_{generata}$ è l'interferenza generata dal nodo secondario sul ricevitore primario in questione e $I_{percepita}$ è l'interferenza percepita dal nodo secondario prodotta dai suoi vicini. Si consideri come potenza utile al ricevitore primario il valore:

$$C = \frac{P_{TX}g^2}{r^\alpha} \quad (3.16)$$

dove P_{TX} è la potenza trasmessa dal trasmettitore primario, g^2 è una variabile esponenziale che introduce il fading alla Rayleigh, r è la distanza tra un generico ricevitore primario e il trasmettitore primario, collocato al centro dell'area di copertura del servizio televisivo, e infine α è il coefficiente di path loss.

Analogamente definiamo l'interferenza generata da un generico nodo secondario verso un altrettanto generico ricevitore primario:

$$I_{gen} = \frac{S_{TX}f^2}{r_s^\alpha} \quad (3.17)$$

dove S_{TX} è la potenza trasmessa dal nodo secondario, f^2 è una variabile esponenziale che introduce il fading alla Rayleigh, r_s è la distanza tra un generico ricevitore primario e il nodo secondario, e α è il coefficiente di path loss. Infine calcoliamo l'interferenza percepita dal nodo secondario come:

$$I_{percepita} = \gamma = \sum_{m=1}^M Interferenti = \sum_{m=1}^M \gamma_m = \sum_{m=1}^M \frac{S_{TX}f_m^2}{r_m^2} \quad (3.18)$$

dove f_m^2 è una variabile aleatoria che introduce il fading alla Rayleigh e r_m è la distanza tra due nodi secondari, anch'essa aleatoria in quanto si suppone che ogni nodo secondario non conosca la posizione degli altri nodi secondari della rete.

Si consideri per questo scopo un processo di Poisson puntuale (PPP) (vedi Appendice B per definizione) di intensità λ ; esso rappresenta la distribuzione nello spazio e nel tempo, dei nodi secondari. È importante sottolineare che il processo stocastico associato alle distanze (r_m) e il fading sono scorrelati in quanto tutti i nodi sono fermi e, per questo, i tempi di variabilità dei due processi sono differenti per diversi ordini di grandezza. Detto ciò l'interferenza percepita è vista come una somma di variabili aleatorie esponenziali, ciascuna di parametro p_m differente [29]:

$$p_m = \frac{1}{\frac{S_{RX}}{r_m^\alpha}} = \frac{r_m^\alpha}{S_{TX}} \quad (3.19)$$

I parametri p_m sono quindi a loro volta delle variabili aleatorie con funzione densità di probabilità pari a [30]:

$$f_{r_n}(r_n) = e^{-\lambda c_m r_n^m} \left(\frac{m(\lambda c_m r_n^m)^n}{r_n} \Gamma(n) \right) \quad (3.20)$$

dove $c_m = \pi$, $m = 2$ e $n, n = 1, \dots, N$ rappresenta l'indice corrispondente al grado di vicinanza tra i due nodi.

A questo punto sarebbe necessario calcolare la p.d.f. dell'interferenza percepita vista come funzione di due variabili aleatorie; il problema posto in questi termini risulta però troppo complesso e non conduce verso un'espressione analitica chiusa. Per questi motivi è stata introdotta una semplificazione, che consiste nel considerare una distanza r_m media, che possa, in un certo senso, costituire un caso generico di riferimento. Come distanza media si assume da questo punto in poi, il valore:

$$E[r_n^\alpha] = \left(\frac{1}{\lambda c_m} \right)^{\frac{\alpha}{m}} \frac{\Gamma(n + \frac{\alpha}{m})}{\Gamma(n)} \quad (3.21)$$

ricordando le notazioni della formula precedente e che λ rappresenta l'intensità del processo PPP che descrive la posizione spazio-temporale dei nodi.

Fissati questi punti, è possibile definire ora la distribuzione di probabilità dell'interferenza percepita e la sua cumulativa [31]:

$$p(\gamma) = \frac{p_m^M}{(M-1)!} \gamma^{M-1} e^{-p_m \gamma} \quad (3.22)$$

$$F[\gamma] = 1 - \frac{\Gamma(M, \gamma p_m)}{\Gamma(M)} \quad (3.23)$$

Una volta calcolata la distribuzione dell'interferenza percepita, viene il momento del calcolo di quella generata dal nodo secondario verso il primario in caso di trasmissione (vedi Formula 3.17). Analogamente a quanto detto prima, essa costituisce una variabile aleatoria esponenziale di parametro:

$$p_s = \frac{r_s^\alpha}{S_{TX} = \frac{(r^2 + D_{SP}^2 - 2rD_{SP} \cos(\psi))^{\frac{\alpha}{2}}}{S_{TX}}} \quad (3.24)$$

Per le definizioni delle variabili r, D_{SP} si faccia riferimento alla sezione precedente, mentre r_s costituisce la distanza tra il nodo secondario di riferimento e un generico ricevitore primario e ψ rappresenta l'angolo compreso tra r_s e D_{SP} . Perciò la p.d.f. dell'interferenza generata sarà [31]:

$$f_{I_{generata}}(I_{generata}) = p_s e^{-p_s I_{generata}} \quad (3.25)$$

È possibile ora calcolare la p.d.f. dell'interferenza complessiva, così come definita in Formula 3.14:

$$\begin{aligned}
f_{I_{tot}}(I_{tot}) &= \frac{d}{dI_{tot}} \int_0^\infty \int_0^{I_{tot}-I_{percepita}} f(I_{generata}) f(I_{percepita}) dI_{generata} dI_{percepita} = \\
&= \frac{d}{dI_{tot}} \int_0^\infty f(I_{percepita}) [F(I_{tot} - I_{percepita}) - F(0)]_{I_{generata}} dI_{percepita} = \\
&= \int_0^\infty f_{I_{percepita}}(I_{percepita}) f_{I_{generata}}(I_{tot} - I_{percepita}) dI_{percepita} = \\
&= \int_0^\infty \frac{p_m^M}{(M-1)!} I_{percepita}^{M-1} e^{-p_m I_{percepita}} p_s e^{-p_s(I_{tot}-I_{percepita})} dI_{percepita} = \\
&= \frac{p_m^M p_s}{(M-1)!} e^{-p_s I_{tot}} \int_0^\infty I_{percepita}^{M-1} e^{-(p_m-p_s)I_{percepita}} dI_{percepita} = \\
&= \frac{p_m^M p_s}{(M-1)!} e^{-p_s I_{tot}} (p_m - p_s)^{-M} (M-1)! = \\
&= \frac{p_m^M p_s}{(p_m - p_s)^M} e^{-p_s I_{tot}} \tag{3.26}
\end{aligned}$$

Affinchè tale espressione sia valida è necessario che $(p_m - p_s) > 0$; tale ipotesi impone che la distanza media tra due nodi secondari sia maggiore della distanza tra il nodo secondario e il nodo primario (vedi espressioni di p_m e p_s nelle Formule 3.19 e 3.24). Essa è verificata nella misura in cui le assunzioni in merito alla densità dei nodi e all'interferenza complessiva percepita (che stanno alla base del modello) sono valide.

Dalla Formula 3.26 si ottiene la distribuzione cumulativa dell'interferenza complessiva:

$$F_{I_{tot}}(I_{tot}) = \frac{p_m^M}{(p_m - p_s)^M} (1 - e^{-p_s I_{tot}}) \tag{3.27}$$

Dalle Formule 3.14, 3.15, 3.16 si ottiene che il rapporto segnale-interferente al generico ricevitore primario, distante r dal trasmettitore primario è pari a:

$$\frac{C}{I} = \frac{P_{TX} g^2}{r^\alpha I_{tot}} \tag{3.28}$$

Anche la potenza utile C è una variabile aleatoria esponenziale di parametro

$$p_{primario} = \frac{r^\alpha}{P_{TX}} \tag{3.29}$$

Si ottiene perciò la distribuzione cumulativa del rapporto segnale-interferente al ricevitore è:

$$\begin{aligned}
F_{\frac{C}{I}}\left(\frac{C}{I}\right) &= \int_0^\infty \int_0^{\frac{C}{I}I_{tot}} f_C(C) f_{I_{tot}}(I_{tot}) dC dI_{tot} = \\
&= \int_0^\infty f_{I_{tot}}(I_{tot}) [F_C(\frac{C}{I}I_{tot}) - F_C(0)] dI_{tot} = \\
&= \int_0^\infty f_{I_{tot}}(I_{tot}) [1 - e^{-p_{primario} \frac{C}{I} I_{tot}} - 0] dI_{tot} = \\
&= 1 - \int_0^\infty \frac{p_m^M p_s}{(p_m - p_s)^M} e^{-p_s I_{tot}} e^{-p_{primario} \frac{C}{I} I_{tot}} dI_{tot} = \\
&= 1 - \frac{p_m^M p_s}{(p_m - p_s)^M} \left(\frac{1}{p_s + p_{primario} \frac{C}{I}} \right) = \\
&= 1 - \frac{p_m^M p_s}{(p_m - p_s)^M (p_s + p_{primario} \frac{C}{I})} \tag{3.30}
\end{aligned}$$

Sostituendo alla precedente le Formule 3.19, 3.24 e 3.29 si ottiene:

$$\begin{aligned}
F_{\frac{C}{I}}\left(\frac{C}{I}\right) &= 1 - \frac{\left(\frac{E[r_m^\alpha]}{S_{TX}}\right)^M \frac{r_s^\alpha}{S_{TX}}}{\left(\frac{E[r_m^\alpha] - r_s^\alpha}{S_{TX}}\right)^M \left(\frac{r_s^\alpha}{S_{TX}} + \frac{r^\alpha}{P_{TX}} \frac{C}{I}\right)} = \\
&= 1 - \left(\frac{E[r_m^\alpha]}{E[r_m^\alpha] - r_s^\alpha}\right)^M \frac{1}{1 + \left(\frac{S_{TX}}{P_{TX}}\right) \left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha \frac{C}{I}} \tag{3.31}
\end{aligned}$$

A questo punto è possibile calcolare l'outage del sistema primario, secondo la Formula 3.4:

$$Outage = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R F_{\frac{C}{I}}\left(\frac{C}{I} |_{lim}\right) r dr d\phi}{\pi R^2} \tag{3.32}$$

Si può osservare come la formula precedente sia simile a quella individuata nel caso di singolo nodo secondario (Formula 3.12); la differenza fondamentale consiste in un fattore correttivo che tiene conto della distanza media tra i nodi secondari, del rapporto esistente tra questa e la distanza esistente tra il nodo secondario e il ricevitore primari, del numero di interferenti (M). Infatti all'aumentare della distanza media tra i nodi secondari ($E[r_m^\alpha]$), il fattore correttivo tende al valore 1, facendo ricadere questo caso in quello studiato nella sezione precedente. Questo fattore correttivo, inferiore a 1, va a peggiorare la probabilità di outage; tale peggioramento, tuttavia, è abbastanza indipendente dalla distanza media tra i due nodi,

quanto tale quantità compare sia a numeratore che a denominatore di tale fattore. Incide invece in misura maggiore la dimensione della distanza tra nodo secondario e ricevitore primario⁵, che, anche nel caso a singolo nodo secondario andava a peggiorare la probabilità di fuori servizio primaria.

3.2 Modello simulativo di instradamento in una rete secondaria con canale soggetto a shadowing log-normale

I problemi annessi alla disponibilità delle risorse radio per la trasmissione sono già state individuate e descritte nel primo capitolo di questo lavoro. Tra queste ricordiamo l'indisponibilità temporanea e per periodi di durata diversa delle risorse, con conseguente "mobilità dello spettro", che induce i nodi secondari a cambiare i canali di trasmissione con una variabilità che dipende non solo dall'interferenza mutua che essi generano gli uni verso gli altri, ma anche dall'interferenza che questi provocano sul sistema primario e quella che il sistema primario genera su di loro. Fino a questo momento abbiamo trattato il problema dal solo punto di vista delle dinamiche di accesso, ossia si è cercato di individuare un modello che permettesse ad un nodo cognitivo di stabilire con una buona approssimazione il livello di degrado introdotto da una propria trasmissione sulla qualità del sistema primario, guidando tale nodo a stabilire se una risorsa spettrale poteva considerarsi utilizzabile o meno.

In realtà questi aspetti influenzano anche la scelta del percorso che porta un pacchetto da una sorgente ad una destinazione all'interno di una rete multi-hop di tipo cognitivo. Infatti il numero di volte in cui si sarà costretti a cambiare canale durante il percorso, così come l'interferenza prodotta verso la rete secondaria e verso gli utenti primari sono parametri che possono portare a scelte diverse di percorso ottimale da una sorgente ad una destinazione secondarie.

Questo paragrafo è dedicato all'analisi, mediante simulazione, di una semplice metrica di routing che raccoglie al suo interno questi aspetti e proprio in base a questi stabilisce quale sia il percorso migliore da sorgente a destinazione all'interno di una rete secondaria cognitiva.

È stato considerato uno scenario con cinque trasmettitori primari televisivi in posizioni fisse all'interno di un'area quadrata di lato L , che utilizzano tre frequenze di trasmissione differenti in banda UHF, in particolare $f_1 = 470MHz$, $f_2 = 600MHz$, $f_3 = 700MHz$, distribuiti come illustrato in Figura 4.1:

L'area rettangolare rappresentata consiste nell'area in cui sono dislocati i nodi secondari che compongono la rete mesh cognitiva. Ogni nodo di questa

⁵ricordando che essa deve mantenersi comunque minore di $E[r_m^\alpha]$

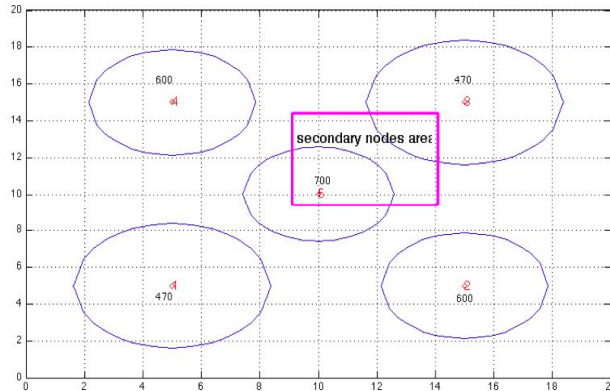


Fig. 3.5: Esempio di localizzazione dei 5 trasmettitori primari e della rete secondaria

rete deve poter dare un peso della qualità dei collegamenti che questo ha con tutti i suoi vicini; tale metrica deve avere perciò due obiettivi: il primo consiste nella protezione degli utenti primari dall'interferenza prodotta, il secondo, invece, nella qualità della trasmissione secondaria.

Al primo obiettivo è già stata data ampia risposta nei paragrafi precedenti; infatti esso consiste principalmente nella quantificazione dell'interferenza che una o più trasmissioni secondarie generano verso i ricevitori primari televisivi. Il secondo obiettivo, invece, consiste nella valutazione dell'outage sofferto dai nodi secondari, che, nel nostro modello, si basa principalmente sul rapporto segnale-interferente (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR), in cui l'interferenza è causata sia dai trasmettitori primari che dagli altri nodi secondari.

Una volta valutati sia l'outage primario complessivo, qui di seguito identificato come P_{out}^p , secondo il metodo geometrico descritto in precedenza, che la probabilità di fuori servizio del proprio collegamento, P_{out}^s , per ogni frequenza a disposizione, il nodo secondario è in grado di calcolare la propria metrica di routing, che nel modello assume questa forma:

$$Cost = \beta P_{out}^p + (1 - \beta) P_{out}^s P_{out}^s = \text{erfc}(\sqrt{SINR}) \quad (3.33)$$

Si tratta perciò di una combinazione lineare delle probabilità di outage primaria e secondaria, in cui i pesi associati a ciascun elemento dipendono da un unico parametro, β , con $0 < \beta < 1$.

Questa semplice metrica di routing può poi essere utilizzata in algoritmi di instradamento più o meno complessi; nel nostro caso, per semplicità di implementazione, è stato scelto un algoritmo di Dijkstra per la ricerca del

percorso migliore da sorgente a destinazione. Infine tale metrica è stata confrontata con una semplice metrica di hop count.

Come già anticipato nel paragrafo precedente, la scelta di questo modello di previsione di interferenza (e, conseguentemente, di valutazione delle probabilità di outage) consente al nodo di non necessitare di una canale di controllo comune attraverso cui scambiare le informazioni, in quanto ogni nodo elabora la propria metrica in modo autonomo.

L	20 Km
l	5 Km
Potenza di Tx secondaria	1 W
Potenza di Yx primaria	100 W
Numero di nodi secondari	30
Frequenze utilizzabili	470 MHz, 600MHz, 700 MHz
α	0.8
parametri di shadowing log-normale	$\mu = 0, \sigma = 1$

Tabella 3.1: Tabella dei parametri di simulazione

Le simulazioni sono state condotte attraverso script di MATLAB; in Tabella 3.1 vengono riportati i parametri di simulazione utilizzati. Ad ogni run di simulazione sono stati fatti variare, uno per volta, i valori di l , *Potenza di trasmissione primaria*, *Potenza di trasmissione secondaria*, *Numero di nodi secondari*, α . I risultati prodotti sono riportati nelle figure a seguire.

Le Figure 3.6 e 3.7 mostrano le due probabilità di outage, nel caso di instradamento con metrica cognitiva o con hop count, quando il parametro β varia tra 0 e 1; si osserva come l'outage dei nodi secondari cresca molto lentamente, mentre il fuori servizio del sistema primario decresce man mano che il peso β sbilancia la combinazione in favore della qualità dei primari. Per questo motivo si è deciso di fissare $\beta = 0.8$. Osservando tutti i risultati nel loro complesso si può concludere che in ogni caso l'uso di una metrica che tiene conto delle interferenze non solo abbatta sensibilmente la probabilità di fuori servizio del sistema primario, che rimane nella maggior parte dei casi al di sotto del 1%. Questo si spiega considerando che questa metrica permette di evitare quei percorsi che obbligano l'uso di frequenze che nelle aree limitrofe sono utilizzate con maggiore intensità dal sistema primario, procurando beneficio sia agli utenti primari che a quelli secondari. Tale aspetto è ben visibile nella rappresentazione in Figura 3.13, dove è riportato un esempio di percorso ottenuto utilizzando la metrica cognitiva e l'hop count.

Si può osservare come la destinazione sia raggiungibile con un solo hop, ma la metrica cognitiva spinge ad utilizzare tre salti, due a frequenza 700 MHz e uno a frequenza 470 MHz, per aggirare la finta di interferenza che avrebbe innalzato le probabilità di outage. Abbiamo poi investigato l'in-

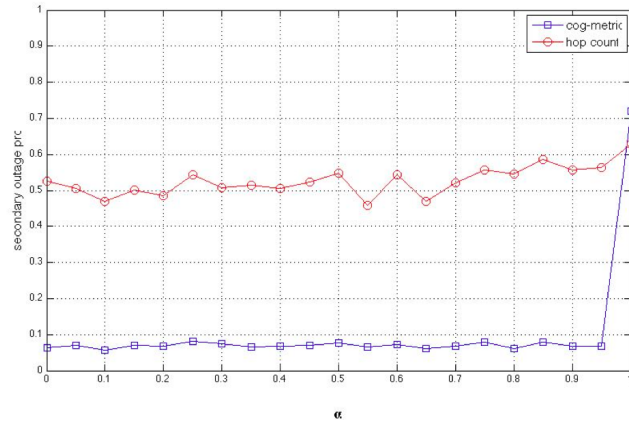


Fig. 3.6: Probabilità di outage del sistema secondario versus β

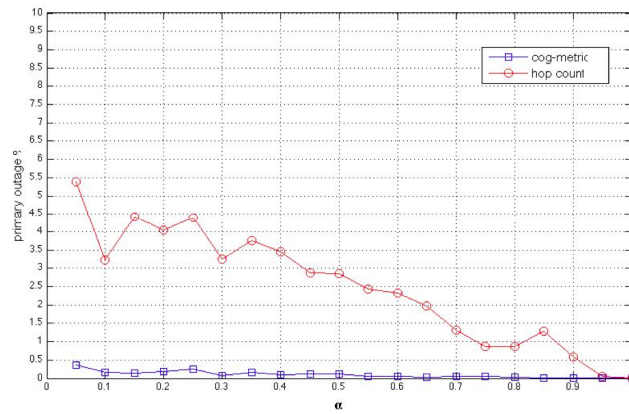


Fig. 3.7: Probabilità di outage del sistema primario versus β

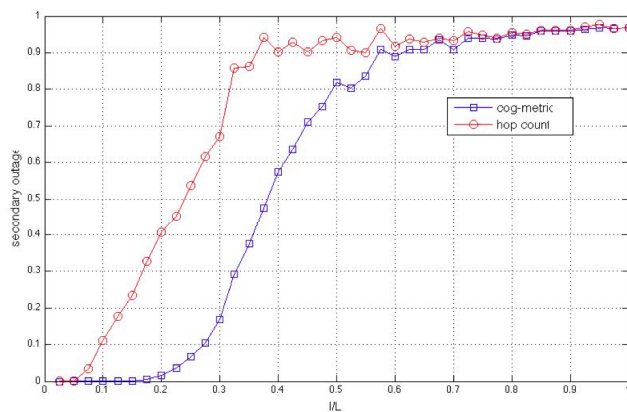


Fig. 3.8: Probabilità di outage del sistema secondario versus rapporto tra le dimensioni $\frac{l}{L}$

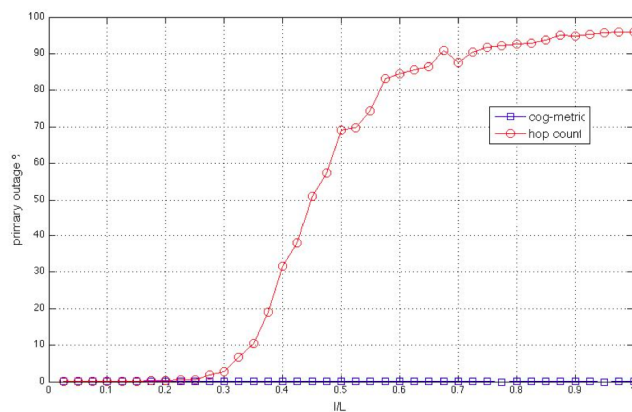


Fig. 3.9: Probabilità di outage del sistema primario versus rapporto tra le dimensioni $\frac{l}{L}$

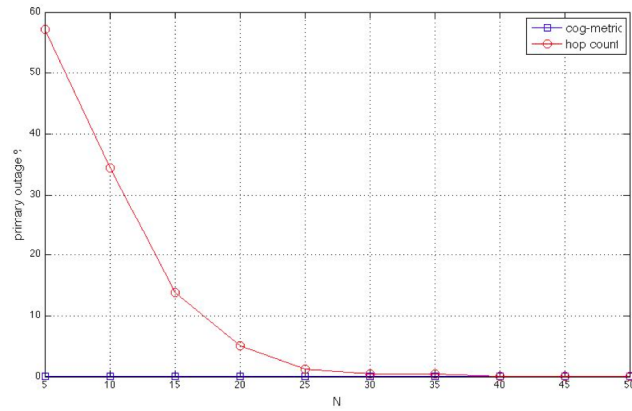


Fig. 3.10: Probabilità di outage del sistema secondario versus N

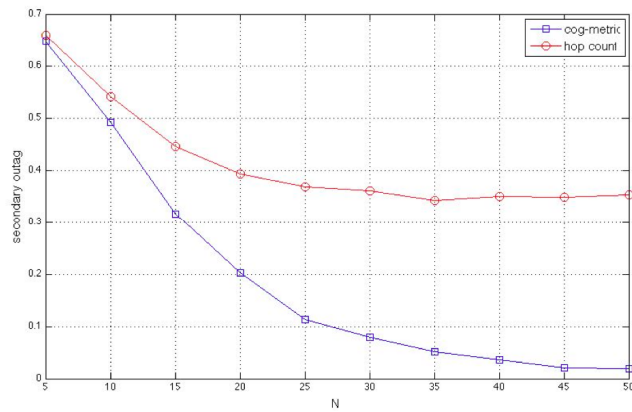


Fig. 3.11: Probabilità di outage del sistema primario versus N

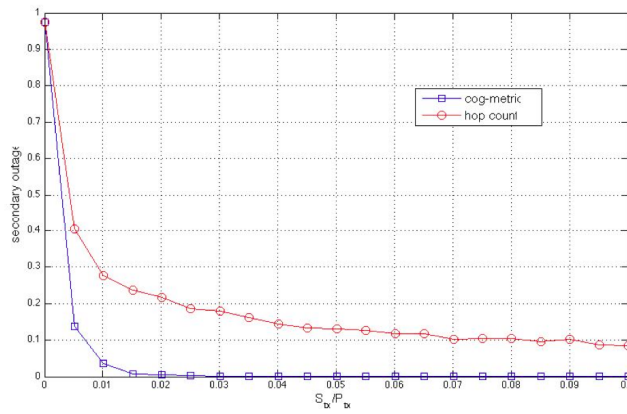


Fig. 3.12: Probabilità di outage del sistema secondario versus rapporto tra le potenze $\frac{S_{TX}}{P_{TX}}$

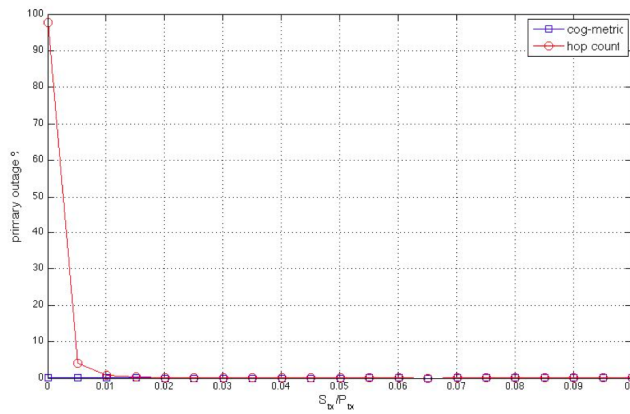


Fig. 3.13: Probabilità di outage del sistema primario versus rapporto tra le potenze $\frac{P_{TX}}{S_{TX}}$

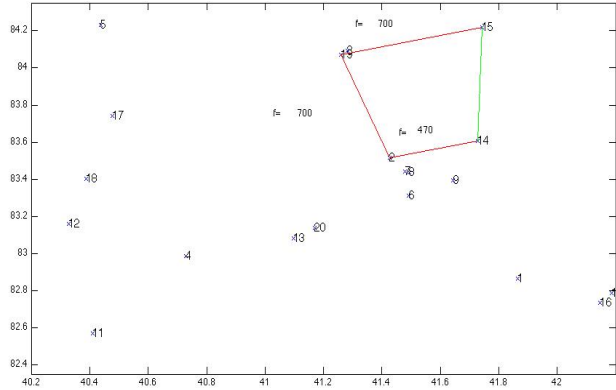


Fig. 3.14: Percorsi a confronto: scelta con metrica cognitiva e hop count

fluenza del rapporto $\frac{l}{L}$, ossia del rapporto tra le dimensioni dell'area primaria e l'area in cui è distribuita la rete secondaria; tale rapporto varia tra 0 e 1. Le Figure 3.8 e 3.9 mostrano come, con l'uso della metrica cognitiva, l'outage primario non cambi al variare del rapporto tra le dimensioni e rimanga sempre prossimo allo zero, a differenza dell'outage dei nodi secondari che cresce all'aumentare di tale rapporto. Questo avviene in quanto il numero di nodi secondari viene distribuito su di una superficie via via maggiore, rendendo i collegamenti tra i nodi di qualità via via sempre più bassa. Anche in questo secondo caso la metrica cognitiva consente comunque di abbassare l'outage secondario; infatti, a parità di outage (in particolare $P_{out}^s = 10^{-2}$), la metrica cognitiva consente di raddoppiare la superficie su cui è possibile distribuire i nodi secondari, potendo così sfruttare meglio le potenzialità di propagazione delle frequenze UHF e aumentare così la copertura offerta.

Lo step successivo è consistito nell'analizzare l'influenza del numero di nodi secondari sulle performance globali. La Figure 3.11 dimostra che, con l'uso della metrica cognitiva, il fuori servizio primario rimane praticamente costante anche se il numero di nodi secondari, e quindi di potenziali interferenti, aumenta; questo fatto è molto importante nell'ottica di miglioramento delle prestazioni della rete secondaria, in quanto consente di aumentare la densità di nodi cognitivi, senza danneggiare il sistema primario; la Figura 3.10 mostra infatti come la P_{out}^s diminuisca all'aumentare di N . Tutto ciò si spiega facendo due diverse considerazioni: quando il numero di nodi secondari è ridotto, non è sempre possibile stabilire una connessione tra i vicini, riducendo così drasticamente il traffico della rete secondaria; conseguentemente la probabilità di outage dei primari è prossima allo 0. Quando però il numero di nodi secondari aumenta, aumenta anche il numero di possibili percorsi che un pacchetto può seguire per raggiungere la destinazione; per

questo aumenta anche la probabilità di trovare un “buon”percorso, cosa che consente di mantenere a livelli molto bassi l’outage del sistema primario.

Infine è stata analizzata l’influenza del rapporto tra potenze di trasmissione primaria e secondaria. In questo caso viene fatta variare la potenza di trasmissione dei nodi cognitivi, in un range che rimane comunque tra i 10 e i 30 dB al di sotto della potenza di trasmissione primaria. La probabilità di fuori servizio primaria rimane sempre a ridosso di valori prossimi allo 0

Tutti questi risultati dimostrano perciò come un approccio come quello descritto in questo capitolo possa consentire l’uso di un paradigma cognitivo, specialmente se applicato a reti multi salto in cui le potenze in gioco sono ridotte, a patto però di utilizzare metriche che consentano da un lato di non alterare sensibilmente la qualità del servizio primario e dall’altro di permettere le trasmissioni tra i nodi secondari, che altrimenti verrebbero penalizzati.

Capitolo 4

White-Fi: l'uso delle frequenze UHF per comunicazioni bidirezionali in ambiente alpino

4.1 Premessa

CSP, in collaborazione con Politecnico di Torino, ha avviato nell'autunno del 2010 una sperimentazione, alla quale ho partecipato attivamente, per analizzare in campo il comportamento delle frequenze televisive per la realizzazione di sistemi di telecomunicazioni bidirezionali, sfruttando una tecnologia di comunicazione simile a quella dei sistemi WiFi tradizionali; da qui il nome *White-Fi*. Il primo obiettivo della sperimentazione è stato quello di analizzare la copertura ottenuta con i sistemi che operano nelle frequenze televisive e confrontarla con quella che si può ottenere (in condizioni analoghe) con i sistemi che operano nella banda ISM dei 5GHz (ad esempio HyperLAN e sistemi proprietari). Inoltre, nell'ambito della sperimentazione è stato attivato anche un utente sperimentale al fine di verificare la stabilità del sistema nel tempo. L'area scelta per i test si colloca nelle Valli di Lanzo, situate a Nord di Torino, ed in particolare nell'area di Usseglio (Valle di Viù), come indicato nelle Figure 4.1 e 4.2. Questa sperimentazione [32] è stata possibile grazie al benestare del Ministero dello Sviluppo Economico e grazie, soprattutto, a Rete Capri, emittente nazionale che ha lasciato libera, in questa valle alpina, la propria frequenza (762 MHz) per scopi scientifici e sperimentali.

4.2 Test in laboratorio

Prima di spostare portare la sperimentazione su campo, sono stati realizzati dei test in laboratorio per stabilire le prestazioni massime del sistema e per cercare di caratterizzare, seppur in modo abbastanza grossolano, gli effetti di una trasmissione secondaria su di una primaria. Per realizzare tutto ciò è stato generato un flusso UDP tra due nodi White-Fi; durante l'esperimento è stato fatta variare la lunghezza del pacchetto (da 64 a 1450 byte) e l'ampiezza del canale (5,10,20 MHz), ottenendo i risultati riportati in Figura 4.1:

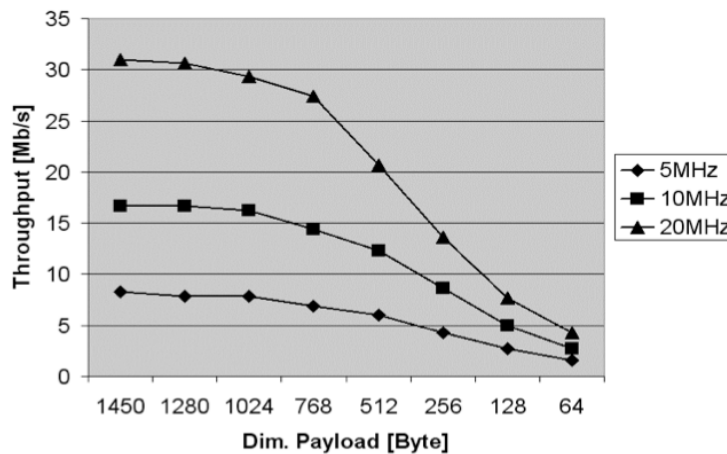


Fig. 4.1: Throughput massimo al variare della dimensione del pacchetto e della larghezza di canale

Come si può osservare, anche con una larghezza di banda limitata, 5 MHz¹, le prestazioni massime ottenibili in termini di throughput sono abbastanza elevate e conformi con quelle ottenute con canalizzazioni maggiori. Ciò significa che l'utilizzo di un protocollo WiFi non impatta significativamente sull'efficienza nell'uso della banda.

4.3 La campagna di misure

Il traliccio su cui è collocato il trasmettitore primario è situato a Pian Benot e copre la valle sottostante, in cui si trova il paese di Usseglio (TO) (vedi Figura 4.2).

L'antenna ricevente è stata collocata sul tetto di un'auto in modo da valutare la copertura e le prestazioni del sistema sia in condizioni statiche che in mobilità. Nella stessa area è tuttora presente un sistema HyperLAN in banda ISM a 5 GHz, precedentemente installato; i risultati ottenuti con

¹l'unica completamente contenuta in un canale televisivo di 8 MHz



Fig. 4.2: Vista del traliccio





Fig. 4.4: Antenna ricevente a 763 MHz



Fig. 4.5: Disposizione sul tetto dell'auto

il sistema White-Fi sono stati confrontati con quelli ottenibili con questo sistema.

La Tabella 4.1 riporta i parametri di configurazione degli apparati:

	White-Fi	IEEE802.11h
canalizzazione e frequenza	5 MHz @ 763 MHz	20MHz @ 5.5GHz
Potenza di Tx	18 dBm	22 dBm
Tx antenna	70° span, 9 dBi	150° span, 8 dBi
Rx antenna	Omnidir., 6 dBi	Omnidir. 5 dBi

Tabella 4.1: Tabella di configurazione dei parametri

Il primo obiettivo della campagna di misura è stato la valutazione del *Received Signal Strength Indicator*, *RSSI* per entrambi i sistemi. I test sono stati condotti seguendo la strada che attraversava la valle, guidando per circa 3.5 Km, mentre in linea d'aria la distanza tra traliccio e antenna ricevente era compresa tra 1 e 1.5 Km. Sono state raccolte misure sia in posizioni fisse che muovendosi lungo il percorso, con una velocità compresa tra i 20 e i 40 Km/h. Le Figure 4.6 e 4.7 riportano una mappa delle coperture, rispettivamente, a 763 MHz e a 5 GHz.

In entrambi i casi la copertura della prima parte della strada è peggiore che nella seconda parte, ma a 5.5 GHz i valori di RSSI risultano essere veramente molto bassi e tali da non consentire una connessione stabile nei primi



Fig. 4.6: Copertura lungo il percorso a con il sistema White-Fi



Fig. 4.7: Copertura lungo il percorso a con il sistema HyperLAN





Fig. 4.9: Throughput raggiunto dal sistema HyperLAN

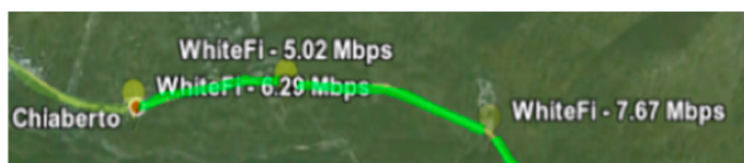


Fig. 4.10: Throughput raggiunto dal sistema White-Fi

1000-1500m. Questi valori bassi trovano spiegazione nella presenza di ostacoli, principalmente case, che bloccano il segnale proveniente dal traliccio. Complessivamente la copertura del sistema White-Fi risulta migliore rispetto a quella ottenuta con il sistema HyperLAN. Le figure 4.8 e 4.9 riportano alcuni segmenti del percorso con relativi throughput raggiunti; nonostante la ridotta larghezza di canale (5 MHz), il sistema White-Fi dimostra di raggiungere valori prossimi o addirittura superiori a quelli ottenuti nei medesimi punti con il sistema HyperLAN, che ha invece una larghezza di banda pari a 20 MHz.

Per valutare le performance dei due sistemi è stato generato un flusso UDP monodirezionale, prima in downlink (dalla stazione sul traliccio verso l'auto), poi in uplink (viceversa), utilizzando un generatore di traffico Iperf con pacchetti da 1450 Byte. La prima serie di test è stata condotta impostando una velocità del flusso di 2 Mbps, ottenendo i risultati riportati nelle Figure 4.11 e 4.12.

I valori di throughput ottenuti hanno confermato le performance che ci si attendeva dopo aver visto i risultati di copertura: a 5.5 GHz, il canale di comunicazione è disponibile solo nella seconda parte del percorso ed è più instabile rispetto al sistema WhiteFi, anche se per quest'ultimo ci sono alcuni ostacoli ostruenti lungo i primi 1000m di percorso. In particolare i problemi di connessione sono più evidenti nella direzione di uplink (vedi Figura 4.10); questo è dovuto alla presenza di interferenti percepiti solo dalla Access Point sul traliccio, a causa della sua posizione sopraelevata rispetto all'antenna ricevente.

Il successivo gruppo di misure ha avuto l'obiettivo di valutare le pre-

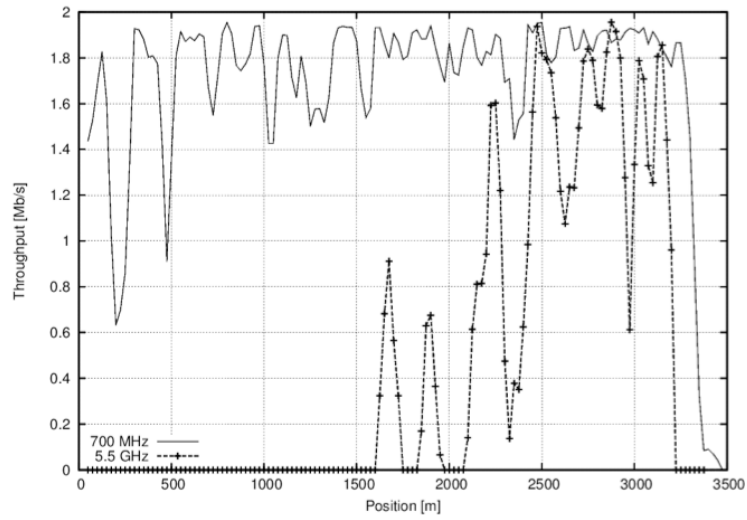


Fig. 4.11: Throughput ottenuto in downlink con flusso UDP a 2 Mbps

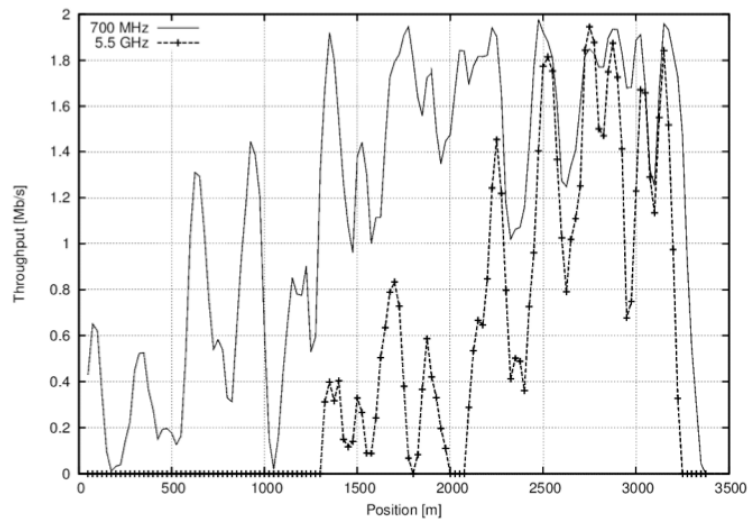


Fig. 4.12: Throughput ottenuto in uplink con flusso UDP a 2 Mbps

stazioni del sistema White-Fi con data rate più alte; la Figura 4.13 mostra lo throughput ottenuto con un flusso UDP a 6 Mbps. Si osserva come il sistema White-Fi permetta di raggiungere la massima rate in diversi punti di ottimalità; infine, ad eccezione dei primi 1500m maggiormente ostacolati, nella restante parte del percorso la rate ottenuta si mantiene sempre al di sopra dei 2 Mbps, che rappresentano il limite per il Digital Divide. L'elevata variabilità dei risultati è dovuta al fatto che le misure qui riportate sono state realizzate in condizioni di mobilità, con velocità che hanno raggiunto anche i 40 Km/h.

Visti gli ottimi risultati ottenuti in termini di copertura, l'attività di ricerca si è estesa ad analizzare altri aspetti dell'utilizzo dei white space in contesti reali, tra i quali:

- Integrazione della funzione di spectrum sensing al sistema
- utilizzo ottimale del canale radio, cercando di sfruttare interamente gli 8 MHz di larghezza del canale DVB-T e incrementare, in questo modo, le prestazioni
- gestione dinamica dell'allocazione dello spettro, che potrebbe consentire di aggregare più canali televisivi, così come di suddividere lo stesso canale tra più interfacce radio, al fine di ottenere la copertura di aree caratterizzate da un'orografia complessa

Per raggiungere tali obiettivi si intende realizzare un sistema basato sul paradigma *Software Defined Radio*, *SDR*, al fine di integrare in un unico apparato di rete sia le funzioni di analisi spettrale che la possibilità di modificare in tempo reale i parametri delle interfacce radio, senza dover sottostare alle limitazioni dei chipset radio comunemente utilizzati.

Capitolo 5

Conclusioni

Questo lavoro ha descritto i passi seguiti in questi anni di dottorato per dare risposta ad un quesito molto importante e tuttora non del tutto risolto, riguardante l'applicazione del paradigma Cognitive Radio alle frequenze UHF televisive per garantire accesso a banda larga alle zone in Digital Divide.

Il primo capitolo ha costituito una carrellata dello stato dell'arte, con descrizioni delle architetture, degli algoritmi di sensing, dei metodi di previsione delle interferenze; il secondo capitolo ha riportato ciò che oggi prevede lo standard IEEE 802.22, che nasce proprio dall'esigenza di porre dei punti fermi per quella che ormai sembra essere l'evoluzione delle tecnologie wireless verso la flessibilità nell'uso dello spettro.

Tuttavia ancora molto rimane da fare; nonostante le tante linee guida indicate da diversi organismi in tutto il mondo, ancora non è stata data una risposta definitiva al problema della previsione dell'interferenza che una eventuale rete secondaria può produrre verso una rete primaria. Per questo motivo buona parte di questo lavoro è stata dedicata alla formulazione di un modello teorico/simulativo di previsione dell'interferenza. Tale modello ha prodotto risultati, la cui validità è stata confermata dalle simulazioni realizzate e ha permesso di ottenere una formulazione chiusa del calcolo dell'interferenza generata da un sistema secondario verso una rete primaria di tipo televisivo. I vantaggi che questo modello può portare rispetto ai modelli proposti in bibliografia fino ad oggi, come, ad esempio, quello della temperatura di interferenza, sono diversi:

- il modello è assolutamente adattato alle condizioni dello scenario in cui si trova il nodo e non si limita ad un semplice calcolo di un fattore di interferenza; esso infatti prende in considerazione le relazioni di posizione tra i nodi secondari e tra questi e i nodi primari, ed inoltre tiene ben presente quale sia l'attività e il profilo del traffico dei nodi sia secondari che primari
- tale modello, permette al nodo cognitivo di stimare l'interferenza prodotta in modo del tutto autonomo, senza la necessità di scambiare con

i propri vicini alcuna informazione ed eliminando così il problema del canale di controllo comune, che molto spesso affligge reti come queste, che mostrano una certa *mobilità dello spettro*.

Infine è stato mostrato come i risultati ottenuti potessero essere utilizzati, secondo un paradigma *cross-layer*, anche per realizzare altri modelli e altre funzioni, che non fossero necessariamente di strato MAC. A questo scopo sono stati riportati i risultati ottenuti inserendo l'output del modello di previsione di interferenza in una semplice metrica di routing.

L'ultimo aspetto di indagine qui riportato, ma non per questo meno importante, ha riguardato l'applicazione reale e su campo di sistemi tradizionali, come il WiFi, utilizzati però secondo il paradigma cognitivo. La sperimentazione condotta con CSP e il Politecnico di Torino ha dimostrato come sia possibile e performante utilizzare sistemi in banda UHF bidirezionali per realizzare servizi di copertura che consentirebbero l'accesso alla banda larga anche a quelle zone remote e poco densamente popolate che non sono raggiunte dai veicoli canonici, come ADSL e fibra ottica.

Molto ancora resta da fare per caratterizzare completamente un sistema cognitivo: dalla definizione delle funzioni di sensing, alla combinazione di queste con i modelli di previsione di interferenza e i *geolocation database*; gli obiettivi futuri del lavoro, infatti, prevedono di estendere lo studio alle funzioni di routing per reti cognitive, che tengano in considerazione tutti gli aspetti peculiari di queste strutture, come la variabilità dei canali, la qualità del servizio degli utenti primari e secondari, la necessità di gestire informazioni locali comuni ai nodi vicini etc.

Un'altro aspetto di indagine molto importante riguarda lo studio delle *Software Defined Radio*, che applicate al paradigma cognitivo possono incrementarne le prestazioni e migliorare, al tempo stesso, l'efficienza nell'uso dello spettro. È previsto in un futuro prossimo, l'inserimento di SDR nella struttura di test della sperimentazione sul White-Fi, così come l'implementazione di funzioni di sensing associate a modelli di previsione di interferenza e database, che renderebbero tale sistema a tutti gli effetti un sistema Cognitivo di grande interesse per applicazioni di forte impatto sociale e culturale.

Appendice A

Stima della distanza in reti wireless con canale affetto da fading alla Rayleigh

In questa appendice viene riassunto lo studio che ha portato alla formulazione di uno stimatore della distanza tra due nodi basato sul rapporto segnale-rumore (SNR) che questi ricevono l'uno dall'altro. Tale studio si inserisce in un lavoro più ampio di stima dei parametri di routing di una rete ad-hoc il cui canale è affetto da fading alla Rayleigh [13].

La necessità di stimare la distanza spaziale reale di un nodo da uno qualunque dei suoi vicini può nascere per diverse ragioni; ad esempio può presentarsi nel calcolo di una metrica di routing, oppure come descritto nel Capitolo 1 di questo lavoro, nasce dalla necessità di posizionare nello spazio gli utenti primari in un paradigma di tipo *Cognitive Radio*. La stima della reale distanza tra due nodi può essere anche ricondotta alla epurazione dal valore di SNR percepito da un nodo di tutti quei fattori aleatori, quali le fluttuazioni dovute a fading e shadowing, che possono temporaneamente affliggere il segnale; la conoscenza della reale distanza tra due nodi può consentire di determinare quale parte del valore misurato di SNR è dovuta all'aleatorietà del canale di trasmissione.

Per questi motivi è stato individuato uno stimatore analitico che consente di estrarre dal valore di SNR la reale distanza tra due nodi, permettendo così di migliorare la costruzione della topologia della rete da parte di un nodo, qualora essa sia sconosciuta.

Assunzioni:

- ogni nodo genera una copertura circolare di raggio R , all'interno della quale i nodi vicini sono distribuiti uniformemente;
- ogni nodo *NON* conosce la posizione dei suoi vicini;

- il canale radio è caratterizzato da rumore additivo gaussiano bianco (AWGN) ed è affetto da fading alla Rayleigh. Se B è la banda, A è una costante che include la potenza di trasmissione, i parametri di antenna, gli effetti medi dello shadowing e il rumore, ρ è la distanza tra trasmettitore e ricevitore, α è il coefficiente di path loss e r è una variabile aleatoria di Rayleigh, il rapporto segnale-rumore al ricevitore sarà:

$$SNR = A\rho^{-\alpha}r^2 \quad (\text{A.1})$$

- il sistema non è limitato dall'interferenza in quanto si suppone che il meccanismo di accesso al canale utilizzi tecniche di *interference-avoidance*.

Si definisce inoltre una *distanza equivalente*, ρ_{eq} :

$$\rho_{eq} = \rho r^{-\frac{2}{\alpha}} = \rho g \quad (\text{A.2})$$

tale per cui

$$SNR = A\rho_{eq}^{-\alpha} \quad (\text{A.3})$$

dove ρ_{eq} costituisce una variabile aleatoria che tiene in considerazione sia gli aspetti di incertezza legati alla topologia sconosciuta della rete che l'aleatorietà dovuta al fading alla Rayleigh.

L'obiettivo dello stimatore sopra citato è quello di separare i due aspetti legati a ρ e a g , in modo tale da eliminare il contributo dovuto al fading e "isolare" la vera distanza tra i due nodi, ρ . Il primo passo da compiere consiste nella derivazione della funzione *densità di probabilità* della distanza equivalente, ρ_{eq} , partendo dalle funzioni *densità di probabilità* (p.d.f.) della distanza "reale", ρ , e di g .

La distanza di un nodo dal suo vicino è descritta dalla seguente p.d.f.:

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{2\pi\rho}{Area} = \frac{2\rho}{R^2} \quad (\text{A.4})$$

Come descritto in [26], la p.d.f. di g è data da:

$$f_g(g) = \frac{\alpha}{2}g^{-(\alpha+1)}e^{-\frac{1}{2}g^{-\alpha}} \quad (\text{A.5})$$

In riferimento ad (A.2) e procedendo come descritto in [26] si ottiene che:

$$\begin{aligned}
f_{\rho_{eq}}(\rho_{eq}) &= \frac{\partial[F(\rho_{eq})]}{\partial\rho_{eq}} = \frac{\partial}{\partial\rho_{eq}} \int_0^R \int_0^{\frac{\rho_{eq}}{\rho}} f_{\rho}(\rho) f_g(g) dg d\rho = \\
&= \int_0^R f_{\rho}(\rho) \frac{1}{\rho} f_g\left(\frac{\rho_{eq}}{\rho}\right) d\rho = \int_0^R \psi(\rho, \rho_{eq}) d\rho
\end{aligned} \tag{A.6}$$

È perciò possibile definire una massa di probabilità per ogni valore ρ , quando ρ_{eq} è fissato (ad esempio viene estratto dal valore di SNR misurato dal nodo). Tale massa è rappresentata da:

$$\begin{aligned}
\bar{\phi}(\rho, \rho_{eq}) &= \frac{\phi(\rho, \rho_{eq})}{\int_0^R \psi(\rho, \rho_{eq}) d\rho} = \\
&= 2^{-\frac{2+\alpha}{\alpha}} \frac{\rho}{\rho_{eq}} \left(\frac{\frac{\rho^{\alpha+1}}{\rho_{eq}} e^{-\frac{1}{2} \frac{\rho^{\alpha}}{\rho_{eq}}}}{\Gamma\left(\frac{2+\alpha}{\alpha}\right) - \Gamma\left(\frac{2+\alpha}{\alpha}, \frac{1}{2} \frac{R^{\alpha}}{\rho_{eq}}\right)} \right)
\end{aligned} \tag{A.7}$$

Questa funzione dipende solo da ρ , ossia dalla distanza reale tra trasmettitore e ricevitore, una volta che ρ_{eq} è stato fissato. A questo punto è possibile ottenere uno stimatore a partire dalla massa di probabilità associata alla distanza ρ . Le scelte possibili sono diverse; in questo caso è stato scelto il valore di ρ , $\bar{\rho}$, che minimizza l'errore relativo medio, ossia quello tale per cui:

$$\frac{\partial}{\partial\bar{\rho}} \int_0^R \frac{(\bar{\rho} - \rho)^2}{\rho} \bar{\psi}(\rho, \rho_{eq}) d\rho = 0 \tag{A.8}$$

Si ottiene perciò che la distanza stimata tra trasmettitore e ricevitore, depurata dagli effetti del fading alla Rayleigh, è:

$$\bar{\rho} = \frac{\int_0^R \bar{\psi}(\rho, \rho_{eq}) d\rho}{\int_0^R \frac{1}{\rho^2} \bar{\psi}(\rho, \rho_{eq}) d\rho} \tag{A.9}$$

Si può procedere analogamente partendo dalla funzione densità di probabilità $\bar{\psi}(g_{eq})$, definita allo stesso modo che $\psi(\bar{\rho}_{eq})$, ma riferita alla variabile g , associata alla statistica di Rayleigh.

In questo caso si otterrebbe:

$$\bar{\rho} = \rho_{eq} \frac{\mu_g}{S_g^2} \tag{A.10}$$

dove

$$\mu_g = \int_{\frac{\rho_{eq}}{R}}^{\infty} g \bar{\psi}(g) dg \quad (\text{A.11})$$

e

$$S_g^2 = \int_{\frac{\rho_{eq}}{R}}^{\infty} g^2 \bar{\psi}(g) dg \quad (\text{A.12})$$

Per poter dimostrare la validità dell’approccio sono state realizzate delle simulazioni attraverso MatLAB [33] e l’output ottenuto è stato confrontato con il risultato fornito dallo stimatore. Lo scenario prevedeva l’estrazione del rapporto segnale-rumore da un messaggio di *HELLO*; a partire da questo il nodo ricevitore poteva calcolare il valore di ρ_{eq} , che in assenza di alcuna stima, veniva assunto come il valore della distanza tra esso e il nodo trasmettitore. Sulla base della distanza veniva poi calcolata una metrica per la scelta del *next hop* (*Expected Transmission Time*) [34], [35].

Le figure A.1, A.2 e A.3 mostrano la percentuale di corretta decisione della scelta del *next hop* con e senza l’ausilio dello stimatore.

Si nota immediatamente come la presenza dello stimatore (linea rossa) consenta di aumentare il numero di volte in cui la scelta compiuta per il *next hop* era effettivamente quella corretta dal punto di vista topologico. Tale miglioramento cresce con il diminuire del coefficiente di *path loss*; questo accade in quanto man mano che esso aumenta, aumenta anche il filtraggio spaziale operato sul fading, che incide sempre meno sulla variabilità di ρ_{eq} . Quando invece il filtraggio spaziale è blando, ossia quando le condizioni del canale sono buone dal punto di vista del *path loss*, l’effetto del fading è più forte e va incidere con una percentuale maggiore sulla randomicità della distanza.

Lo stimatore scelto aiuta quindi a “costruire” una *mappa topologica* della rete maggiormente veritiera, consentendo al nodo di epurare dal valore della distanza tra esso e i nodi vicini gli aspetti legati al fading. Questo permette al nodo di utilizzare al meglio il canale a disposizione, specialmente quando ha caratteristiche di propagazione simili a quelle di spazio libero, che altrimenti verrebbero, in un certo senso, “sottovalutate” per effetto della presenza del fading alla Rayleigh.

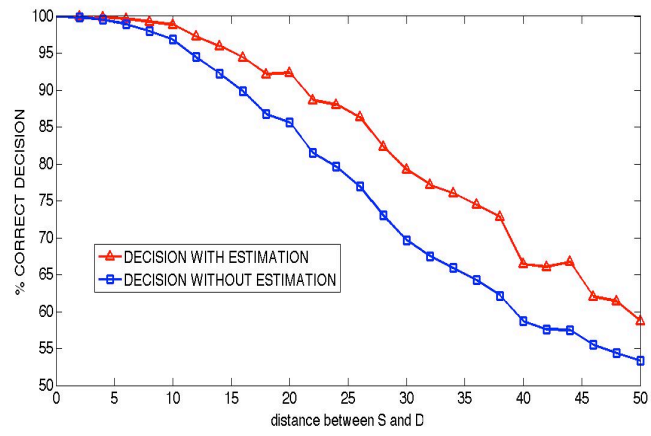


Fig. A.1: Percentuale di corretta decisione con $\alpha = 2$

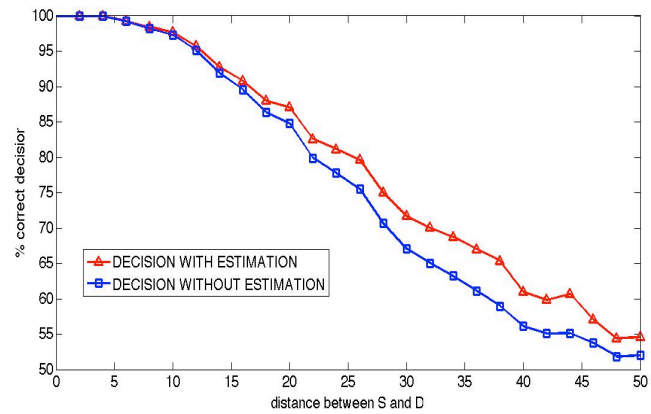


Fig. A.2: Percentuale di corretta decisione con $\alpha = 3$

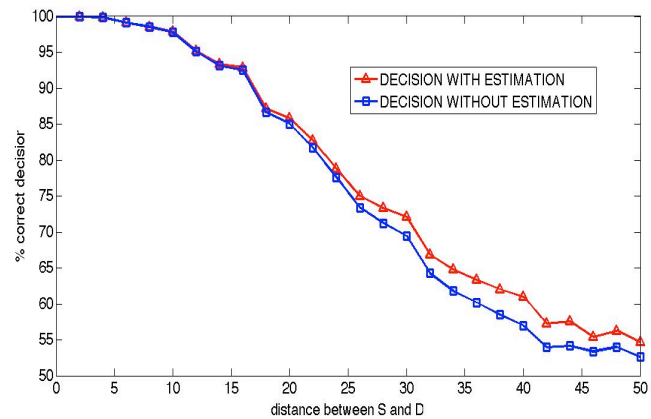


Fig. A.3: Percentuale di corretta decisione con $\alpha = 4$

Appendice B

Processi di Poisson e loro proprietà

Esistono in natura alcuni fenomeni in cui dei punti isolati sono distribuiti in maniera casuale in uno spazio continuo. Un caso molto importante è quello in cui consideriamo come spazio continuo l'insieme dei numeri reali associato all'evolvere del tempo: i punti isolati di questo spazio possono rappresentare gli istanti in cui si verificano determinati fatti, che vengono comunemente denominati *eventi*.

Tra i fenomeni che possono essere rappresentati in tal modo ci sono ad esempio:

- l'arrivo delle chiamate telefoniche in una centrale di commutazione;
- l'emissione degli elettroni da parte di un emettitore incandescente in una valvola termoionica;
- l'arrivo dei fotoni provenienti da una sorgente luminosa su di un dispositivo fotorivelatore;
- ecc..

Il modello probabilistico più adatto a descrivere questo tipo di fenomeni è quello dei *processi puntuali*. Lo spazio di riferimento considerato è costituito dall'insieme dei numeri reali, che identifica l'asse dei tempi. In questo caso, ogni realizzazione di un processo puntuale è costituita da un insieme di punti dell'asse reale, detti *istanti di arrivo*. In particolare considereremo il caso in cui ogni realizzazione è costituita da un numero finito di punti, o al massimo da una infinità numerabile di punti che indicheremo con t_1, t_2, t_3, \dots , come mostrato in Figura B.1a.

Ogni realizzazione di un processo puntuale può essere rappresentata in modo conveniente associando ad ogni istante di arrivo l'impulso di area unitaria centrato proprio nell'istante stesso, come mostrato in Figura B.1b.

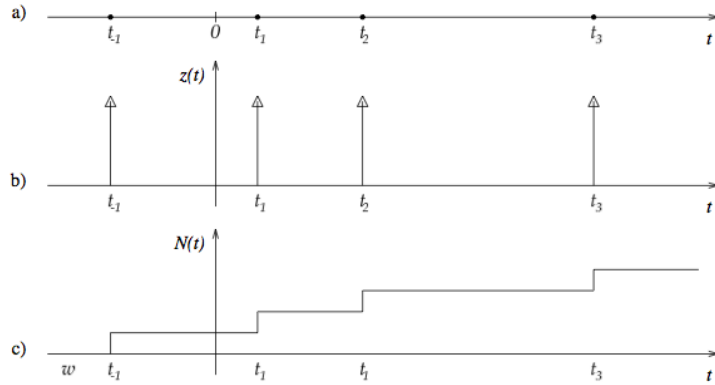


Fig. B.1: a) Realizzazione di un processo puntuale; b) realizzazione di un processo puntuale associato; c) realizzazione del processo contatore associato

Questa operazione consente di studiare il processo puntuale mediante il processo definito come:

$$z(t) = \sum_i \delta(t - t_i) \quad (\text{B.1})$$

Quello che spesso interessa studiare dei processi puntuali è legato al numero di istanti di arrivo che si verificano in un sottoinsieme dell'asse reale dei tempi, che solitamente è costituito da un intervallo. Dalla (B.1) risulta immediatamente che il numero di arrivi che si verificano nel sottoinsieme dell'asse reale risulta:

$$N(A) = \int_A z(u) du \quad (\text{B.2})$$

D'altra parte i sottoinsiemi di maggior interesse sono gli intervalli, e più precisamente gli intervalli aperti a sinistra e chiusi a destra, cioè del tipo $(s, s + h]$, con $h > 0$. Allora il numero di arrivi in tale intervallo risulta

$$N(s, s + h] = \int_s^{s+h} z(u) du \quad (\text{B.3})$$

Si noti che nel calcolo dell'integrale gli eventuali impulsi centrati nell'istante s non vanno considerati, mentre vanno considerati quelli centrati nell'istante $s + h$. Un processo aleatorio si dice di tipo puntuale se ogni sua realizzazione è costituita da un insieme finito o numerabile di arrivi $\{t_1, t_2, \dots\}$ tale che, per ogni numero intero positivo M e per ogni M -pla di intervalli $(s_1, s_1 + h_1], \dots, (s_M, s_M + h_M]$, i corrispondenti numeri di arrivi

$$N(s_1, s_1 + h_1], \dots, N(s_M, s_M + h_M] \quad (\text{B.4})$$

sono delle variabili aleatorie. Un processo puntuale risulta completamente specificato quando è nota la descrizione statistica congiunta di tutte le variabili aleatorie in B.4. Si noti che le variabili aleatorie in (B.4) sono di tipo discreto poichè assumono solamente valori interi. Di conseguenza la loro descrizione statistica può essere data per mezzo delle corrispondenti distribuzioni di massa. Se ora fissiamo un istante di riferimento w , è possibile considerare il numero di arrivi nell'intervallo $(w, t]$ al variare dell'estremo. Tale numero viene detto *processo contatore* ed è quindi definito, per valori di $t > w$, dalla relazione

$$N(t) \triangleq N(w, t] = \int_w^t z(u) du, t > w \quad (\text{B.5})$$

Tale definizione si può inoltre generalizzare (in maniera simile a quanto si fa con le aree negative nel caso degli integrali di funzioni) per valori di $t < w$ ponendo

$$N(t) \triangleq -N(w, t] = - \int_t^w z(u) du, t < w \quad (\text{B.6})$$

La Figura B.1c mostra un esempio di realizzazione del processo contatore relativo al processo puntuale di Figura B.1a. Si noti che si tratta di un processo a tempo continuo e a valori interi. Inoltre, al crescere di t , il valore di $N(t)$ non può decrescere. Ovviamente la descrizione statistica del processo contatore è sufficiente a descrivere completamente il processo puntuale, in quanto per ogni intervallo $(s, s + h]$, con $h > 0$ si ha

$$N(s, s + h] = N(s + h) - N(s) \quad (\text{B.7})$$

L'esempio più comune e più semplice di processi puntuali è dato dai processi di Poisson. Un processo puntuale si dice processo di Poisson di intensità λ , con $\lambda > 0$, se il numero di arrivi in un qualsiasi intervallo $(s, s + T]$, con $T > 0$, è una variabile aleatoria di Poisson di media λT e, inoltre, per ogni numero intero e positivo M e per ogni M -pla di intervalli disgiunti $(s_1, s_1 + T_1), \dots, (s_M, s_M + T_M)$, le variabili aleatorie $N(s_1, s_1 + T_1), \dots, N(s_M, s_M + T_M)$ sono indipendenti. Quest'ultima condizione può essere espressa in modo equivalente dicendo che *i numeri degli arrivi che si verificano in intervalli di tempo disgiunti sono indipendenti*.

Dalla definizione di processo di Poisson segue che la descrizione statistica della variabile aleatoria $N(s, s + T]$ che dà il numero di arrivi nell'intervallo ,

non dipende dall'istante iniziale ma solamente dalla durata di tale intervallo. Ciò rappresenta una importante proprietà di stazionarietà dei processi di Poisson. L'intensità del processo di Poisson, che ha le dimensioni dell'inverso di un tempo, dà una indicazione di quanti sono gli arrivi per unità di tempo. È importante osservare che la descrizione statistica completa di un processo di Poisson è direttamente ricavabile dalla sola conoscenza della sua intensità.

Bibliografia

- [1] Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force. Report of the interference protection working group. Technical report, Federal Communications Commission, November 15, 2002.
- [2] Shared Spectrum Company. Comprehensive spectrum occupancy measurements over six different locations. Available on line: <http://www.sharedspectrum.com>, August, 2005.
- [3] Jr. Joseph Mitola III, Gerald Q. Maguire. Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, August 1999.
- [4] Andrea Goldsmith Syed Ali Jafar Ivana Maric Sudhir Srinvasa. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. *Proceeding of IEEE, Vol.97 n°5*, May, 2009.
- [5] Hu İlseyin Arslan Tevfik Yu İlcek. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS and TUTORIALS, Vol.11, NO.1*, 2009.
- [6] E. Sousa A. Ghasemi. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. *Proc. IEEE Consumer Comm. and Networking Conference*, pages pp.1022–1026, Jan. 2007.
- [7] J. H. Reed S. Haykin, D. J. Thomson. Spectrum sensing for cognitive radio. *Proceedings of IEEE*, 2009.
- [8] R. Brodersen D. Cabric, S. Mishra. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. *Proc. of Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, vol. 1(pp. 772–776), 2004.
- [9] H. Tang. Some physical layer issues for wide-band cognitive radio systems. *Proc. of IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access networks*, pp.151-159, 2005.
- [10] H. Arslan T. Yucek. Spectrum characterization for opportunistic cognitive radio systems. *Proc. of IEEE Military Communication Conference*, pages pp.1–6, 2006.

- [11] S. Lee J. Jeong, H. Kim and J. Shin. An analysis of hidden node problem in iee 802.11 multihop network. *Int. Conf. on Networked Computing and Advanced Information Management (NCM)*, 2010.
- [12] A. Guidotti M. Barbiroli, C. Carciofi and D. Guiducci. Evaluation and analysis of the hidden node margin for cognitive radio system operation in a real scenario. *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2011.
- [13] G.Riva A. Masini, G. Mazzini. Routing metric estimation in multihop wireless networks with fading channel. *Proc. IEEE Int. Conf. on Software and Computer Communications*, 2010.
- [14] W. Zhang K.B. Letaief. Cooperative communications for cognitive radio networks. *Proc. of the IEEE*, Vol. 97(No. 5), 2009.
- [15] Z. Zhou Z. Song, B. Shen and K. S. Kwak. Improved ant routing algorithm in cognitive radio networks. *Proc. IEEE Int. Symposium on Communications and Information Technologies*, 2009.
- [16] Q. Wu H. Li B. Li, D. Li. Asar: Ant-based spectrum aware routing for cognitive radio networks. *Proc. IEEE Int. Conf. on Wireless Communications and Signal Processing*, 2009.
- [17] G.H. Yang J. Zhao, H. Zheng. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. *Proc. IEEE Int. Conf. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2005.
- [18] S. Hongmei L. Chuanqing, W. Zhiming. Design on common control channel of mac protocol of cognitive radio networks. *Proc. IEEE Int. Conf. on Electrical and Control Engineering*, 2010.
- [19] P.J. Kolodzy. Interference temperature: a metric for dynamic spectrum utilization. *Int. J. Netw:Manage*, Vol.16(NO.2):103.113, 2006.
- [20] K.J.Ray Liu beibei Wang. Advances in cognitive radio networks: a survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol.5(NO.1), 2011.
- [21] H.R. Karimi. Geolocation databases for white space devices in the uhf tv bands: specification of maximum permitted emission levels. In *IEEE Int. Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks*, 2011.
- [22] *802.22 Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands*, 2011.

- [23] Z. Lei C. R. Stevenson, G. Chouinard, W. Hu, S. J. Shellhammer, and W. Caldwell. Ieee 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard. *IEEE Communication Magazine*, 2009.
- [24] S. Alamouti H. Yin. Ofdma: A broadband wireless access technology. In *IEEE Sarnoff Symposium*, 2006.
- [25] J.S. Wu S.F. Yang. A spectrum sharing method based on fuzzy logic in ieee 802.22 wran. In *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2010.
- [26] S.U. Pillai A. Papoulis. *Probability, Random Variables and Stochastic processes*. McGraw Hill, 2002.
- [27] AAVV. Digital video broadcasting (dvb); implementation guidelines for dvb terrestrial services; transmission aspects”. Technical Report 190 v.1.3.1, European Telecommunication Standard Institute (ETSI), 2008-2010.
- [28] G.Riva A. Masini, G. Mazzini. Mutual interference evaluation in cognitive radio networks with log-normal shadowing. In *Mutual Interference Evaluation in Cognitive Radio Networks with Log-normal Shadowing*, 2011.
- [29] H.Y. Kong H.V. Khuong. General expression for pdf of a sum of independent exponential random variables. *IEEE Communication Letters*, Vol.10(no.3), 2006.
- [30] M.Haenggi. On distances in uniformly random networks. *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol. 51(No 10), 2005.
- [31] M. Salehi J. Proakis. *Digital Communications*. McGraw Hill, 2007.
- [32] M.Maglioli A. Masini, A. Ghittino, N. Di Maio, and G. Mazzini. Whitefi: the usage of uhf frequencies for bi-directional services in mountainous scenarios. In *IEEE Int Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications*, 2011.
- [33] Mathworks italia - matlab and simulink for technical computing.
- [34] I.M.Moraes P.M.Esposito, M.E.M.Campista, L.H.M.K Costa, O.C.M.B Duarte, and M.G.Rubinstein. Implementing the expected transmission time for olsr wireless mesh networks. In *Wireless Days, 1st IFIP*, 2008.
- [35] J. Yiming S. Biaz, Q. Bing. Improving expected transmission time in multi-rate, multi-hop networks. In *CCNC*, 2008.