

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni



Strategia di accesso multicanale  
distribuito per reti radio cognitive

**Relatore:** Matteo CESANA

**Tesi di Laurea di:**

Marco PELUSI

Matr. n. 682665

Anno Accademico 2009/2010



# Ringraziamenti

Ringrazio il professore Matteo Cesana e il professore Antonio Capone (che mi ha supportato nella fase iniziale della tesi), per la loro disponibilità, pazienza e umiltà che mi hanno offerto durante lo svolgimento di questa tesi.

Ringrazio la mia famiglia, che mi ha sempre supportato, confortato nei momenti difficili, incoraggiato a superare gli ostacoli e infine dato la possibilità di completare i miei studi.

Ringrazio tutti i compagni di studi con i quali ho condiviso la vita universitaria e che mi hanno aiutato durante la preparazione degli esami.

Ringrazio anche tutte le altre persone che mi hanno incoraggiato a intraprendere e concludere questo percorso di studi.

CON GRATITUDINE A TUTTI.

# Indice

<b>Ringraziamenti</b>	<b>i</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>iv</b>
<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Cognitive Networks</b>	<b>4</b>
2.1 Accesso dinamico allo spettro . . . . .	4
2.2 Architetture CR . . . . .	7
2.2.1 Accesso su banda licenziata e banda libera . . . . .	11
2.3 Dispositivi CR riconfigurabili: vantaggi e svantaggi . . . . .	11
2.4 Il ciclo cognitivo . . . . .	13
2.4.1 La fase di decisione dello spettro . . . . .	18
2.4.2 La fase di condivisione dello spettro . . . . .	22
2.4.3 La fase di mobilità . . . . .	25
<b>3 Sensing</b>	<b>26</b>
3.1 Il sensing dello spettro . . . . .	26
3.1.1 Individuazione del trasmettitore . . . . .	28
3.1.2 Individuazione del ricevitore . . . . .	32
3.1.3 Calcolo della temperatura d'interferenza . . . . .	33
3.1.4 Sensing dello spettro negli attuali standard wireless . . . . .	35
<b>3.2 Il sensing cooperativo . . . . .</b>	<b>37</b>
3.2.1 Prestazioni del sensing cooperativo . . . . .	41
3.2.2 Classificazione del sensing cooperativo . . . . .	44

3.2.3	Design dei parametri fondamentali del sensing cooperativo . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Sensing cooperativo fisico e virtuale</b>	<b>53</b>
4.1	L'interferenza nel dominio dello spazio, della frequenza e del tempo . . . . .	53
4.2	Sensing cooperativo totale . . . . .	57
4.2.1	Schema di sensing cooperativo totale . . . . .	57
4.2.2	Inefficienze del sensing cooperativo totale . . . . .	58
4.3	Sensing DiSCo . . . . .	59
4.3.1	Il sensing a doppia soglia . . . . .	60
4.3.2	Recupero dei messaggi non decodificati . . . . .	64
4.3.3	Soluzione delle problematiche introdotte dalla doppia soglia di sensing . . . . .	67
4.3.4	Schema di sensing DiSCo . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Strategia di accesso multicanale distribuito</b>	<b>75</b>
5.1	Sensing DiSCo ottimizzato . . . . .	75
5.1.1	Schema di sensing DiSCo ottimizzato . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Analisi prestazionale</b>	<b>85</b>
6.1	Descrizione del simulatore . . . . .	88
6.2	Ipotesi preliminari . . . . .	90
6.3	Variabili di ingresso . . . . .	94
6.4	Fattori di merito . . . . .	97
6.5	Risultati numerici . . . . .	100
6.5.1	Efficienza . . . . .	100
6.5.2	Throughput . . . . .	103
6.5.3	Probabilità di collisione. . . . .	104
6.5.4	Utilizzo dei canali. . . . .	108
	<b>Conclusioni</b>	<b>112</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>114</b>

# Elenco delle figure

2.1	Allocazione dello spettro radio (3-6 GHz) negli Stati Uniti ad opera della FCC. . . . .	4
2.2	Occupazione dello spettro di un segnale 802.11b che trasporta una conferenza Skype (a) e visione ingrandita di due pacchetti consecutivi (b) [18]. . . . .	6
2.3	Visione temporale e frequenziale di vuoti spettrali collocati su più frequenze e in istanti temporali consecutivi. . . . .	8
2.4	Rete primaria e secondaria coesistenti con architetture centralizzate e ad-hoc. . . . .	10
2.5	Integrazione delle funzioni CR con gli strati del modello OSI. . . . .	13
2.6	Il ciclo cognitivo. . . . .	14
2.7	Fase di decisione dello spettro in modalità multi banda. . . . .	22
3.1	Classificazione dei metodi di individuazione degli utenti primari. . . . .	27
3.2	Tecniche di sensing basate sull'individuazione dei trasmettitori primari. . . . .	27
3.3	Distribuzione (gaussiana) della potenza di rumore ( $S_0$ ) e di segnale con rumore $S_1$ misurabili sul canale [12]. . . . .	31
3.4	Tecniche di sensing basate sull'individuazione dei ricevitori primari. . . . .	33
3.5	Individuazione dei vuoti spettrali mediante la tecnica del calcolo del parametro di temperatura di interferenza $T_I$ . . . . .	34
3.6	Bluetooth previene le collisioni con le trasmissioni WLAN, grazie ad AFH. . . . .	37

3.7	Trasmissioni Bluetooth che collidono con quelle WLAN, senza AFH. . . . .	37
3.8	Scenario di terminale nascosto (a) ed esposto (b). . . . .	40
3.9	Effetto dello shadowing sulla fase di sensing. . . . .	41
3.10	Andamento della probabilità di corretta individuazione (a) e di falso allarme (b) nel caso di sensing cooperativo e individuale in funzione del numero di dispositivi CR cooperativi. . . . .	43
3.11	Margine del guadagno derivante dalla cooperazione in fase di sensing. . . . .	44
3.12	(a) Metodo convenzionale di identificazione dei primari con una soglia singola; (b) Censura delle informazioni di sensing con un sistema a doppia soglia. . . . .	46
4.1	Accesso primario al canale di tipo asincrono senza collisione (a), (b) e con collisione (c). . . . .	56
4.2	Comportamento efficiente (1) e inefficiente (2) del sensing cooperativo totale. . . . .	58
4.3	Sensing con la soglia fisica e soglia logica uguali. . . . .	61
4.4	Sensing con la soglia logica maggiore della soglia fisica. . . . .	63
4.5	Tre possibili casi di sensing con la soglia logica maggiore della soglia fisica. . . . .	64
4.6	Messaggi scambiati sul canale di controllo dai secondari per recuperare le trasmissioni non decodificate. . . . .	66
4.7	Sensing DiSCo con la soglia logica maggiore della soglia fisica e recupero dei messaggi non decodificati. . . . .	67
6.1	Topologia di rete secondaria sensibile all'inefficienza dello schema di sensing cooperativo a 1-hop. . . . .	86
6.2	Effetto della frequenza di trasmissione dei primari $\lambda_p$ sul sensing dei secondari. . . . .	87
6.3	Esempio di topologia di rete utilizzato per le simulazioni. . . . .	89
6.4	Struttura di un nodo secondario (a) e dettaglio del modulo composto nic (b). . . . .	90
6.5	Problema del terminale nascosto non risolvibile. . . . .	93

6.6	Problema del terminale nascosto risolto grazie alla presenza di un utente secondario aggiuntivo. . . . .	93
6.7	Effetto dell'alternanza dei ruoli di trasmettitore e ricevitore dei terminali primari. . . . .	95
6.8	Efficienza di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.	101
6.9	Efficienza di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.	102
6.10	Efficienza di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=1, 2, 3$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	102
6.11	Efficienza di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=2, 3$ e $4$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	103
6.12	Throughput di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo e DiSCo ottimizzato. . . . .	104
6.13	Probabilità di collisione dei primari con $N_{H\text{ OP}}=1$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	106
6.14	Probabilità di collisione dei primari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=2, 3$ e $4$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	107
6.15	Probabilità di collisione dei primari con $N_{H\text{ OP}}=1, 2, 3$ e $N_{C\text{ H}}=2$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	107
6.16	Probabilità di collisione dei primari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.	108
6.17	Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=2$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	109
6.18	Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}}=1, 2, 3$ e $N_{C\text{ H}}=3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	110



6.19 Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}} = 2$ e $N_{C\text{ H}} = 3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	111
6.20 Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con $N_{H\text{ OP}} = 2$ e $N_{C\text{ H}} = 3$ nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale. . . . .	111

# Capitolo 1

## Introduzione

L'attuale suddivisione statica dello spettro radio in tante bande accessibili solo da utenti autorizzati, non consente un utilizzo efficiente delle risorse disponibili. L'effettivo sfruttamento di ogni singola banda può variare in funzione del tempo e del luogo geografico considerati. Nonostante le frequenze possano essere utilizzate anche per offrire dei servizi diversi da quelli a cui sono destinate, in realtà questo non può avvenire finché gli enti di regolamentazione delle risorse radio non lo permettono.

Negli ultimi anni, sono state studiate delle tecnologie, dette DSA (Dynamic Spectrum Allocation) che permettono di sfruttare al meglio le risorse radio, rivoluzionando l'assegnamento delle frequenze per consentirne l'utilizzo anche da parte di altri servizi, senza compromettere il corretto funzionamento di quelli già esistenti. La tecnologia abilitante per le DSA è la radio cognitiva (CR), cioè un dispositivo in grado di reagire ai cambiamenti dell'ambiente radio in cui opera, modificando autonomamente e dinamicamente i propri parametri funzionali, tra cui la potenza di trasmissione, la modulazione e la frequenza.

La funzione principale di una radio cognitiva è quella di rilevare i vuoti spettrali (cioè le porzioni di spettro inutilizzate) presenti nelle bande analizzate, per consentirne l'accesso da parte di utenti secondari in modo opportunistico, evitando di utilizzare le risorse quando sono già impegnate dagli utenti autorizzati a trasmettere dalla licenza, detti anche primari. I terminali

CR non possono interagire con i nodi primari, i quali non sono a conoscenza dell'esistenza di una rete di utenti che cerca di accedere alle stesse risorse. Dal punto di vista architetturale, infatti, gli utenti secondari formano una rete overlay, che è indipendente dallo spettro e non ha una licenza in una determinata banda.

Una delle funzioni più importanti dei terminali radio cognitivi è quella di usufruire in modo opportunistico dei vuoti spettrali, senza creare interferenza agli utenti primari. Inoltre, una volta identificato un vuoto spettrale, i secondari devono periodicamente verificare che esso non sia rioccupato da un utente primario. Se questo si verificasse, i secondari dovrebbero lasciare subito la banda utilizzata per occuparne un'altra libera (*spectrum handoff*). Per questo motivo i secondari devono periodicamente alternare la fase di analisi delle risorse radio con le loro trasmissioni.

Fenomeni come lo shadowing e il fading, molto comuni per l'ambiente radio, possono ostacolare la fase di analisi del canale degli utenti CR situati in zone critiche. Un secondario, a partire da un'analisi errata del canale, potrebbe constatare libera una portante che in realtà è occupata, provocando una collisione presso uno o più ricevitori primari. Un altro errore può manifestarsi nel caso opposto: se un dispositivo identificasse un canale particolarmente rumoroso come occupato, perderebbe una possibilità di trasmissione con una conseguente diminuzione del throughput effettivamente raggiungibile.

Per mitigare gli effetti del fading, dello shadowing e del rumore termico sul canale è possibile instaurare un regime di cooperazione tra i nodi secondari, che devono collaborare con gli altri nodi radio-cognitivi. La collaborazione è a doppio senso dal momento che ciascun utente deve mettere a disposizione degli altri i propri risultati dell'analisi diretta del canale e, al contempo, può consultare gli esiti di tutti i terminali circostanti. Il sensing cooperativo è utile anche per affrontare situazioni di terminale nascosto, dovute ad una topologia di rete in cui il ricevitore primario si trova nell'area di trasmissione di un secondario, ma lo stesso non si verifica per il trasmettitore primario. In questo scenario il sensing stima libero un canale in realtà impegnato.

Se da un lato la cooperazione contribuisce a creare una visione globale dello stato occupazionale dell'ambiente radio, dall'altra possono diffonder-

si informazioni di falso allarme. Ipotizzando che un canale sia constatato occupato erroneamente da un nodo e che questa informazione sbagliata, in virtù della collaborazione, sia divulgata agli altri nodi, si creerebbe un circolo vizioso, che amplificherebbe a livello globale gli effetti di un errore locale.

Un'altra problematica legata alla fase di sensing è la soglia di decodifica dei segnali ricevuti. Infatti, grazie ad opportune tecniche di sensing, è possibile accedere al contenuto dei messaggi, per ottenere informazioni riguardanti, ad esempio, la statistica di generazione del traffico primario. D'altra parte, quando non è possibile decodificare le trasmissioni, queste informazioni non sono accessibili, ma è possibile ottenere solo un'informazione di tipo binario sull'occupazione dei canali. Altro aspetto rilevante è la scelta migliore delle risorse a disposizione, ovvero la scelta del canale migliore tra quelli disponibili in termini di banda, occupazione del canale da parte occupazione del canale da parte dei dispositivi secondari e probabilità di collisione presso i ricevitori primari. L'obiettivo di questa tesi è quello di descrivere un algoritmo di sensing cooperativo che permetta quindi di migliorare l'uso delle risorse disponibili in fase di accesso ai canali.

Questa tesi comincia presentando, nel capitolo 2, una panoramica relativa allo stato attuale dello spettro radio e introducendo la tecnologia DSA e quella radio cognitiva. Successivamente sono analizzate tutte le fasi del ciclo cognitivo, ossia la sequenza di funzioni che consentono ai dispositivi CR di svolgere al meglio il loro compito.

Il capitolo tre descrive nel dettaglio tutte le tipologie di sensing dello spettro che possono essere utilizzate dai secondari. In particolare, sono classificate le diverse tipologie di sensing cooperativo, evidenziando i vantaggi rispetto al sensing individuale.

Il capitolo quattro e cinque introducono l'algoritmo di sensing cooperativo fisico e virtuale DiSCo e DiSCo ottimizzato e le soluzioni implementate per far fronte alle problematiche realistiche del sensing e dell'accesso ai canali, confrontando il loro comportamento con quello dello schema di sensing cooperativo totale proposto in letteratura.

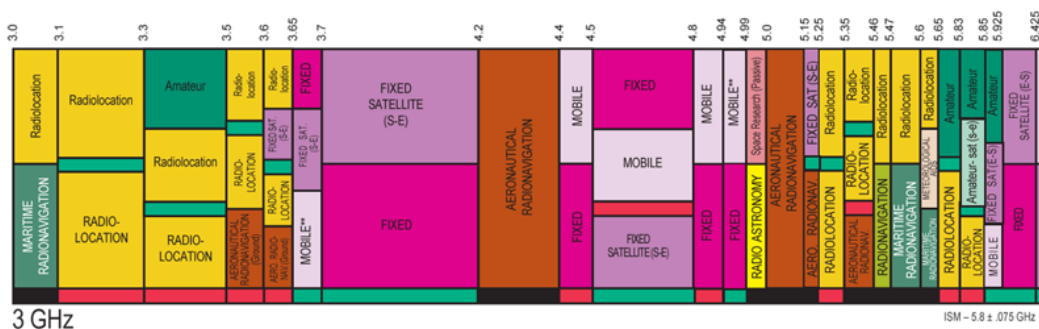
Il capitolo sei riporta i risultati ottenuti dalle simulazioni, confrontando gli schemi di sensing considerati. Infine, le conclusioni riassumono i risultati ottenuti e accennano possibili sviluppi futuri.

# Capitolo 2

## Cognitive Networks

### 2.1 Accesso dinamico allo spettro

Lo spettro radio, ossia la gamma di frequenze comprese approssimativamente tra 50 MHz e 6 GHz, è stato suddiviso in maniera statica in più sotto bande, ciascuna adibita allo sfruttamento di differenti tecnologie e paradigmi di comunicazione wireless (GSM, UMTS, WiFi, ...) per gli scopi più variegati. In Figura 4.6 è rappresentata l'attuale allocazione delle frequenze tra 3 e 6 GHz ad opera della Federal Communication Commision (FCC) per il territorio nazionale statunitense [13].



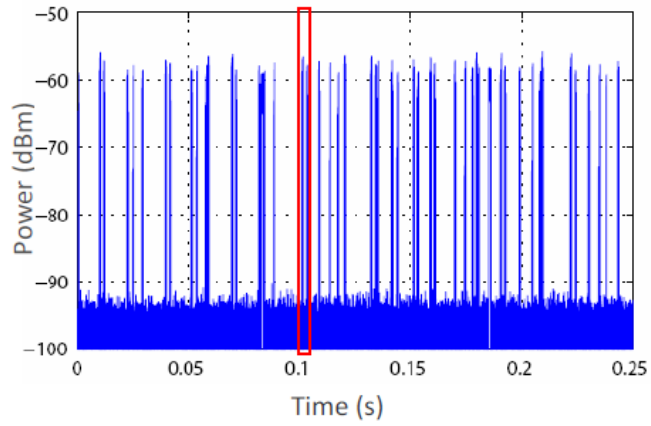
**Fig. 2.1:** Allocazione dello spettro radio (3-6 GHz) negli Stati Uniti ad opera della FCC.

L'assegnamento prestabilito dei diversi range di frequenze si è però rive-

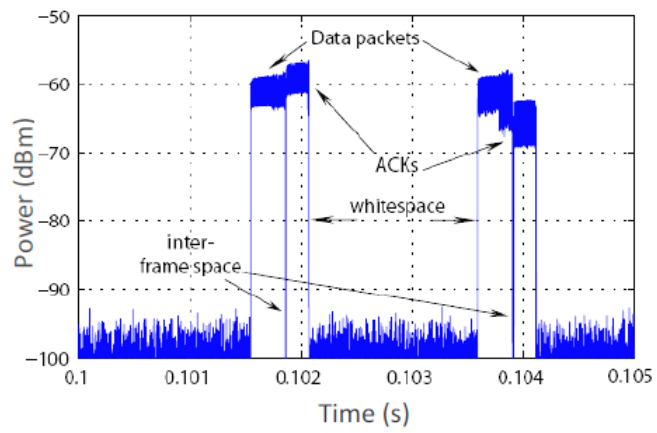
lato particolarmente inefficiente: uno studio della FCC ha mostrato come, al variare della zona geografica e dell'intervallo temporale di osservazione, lo sfruttamento effettivo dello spettro oscilla tra il 15 e l'85%, con un conseguente spreco di risorse [6]. A titolo esemplificativo si consideri in Figura 2.2 il caso di una conferenza di tre utenti che utilizzino il popolare software Skype per comunicazioni basate sul protocollo VoIP (Voiceover- IP) [18]. Nonostante il canale sia utilizzato continuamente per l'invio di pacchetti dati, come mostrato in Figura 2.2a tramite la rappresentazione dell'andamento del segnale nel dominio del tempo, sono facilmente individuabili lunghi intervalli di inutilizzo tra un pacchetto e il successivo (Figura 2.2b). Scenari del tutto identici sono condivisi da altre tipologie di trasmissione.

La limitata disponibilità delle risorse radio, ulteriormente aggravata da un suo inefficiente sfruttamento, ha indotto alla ricerca di nuovi paradigmi di accesso al canale, al fine di aumentare l'effettivo sfruttamento di tale risorsa. Tra i vari approcci proposti si è distinta la tecnologia delle Dynamic Spectrum Access Networks (DSANs), che punta a fornire agli utenti un'ampia banda tramite un accesso dinamico ad un insieme eterogeneo di architetture, optando di volta in volta per quella in grado di garantire le prestazioni migliori. Una DSAN è un'architettura i cui terminali sono dotati di un sistema radio in grado di adattarsi dinamicamente per operare su un canale disponibile (nei domini del tempo e della frequenza locali) ma con limitati diritti di fruizione. Un esempio di reti che potrebbero usufruire dello spettro inutilizzato è costituito dalle reti di sensori, il cui obiettivo è quello di far confluire verso un'unità centrale elaborativa le misure di parametri dell'ambiente in cui sono collocati. Per la loro stessa natura questi terminali utilizzano basse velocità di trasmissione dei dati e comunicano sporadicamente con l'entità centrale: potrebbero dunque coesistere con altre infrastrutture, che sfrutterebbero i loro periodi di inattività per trasmettere. A seconda del rapporto che lega gli utenti DSA con quelli tradizionali si può avere un regime di cooperazione (se gli utenti DSA devono essere autorizzati dai detentori della licenza per l'accesso allo spettro) o di non-cooperazione (se gli utenti DSA non devono chiedere alcuna autorizzazione per poter trasmettere sul canale prescelto).

La tecnologia abilitante delle DSANs è quella del Cognitive Radio (CR),



(a)



(b)

**Fig. 2.2:** Occupazione dello spettro di un segnale 802.11b che trasporta una conferenza Skype (a) e visione ingrandita di due pacchetti consecutivi (b) [18].

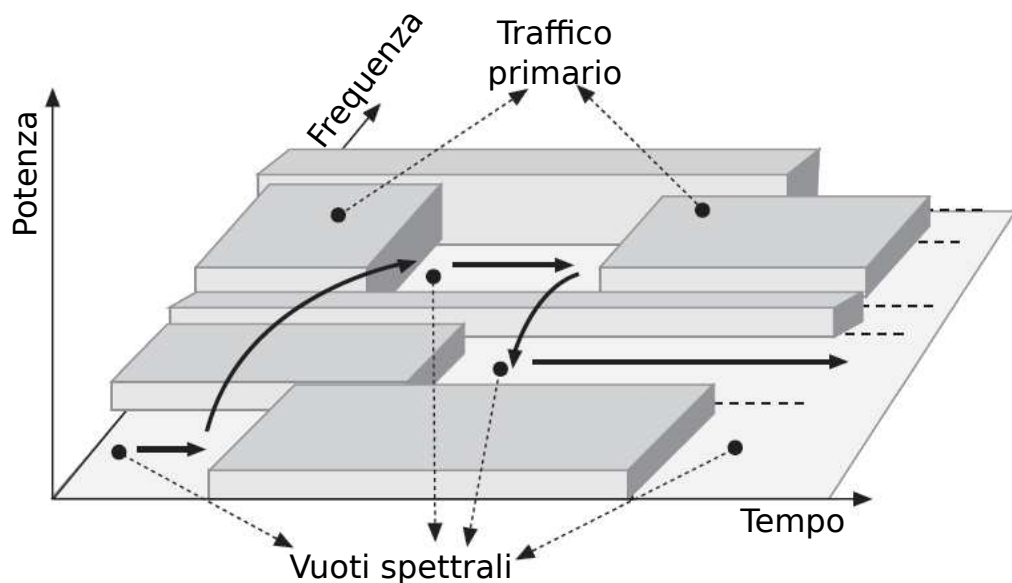
un paradigma di comunicazione wireless in grado di analizzare lo stato del canale radio frequenza per frequenza e di individuare le porzioni di spettro inutilizzate, scegliendo in modo adattativo il miglior canale di comunicazione disponibile in ogni istante (*bandwidth harvesting*). Un terminale CR è dotato, quindi, di due caratteristiche che lo rendono dinamico:

- *Consapevolezza dello spettro*: le reti CR sono in grado di analizzare lo spettro da utilizzare al fine di individuare vuoti spettrali liberi e di rilevare la presenza di altri utenti con cui evitare di interferire. Esse sono, perciò, costantemente informate riguardo la situazione dell'ambiente radio in cui si trovano dai punti di vista temporale, spaziale e frequenziale.
- *Riconfigurabilità*: i dispositivi CR possono reagire attivamente alle variazioni dell'utilizzo dello spettro, modificando i propri parametri trasmissivi, tra cui la frequenza di lavoro, la modulazione e la potenza trasmessa. Date le funzionalità adattative di cui sono dotati e in particolar modo l'ampia banda su cui devono essere in grado di trasmettere e ricevere, i terminali CR necessitano di hardware evoluto se paragonato a quello di un classico ricetrasmittitore. Ad esempio, ogni singolo terminale CR dello standard IEEE 802.22, detto CPE (Customer-premises equipment), deve essere provvisto di due antenne contemporaneamente attive: la prima, adoperata per le comunicazioni con la BS, è direzionata verso quest'ultima al fine di limitare le interferenze con gli altri utenti, mentre la seconda, utilizzata per verificare la presenza sul canale di utenti licenziatari, è omnidirezionale per avere una visione globale dell'ambiente circostante.

## 2.2 Architetture CR

Le trasmissioni degli utenti licenziatari sono intervallate da periodi più o meno lunghi di inattività, detti vuoti spettrali o *white space*, mostrati in Figura 2.3. Obiettivo della tecnologia CR è quello di sfruttare i vuoti spettrali per le comunicazioni degli utenti non legalmente autorizzati a trasmettere





**Fig. 2.3:** Visione temporale e frequenziale di vuoti spettrali collocati su più frequenze e in istanti temporali consecutivi.

nella banda, ma in grado di garantire l'assenza di interferenze con i legittimi fruitori della porzione di spettro considerata.

L'architettura di una rete CR prevede quindi due classi di utenti [6]:

- *Utenti primari* (o licenziatari): godono dell'uso prioritario della rete e accedono al canale secondo lo schema prestabilito dallo standard. In una rete a infrastruttura (ad esempio una rete cellulare) gli utenti primari si collegano a una base-station (BS) primaria. Alcune BS primarie evolute sono dotate di capacità radio-cognitive nel caso sia previsto l'accesso di utenti secondari direttamente alla rete primaria (utenti ibridi).
- *Utenti secondari* (o cognitivi): possono accedere al mezzo di comunicazione secondo una logica opportunistica, cioè solamente nelle porzioni di spettro non occupate dagli utenti primari e devono sempre cedere la banda non appena questa viene richiesta dagli utenti licenziatari. Gli utenti primari sono totalmente ignari della presenza degli utenti secon-

dari: è di competenza di questi ultimi accedere in maniera opportuna al canale senza interferire con gli utenti primari.

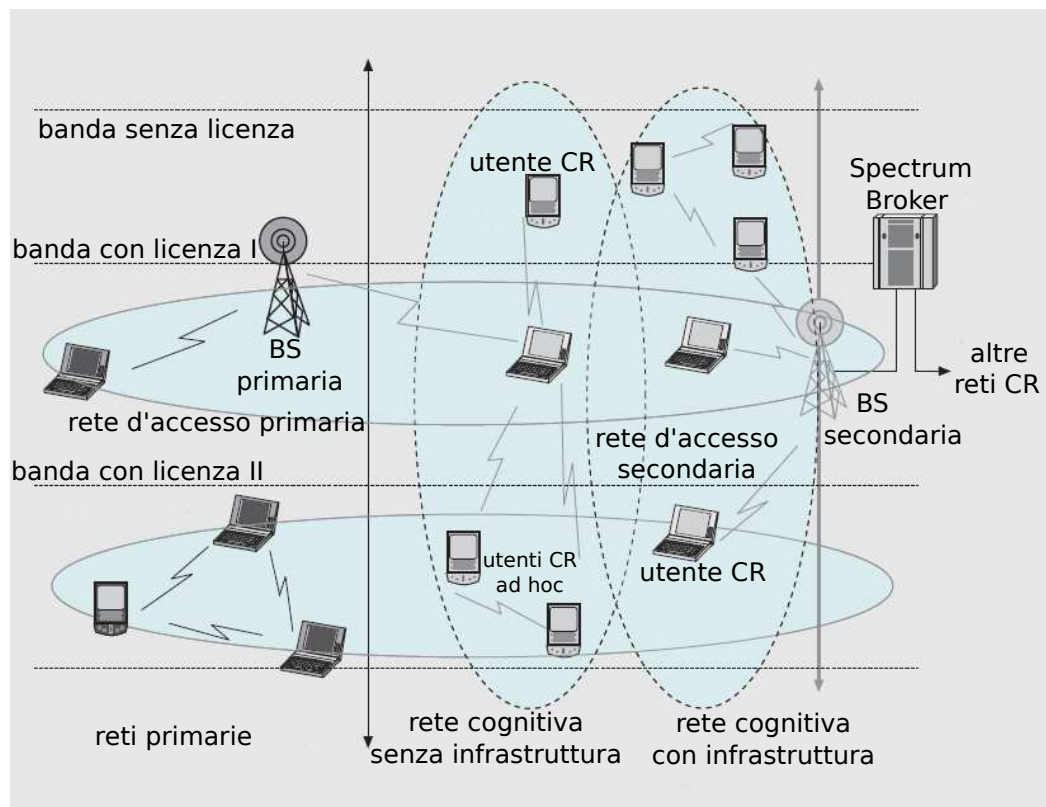
Le reti CR possono organizzarsi in un'architettura ad-hoc e in questo caso sono chiamate CRAHN (Cognitive Radio Ad Hoc Network), oppure in modalità infrastruttura, mediante il coordinamento di una base-station secondaria, che permetta anche il collegamento con altre reti CR confinanti. Nel caso esistano più reti radio cognitive che desiderino condividere lo stesso spettro nel medesimo spazio e nello stesso intervallo temporale, è necessaria la presenza coordinatrice di uno *spectrum broker* in grado di regolare equamente l'accesso alle risorse condivise. In Figura 2.4, sono illustrate tutte le possibili combinazioni di infrastrutture, in cui la rete primaria e quella secondaria sono dotate di una BS, oppure no.

È importante tener presente che le analisi dei dispositivi CR sfruttano la diversità spaziale: un canale può risultare libero in una zona, ma occupato in un'altra area contigua. Pertanto le reti primarie tendono ad avere un grande raggio di copertura (ad esempio reti GSM, WiMax e altre tecnologie a lungo raggio ottenuto mediante antenne alte e direzionate), mentre le reti secondarie, a causa della limitata validità spaziale dei risultati del sensing, sono in genere a corto raggio.

A differenza della modalità ad infrastruttura, quando i secondari sono configurati in modalità ad hoc, essi non devono soltanto identificare i vuoti spettrali ed evitare di interferire con i primari, ma devono risolvere tutte le problematiche relative al fatto che le comunicazioni avvengono tra più hop nella rete. Le differenze principali con la modalità infrastruttura sono l'architettura distribuita multi-hop, la dinamicità della topologia della rete e la disponibilità delle risorse variabile nel tempo e nello spazio [4]. Infatti, un percorso end-to-end è costituito da collegamenti tra molteplici nodi secondari. Perciò, per ogni comunicazione, bisogna identificare quali sono i nodi CR ai quali inoltrare le informazioni per raggiungere la destinazione. Per questo, ogni nodo deve assicurarsi che ogni link del percorso end-to-end garantisca i requisiti di QoS, tra cui banda e ritardo, del flusso di dati inviato. Non è semplice risolvere questo problema, dal momento che nelle reti cognitive i collegamenti tra i nodi non sono stabili, perché le porzioni di spettro libere

individuare dai secondari possono essere rioccupate dai primari, costringendo gli utenti CR a ricercare altre risorse disponibili che garantiscano la stessa QoS [5].

Inoltre, nelle reti cognitive multi-hop, l'occupazione delle risorse vista da un nodo non è necessariamente identica a quella di tutti gli altri nodi della rete, ma è sempre più differente all'aumentare della distanza tra i nodi. Questo porta i secondari a dover condividere le proprie informazioni di occupazione delle risorse con i nodi vicini, in modo da assicurare le connettività point-to-point ed end-to-end [10].



**Fig. 2.4:** Rete primaria e secondaria coesistenti con architetture centralizzate e ad-hoc.

### **2.2.1 Accesso su banda licenziata e banda libera**

Lo spettro è costituito sia da bande riservate ad uso esclusivo di utenti primari detentori della licenza, sia da bande libere (sono ad esempio libere le bande ISM, di cui usufruiscono utenti senza licenza per scopi Industriali, Scientifici e Medici). A seconda della tipologia di banda utilizzata, cambiano le priorità e le politiche di accesso al canale degli utenti secondari.

Nel caso di bande riservate a utenti con licenza, quando una data porzione di spettro risulta libera in seguito ad un'analisi di sensing, gli utenti CR possono usufruire di tale canale finché esso risulta vuoto. La rete primaria e la rete CR coesistono e usano a turni lo stesso spettro, a patto che gli utenti secondari siano invisibili agli utenti primari. L'obiettivo fondamentale è annullare le interferenze tra utenti licenziatari e utenti CR, i quali dovrebbero cambiare frequenza o modulazione ogni volta che lo spettro libero dovesse essere richiesto nuovamente da un utente primario, migrando verso altri white space disponibili. Per quantificare la QoS di ogni classe di utenti si definiscono parametri numerici: per gli utenti primari ad esempio si deve specificare la massima interferenza ammessa al ricevitore, mentre per i nodi CR si deve stabilire il minimo SINR accettato, quantificando la potenza da immettere sul canale. Si deve quindi verificare che le potenze generate dagli utenti CR non siano al di sopra dei livelli ammessi dagli utenti primari.

Nel caso di bande libere, tutti gli utenti hanno lo stesso diritto di accedere al canale. Gli utenti cognitivi, quindi, non sono tenuti a liberare il canale non appena avvertono la presenza di un altro utente. In questo scenario il sensing si concentra sull'individuazione di altri utenti secondari e l'accesso al canale può essere regolato, ad esempio, da meccanismi a contesa.

## **2.3 Dispositivi CR riconfigurabili: vantaggi e svantaggi**

La caratteristica principale e più innovativa degli utenti secondari è la riconfigurabilità, cioè la capacità di adattamento dei parametri trasmissivi ai cambiamenti dell'ambiente radio circostante, non solo prima di procedere con

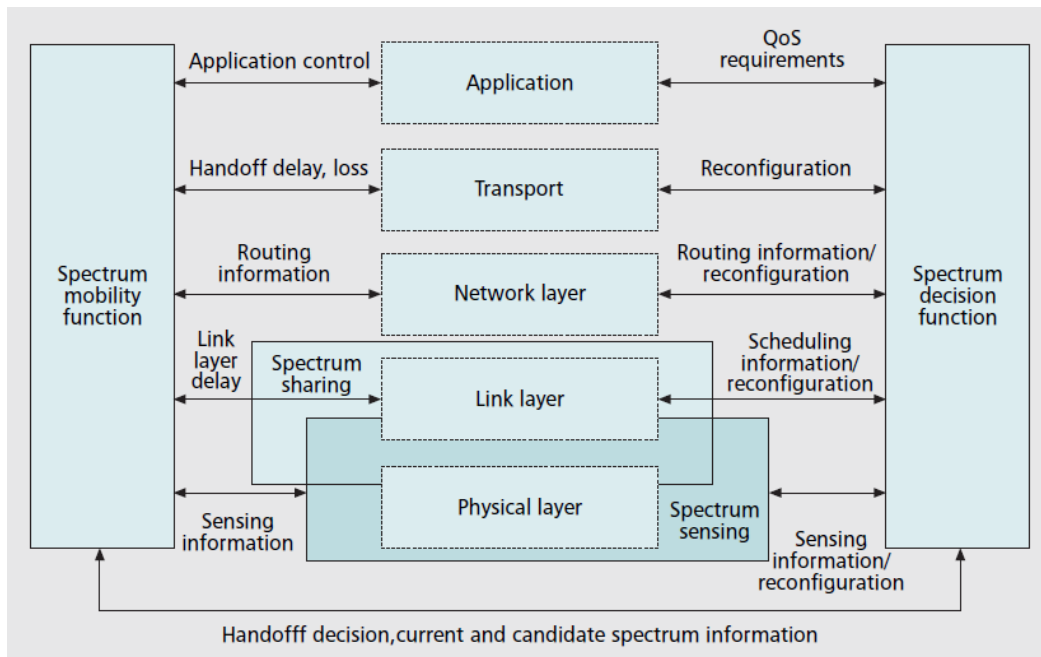
la trasmissione, ma anche quando questa è già in atto. I parametri variabili di cui un utente secondario ha facoltà di decisione sono:

- *frequenza di lavoro*: il dispositivo CR può autonomamente, se opera in modalità ad-hoc, o in seguito a una richiesta da parte della BS, se diretto da un'unità centrale, modificare la frequenza portante utilizzata. La versatilità degli utenti radio può portare, in alcuni casi, all'utilizzo di più canali liberi adiacenti, che vengono trattati come un unico mezzo.
- *modulazione*: in base allo stato del canale e alla tipologia di traffico generato, il dispositivo CR può scegliere uno schema di modulazione adatto. In particolare, la scelta deve tenere in considerazione la natura dell'applicazione. Nel caso di traffici sensibili al ritardo di trasmissione, come quelli real time, è opportuno optare per modulazioni in grado di fornire elevati bit rate, mentre nel caso di applicazioni sensibili agli errori di trasmissione la scelta deve ricadere su modulazioni a basso BER garantito.
- *potenza di trasmissione*: i terminali devono costantemente rispettare i vincoli di potenza massima trasmittiva, calcolata anche in base alla posizione dei ricevitori primari. Infatti, è possibile implementare politiche che, a seguito del rilevamento di ricevitori primari, inducano i secondari a diminuire in modo adattativo la potenza irradiata, per evitare l'interferenza. Durante la propria fase di sensing dello spettro, non appena il ricevitore secondario avverte una coppia primaria in fase di trasmissione, informa il trasmettitore secondario che, invece di migrare su un altro canale, decide di decrementare la propria potenza fino a non interferire più con il terminale ricevente primario.

La proprietà di riconfigurabilità se da un lato permette uno sfruttamento efficiente della risorsa radio, dall'altro comporta una maggiore complessità nella progettazione e realizzazione dei dispositivi stessi. Innanzitutto i terminali cognitivi, a differenza di quelli tradizionali, devono essere provvisti di (de)modulatori, antenne, filtri e amplificatori in grado di operare su un range particolarmente esteso di frequenze. Un esempio relativo alla maggiore

complessità della progettazione dei terminali CR rispetto a quelli classici fa riferimento alla scelta dell'antenna necessaria per il sensing del canale [9].

Un'ulteriore complessità introdotta dalla riconfigurabilità consiste nel fatto che la tecnologia CR deve essere integrata con tutti gli strati del modello OSI, come mostrato in Figura 2.5). Lo stack protocollare classico funziona correttamente solo per gli utenti primari (per i quali l'allocazione e l'accesso allo spettro seguono una politica prestabilita). È, pertanto, di competenza delle CR non incidere sugli utenti primari (interferenze, sgombero dei vuoti richiesti dai primari, gestione dei pacchetti secondari persi), che sono totalmente inconsapevoli della presenza degli utenti secondari.

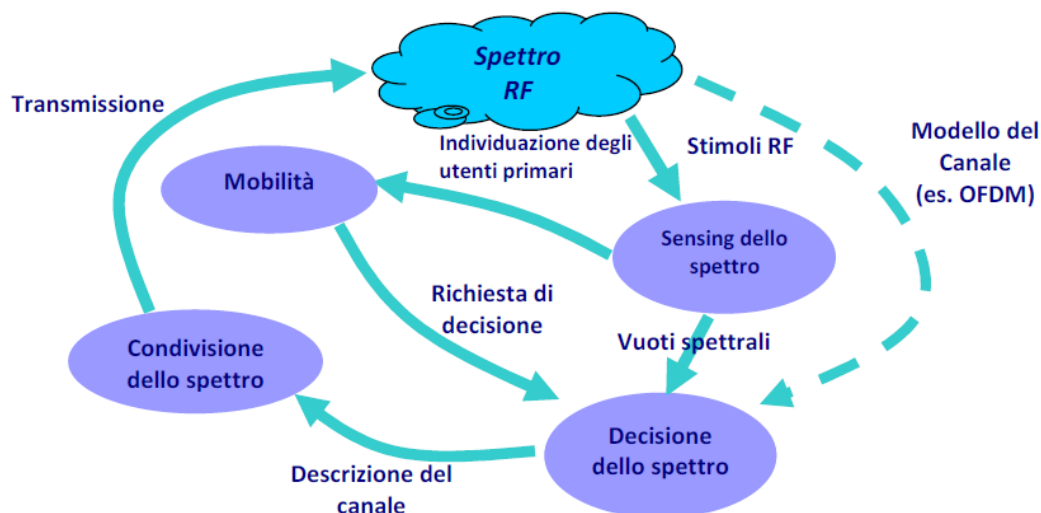


**Fig. 2.5:** Integrazione delle funzioni CR con gli strati del modello OSI.

## 2.4 Il ciclo cognitivo

Un terminale cognitivo è in grado di interagire con l'ambiente radio circostante, adattando i propri parametri trasmissivi in seguito agli stimoli provenienti dall'esterno. Il dispositivo secondario, non appena riceve informazioni

di cambiamento dello scenario circostante, innesca una reazione per elaborare la migliore risposta possibile. La sequenza dei passaggi necessari è nota come ciclo cognitivo ed è rappresentata in Figura 2.6.



**Fig. 2.6:** Il ciclo cognitivo.

Le sequenze componenti del ciclo cognitivo sono [7]:

- *Sensing dello spettro*: ogni singolo ricetrasmittitore cognitivo è in grado di individuare lo spettro inutilizzato al momento (vuoto spettrale), rilevando la presenza/assenza di traffico di altri utenti sul canale. Al termine della fase di sensing, ogni utente secondario crea una mappa dello stato occupazionale in base alle osservazioni locali. È bene tener presente che le osservazioni ottenute hanno una validità limitata esclusivamente allo spazio circostante il dispositivo secondario e per un periodo di tempo relativamente breve. La mappa può consistere in un semplice vettore binario in cui, per ogni frequenza, si specifica la presenza (1) o l'assenza (0) di primari, oppure si possono creare strutture dati più complesse per rendere maggiormente dettagliati i risultati. Una questione architetturale riguardante il sensing consiste nello stabilire il numero di ricetrasmittitori di cui deve essere provvisto ciascun terminale cognitivo, per poter trasmettere e ascoltare il canale. Un

ampio numero di antenne consentirebbe ai dispositivi radio cognitivi di sfruttare un maggior numero di canali, ma è opportuno tener presente che un elevato numero di ricetrasmittitori richiede anche un'elevata complessità a livello hardware e costi di produzione maggiori. Per questi motivi si tende a limitare il numero di antenne installate su ogni nodo secondario e ad ottimizzarne lo sfruttamento. Esistono due configurazioni di sensing per tali antenne [26]. Nel caso in cui si adotti una tecnica di sensing ad ampia banda (*modalità wideband*), si tenta di ascoltare contemporaneamente più canali, con necessità di servirsi di un ADC (Analog to Digital Converter) ad elevate prestazioni. Se, invece, si opta per un sensing sequenziale, i canali vengono scansionati uno ad uno: si determina, così, un allungamento dei tempi totali, ma si può dotare il dispositivo di componenti elettroniche più economiche e meno sofisticate. È possibile attuare anche una politica evoluta, il *sensing cooperativo*: tutti i nodi della rete CR, o un sottoinsieme di essi selezionati in base a criteri di differenza spaziale, condividono i risultati della propria fase di sensing con gli altri. Grazie alla collaborazione i terminali radio-cognitivi possono, pertanto, correggere la mappa di stato occupazionale del canale che si sono calcolati autonomamente, incrementando le probabilità di corretta individuazione dei primari. Il sensing cooperativo diventa indispensabile nei casi in cui il rilevamento dei primari sia transmitter-based ed il ricevitore primario si collochi nel raggio di copertura del secondario trasmittente, ma lo stesso non si verifica per il trasmettitore primario (problema del terminale nascosto). Come illustrato in Figura 2.5, il sensing si pone a cavallo tra il primo e il secondo livello dello strato OSI: le informazioni di sensing vengono raccolte direttamente dalla scansione del canale (livello fisico), ma l'elaborazione dei dati raccolti (eventualmente frutto di una collaborazione) è di competenza del secondo livello.

- *Decisione dello spettro*: in base al modello del canale radio posseduto e ai risultati della fase del proprio sensing, si deve scegliere il miglior canale disponibile, il tipo di modulazione e la potenza trasmissiva. Nel caso



di sensing individuale la decisione viene presa esclusivamente sulla base dell'output del proprio sensing diretto; in caso di cooperazione tra i secondari è necessario assemblare tutte le mappe occupazionali ricevute. L'elaborazione può partire da un semplice AND logico di tutti i vettori binari che il terminale cognitivo possiede, fino a metodi ed algoritmi di elaborazione più sofisticati che garantiscano una mappa dello spettro in grado di garantire la minor probabilità d'errore possibile. Anche la fase di decisione, in genere, assume una connotazione cooperativa. In primo luogo è necessario che i membri di ciascuna coppia secondaria comunichino preliminarmente tra di loro per stabilire su quale canale trasmettere, verificando che per entrambi valga almeno un'opportunità di trasmissione identica. In secondo luogo è possibile integrare parzialmente in questa fase le mansioni svolte dal sensing cooperativo, come avviene per alcuni protocolli opportunistici MAC. Questa fase è evocata anche in caso di necessità di migrare verso un altro vuoto spettrale, per esempio in seguito all'individuazione di un primario in procinto di trasmettere. La fase decisionale deve interfacciarsi con tutti gli strati del modello OSI: *l'application layer*, ad esempio, specifica i parametri di bit rate desiderati e il *link layer* (il secondo livello), sfruttando le informazioni fornitegli dalla funzione di decisione dello spettro, deve adottare uno schema di modulazione adeguato. Le sfide di design *cross-layer* riguardanti la fase di decisione dello spettro nascono a causa della natura dinamica del canale fisico sottostante le architetture secondarie [6]: il Round Trip Time (RTT) e la probabilità di errore variano in base al vuoto spettrale in uso e le infrastrutture secondarie devono adeguarsi rapidamente ai cambiamenti dei parametri del canale fisico. In questa fase, le decisioni effettuate devono prendere in considerazione i requisiti di QoS delle applicazioni dei secondari. Nelle CRAHN, la QoS influenza le decisioni prese da ogni singolo nodo del percorso end to end. In base alle caratteristiche dello spettro osservato, tra cui la potenza di segnale ricevuta, l'interferenza e il numero di utenti presenti, gli utenti CR devono decidere quali possono essere utilizzati per soddisfare la QoS. Dal momento che il percorso end to end passa attraverso più no-

di, la fase di decisione è strettamente legata ai protocolli di routing, per determinare la combinazione migliore della rotta con le porzioni di spettro eterogeneo disponibili. Inoltre, poiché queste combinazioni sono numerose, non è possibile considerarle tutte. In [36], si propone di calcolare la rotta in modo indipendente dalle scelte effettuate nella fase di decisione dello spettro. Questo metodo è molto semplice, ma non permette di scegliere la rotta ottimale, perché non sono considerate complessivamente le porzioni di spettro disponibili in ogni nodo. D'altra parte, stabilire le rotte e scegliere contemporaneamente i vuoti spettrali è un problema difficile.

- *Condivisione dello spettro*: è lo stadio che si occupa dell'accesso allo spettro da parte di tutti gli utenti che devono trasmettere. Durante la fase decisionale vengono fissati il canale e i parametri trasmissivi cui l'utente secondario deve attenersi, mentre in questo stadio viene attuata la politica di accesso comunitario al canale.
- *Mobilità*: quando un utente primario è in procinto di tornare a trasmettere nella porzione di spettro di sua competenza, esso sporca il canale per un tempo di guardia. In tale circostanza è necessario attuare una strategia di trasferimento al fine di non disturbare l'attività dell'utente primario in arrivo. Esistono varie soluzioni per il problema, ad esempio è possibile individuare un altro white space, oppure si può restare nello stesso canale, diminuendo la potenza trasmissiva e modificando la modulazione per non interferire con l'utente primario. La funzione di mobilità si deve integrare verticalmente con tutti gli strati del modello OSI: la migrazione verso un altro white space, infatti, può sospendere l'invio di dati in corso ed è compito di questa fase notificare all'application layer l'interruzione della trasmissione fino all'individuazione di un nuovo white space. Anche al *transport layer* deve essere notificata la modifica dei parametri trasmissivi e il conseguente aumento del ritardo a causa dell'handoff (spostamento verso un altro canale), con relativa regolazione di eventuali timeout previsti dal protocollo, o un eventuale aumento del tasso di perdita dei pacchetti. L'obiettivo primario della

fase di mobilità è quello di prevedere, anche sulla base delle informazioni di sensing a cui la funzione di mobilità può attingere, il tempo di latenza richiesto, prima causa del degrado della qualità della trasmissione, per elaborare una soluzione adeguata alla necessità di modificare il canale.

La fase di sensing è trattata ampiamente nel capitolo 3. Nei prossimi paragrafi sono analizzate le altre tre fasi del ciclo cognitivo.

### 2.4.1 La fase di decisione dello spettro

Ultimata la fase di sensing dello spettro RF circostante, il dispositivo CR è a conoscenza delle porzioni di banda inutilizzata, grazie alla mappa occupazionale elaborata. In base alle informazioni raccolte, esso (o la BS in sua vece se i secondari operano in modalità infrastruttura) deve caratterizzare, in un primo momento, tutti i canali disponibili e successivamente passare alla fase decisionale vera e propria, in cui se ne selezionano uno o molteplici per la trasmissione, stabilendo:

- la portante trasmissiva;
- la potenza;
- la modulazione;
- il tempo di disponibilità del canale.

La scelta dei parametri di trasmissione è frutto di due gruppi di fattori esaminati: in primo luogo i risultati dello studio delle caratteristiche fisiche del canale (interferenza, attenuazione, errori sul collegamento wireless, ritardo di trasmissione) e in secondo luogo il modello statistico del traffico generato dagli utenti primari insieme al tempo di disponibilità del vuoto spettrale [39]. I parametri fisici e statistici da tenere sotto controllo per ogni portante potenzialmente utilizzabile sono:

- *Interferenza*: alcune frequenze sono più affollate di altre, per questo motivo è necessario misurare attraverso indicatori quantitativi (come

la temperatura d'interferenza) il livello di disturbo radio presente al ricevitore e calcolare di conseguenza la potenza trasmissiva massima possibile.

- *Attenuazione*: il valore dell'attenuazione aumenta con la frequenza, pertanto a parità di potenza iniziale dell'utente secondario, la distanza massima raggiungibile diminuisce all'aumentare della frequenza portante. Non è nemmeno possibile incrementare indefinitamente la potenza iniziale per contrastare l'attenuazione, poiché ciò comporterebbe un aumento dell'interferenza sentita dai ricevitori licenziatari.
- *Error-rate*: la percentuale di errori sul totale dei bit inviati è strettamente legata alla modulazione scelta. Utilizzando una modulazione più complicata di quella binaria (quaternaria o superiore) il rate d'errore aumenta notevolmente.
- *Ritardo di trasmissione*: a parità di distanza da coprire, cambiando le condizioni di interferenza e attenuazione, può essere necessario cambiare il protocollo da utilizzare. Ne consegue che anche il tempo di elaborazione dei dati subisce aumenti o riduzioni a seconda della complessità del protocollo prescelto.
- *Modello statistico degli utenti primari*: per ogni frequenza analizzata è buona norma disporre anche del modello statistico di accesso dell'utente primario al canale. In questo modo è possibile prevedere in media gli accessi dell'utente prioritario e i suoi tempi di permanenza sul canale.
- *Tempo di permanenza*: l'utente CR dovrebbe anche conoscere il proprio tempo di permanenza sul canale per poter stimare il numero di handoff necessari. I trasferimenti di canale, infatti, impattano negativamente sulla qualità della trasmissione, pertanto è in genere opportuno optare per i canali che si presume rimarranno liberi il più a lungo possibile.

È possibile a questo punto calcolare la capacità disponibile per ogni canale candidato ad accogliere la trasmissione secondaria, ossia il bit rate massimo ammissibile. La presenza di ricevitori primari nei paraggi influenza la potenza

massima ( $S_0$ ) e quindi la capacità. In assenza di utenti nelle vicinanze il dispositivo CR potrà trasmettere alla massima potenza, mentre se il raggio trasmissivo intercetta un'antenna primaria in fase di ricezione, il dispositivo CR dovrà diminuire la potenza e raggiungerà il proprio partner ricevente con una potenza  $S$  e un SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) più basso. Avendo a disposizione una banda  $B$ , il trasmettitore dovrà utilizzare un bit rate massimo  $C$  dato dalla formula [6]:

$$C = B \log \left( 1 + \frac{S}{N+1} \right)$$

in cui i parametri  $S$ ,  $N$  e  $I$  sono riferiti all'utente CR ricevente. Il  $SINR = \frac{S}{N+1}$  e in particolare il numeratore  $S$  sono limitati dalla presenza di utenti primari. Finora il parametro  $C$  è l'unico utilizzato per caratterizzare la QoS fornita dai vari vuoti spettrali, ma si potrebbero fondare le scelte anche valutando il ritardo, il BER o il tempo di disponibilità. I passi decisionali per la selezione del miglior canale sono:

1. Caratterizzazione del traffico da inviare e dei canali disponibili: il trasmettitore CR deve costruire un modello descrittivo dei parametri di QoS richiesti per traffico da inviare, definendone:
  - Bit rate;
  - BER massimo;
  - Ritardo massimo;
  - Banda occupata.

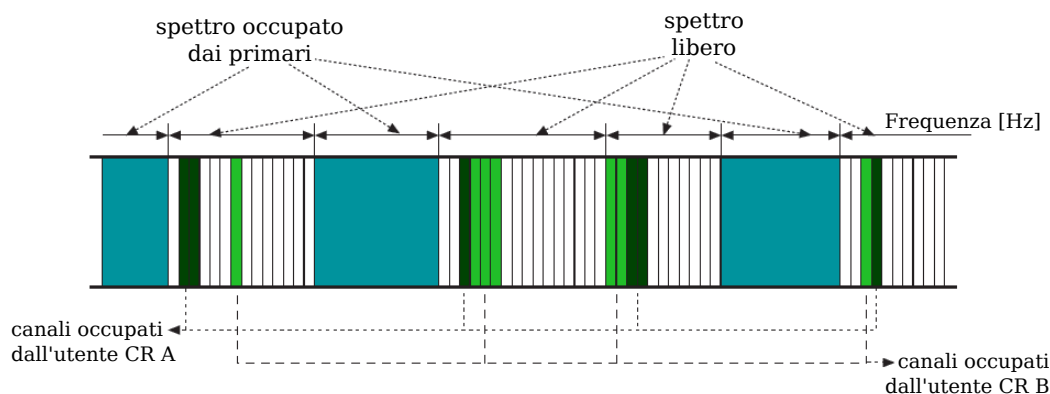
Ogni canale è, a sua volta, definito dai parametri sopraindicati (capacità offerta, error-rate, attenuazione, ...).

2. Gli utenti CR scelgono di accedere alle porzioni libere di spettro in base ai requisiti del proprio traffico. Esistono due modalità di accesso: monobanda e multi banda.
  - *Monobanda*: ogni utente CR riserva la capacità di cui ha bisogno su una singola frequenza portante e la cambia non appena questa

è reclamata da un utente primario. Questo comporta un'interruzione della trasmissione durante l'handoff, per un tempo più o meno lungo. Visto che non c'è nessuna garanzia sulla disponibilità di una porzione di banda per tutta la durata di una comunicazione secondaria, è importante considerare l'utilizzo dello spettro da parte dei primari. Per descrivere, quindi, la natura dinamica delle reti cognitive, è stata introdotta una nuova metrica, chiamata attività degli utenti primari, che è definita come la probabilità che un utente primario utilizzi le stesse occupate dai secondari durante le loro comunicazioni [25].

- *Multi banda*: ogni utente CR distribuisce i dati da trasmettere su più portanti libere non contigue, in modo tale che in caso di handoff la trasmissione non sia interrotta. Ad esempio, la Figura 2.7 mostra il caso in cui le trasmissioni di ogni utente secondario avvengono su più canali non adiacenti. Un ulteriore vantaggio di questo modello che suddivide il traffico originario a velocità  $R$  in  $k$  flussi paralleli (ognuno con un rate pari a  $R/k$ ) centrati su diverse frequenze e con potenze piccole, consiste nel fatto che per ogni singola portante la potenza trasmessa è più bassa, limitando così i problemi di interferenza con i ricevitori primari.

Al termine della fase di decisione, i dispositivi secondari selezionano un insieme di possibili combinazioni di frequenze da utilizzare. Durante la fase di condivisione, gli utenti devono concordare l'allocazione finale dei canali, al fine di scongiurare le collisioni tra i dispositivi secondari.



**Fig. 2.7:** Fase di decisione dello spettro in modalità multi banda.

## 2.4.2 La fase di condivisione dello spettro

Una volta decisa l'associazione tra il traffico da inviare e la possibile frequenza libera da utilizzare, secondo i criteri adottati nella fase di decisione, i dispositivi CR devono accedere al canale senza generare collisioni. Le problematiche affrontate nella fase di condivisione sono simili ai protocolli di livello MAC, che gestiscono le contese d'ingresso al canale comune, con i requisiti aggiuntivi di ridurre al minimo le probabilità di collisione tra i secondari stessi e di interferenza con gli utenti primari. L'accesso al canale può essere *intra-rete* o *inter-rete*: nel primo caso gli utenti sono tutti appartenenti alla stessa rete cognitiva, nel secondo sono presenti più reti cognitive tra loro collegate da uno spectrum broker [23]. Inoltre in entrambi i casi l'accesso può essere gestito o da un'entità centrale, come una base station secondaria (*modalità infrastruttura*) o in *modalità ad-hoc* (ossia ogni dispositivo prende parte al processo decisionale).

I criteri per l'attuazione della fase di condivisione dello spettro si basano su due differenti filosofie operative: da un lato sono stati proposti numerosi meccanismi che puntano ad ottimizzare la strategia d'accesso, mentre dall'altro le tecniche più innovative fanno riferimento alla teoria dei giochi. Inoltre, si può considerare anche una terza classificazione per la fase di condivisione dello spettro, in base alla tecnologia di accesso utilizzata [28]. Per la prima

logica d'accesso i meccanismi sono classificati in:

- *Condivisione centralizzata*: l'allocazione dello spettro e le procedure di accesso sono controllate da un'unità centrale, che assegna le risorse agli utenti CR in un'area geografica limitata e per un determinato periodo di tempo;
- *Condivisione distribuita*: l'allocazione dello spettro e l'accesso sono effettuati dagli utenti CR per mezzo di politiche locali o globali.

I risultati ottenuti nella modalità distribuita, in termini di probabilità di collisione tra i secondari, si avvicinano a quelli ottenuti con quella centralizzata, al crescere del numero di messaggi scambiati tra i nodi [8].

Per la strategia d'accesso fondata sulla teoria dei giochi, invece, la classificazione prevede:

- *Condivisione cooperativa dello spettro*: gli utenti secondari, nell'accedere al canale, tengono in considerazione gli effetti che la loro trasmissione avrebbe sui nodi circostanti. I secondari, quindi, si scambiano a vicenda le misure relative all'interferenza subita e in base a tali dati viene elaborata la strategia migliore di accesso allo spettro. Una tecnica comune è quella di creare dei cluster di nodi che condividono localmente le informazioni sull'interferenza. Questa soluzione rappresenta un bilancio degli schemi di condivisione centralizzata e distribuita descritti precedentemente.
- *Condivisione autonoma dello spettro*: ogni utente secondario, sulla base delle proprie osservazioni dirette, comunica ai nodi circostanti la sua intenzione di appropriarsi del canale [40]. Si tratta dunque di una sorta di accesso a contesa, in cui il nodo che per primo reclama il canale, ha diritto di servirsene per un tempo necessariamente limitato. Questo approccio non è particolarmente efficiente nello sfruttamento dei vuoti spettrali, ma permette una gestione rapida di accesso al canale, riducendo il numero di messaggi scambiati tra i nodi, rispetto agli schemi cooperativi.



Infine, la fase di condivisione dello spettro si distingue in base alla tecnologia di accesso, che può essere:

- *overlay*: i nodi secondari accedono ad una porzione dello spettro inutilizzata dai primari. Questo permette di minimizzare l'interferenza con i primari.
- *underlay*: si utilizzano tecnologie ad ampio spettro (*spread spectrum*) in modo che le trasmissioni dei secondari siano considerate come rumore dai primari.

Le tecniche *underlay* possono utilizzare una banda più larga, al costo di una complessità maggiore.

In seguito al termine della fase di sensing e di decisione dello spettro, ciascun secondario seleziona il canale da utilizzare e i parametri trasmissivi. La fase di condivisione, che consente il coordinamento dell'accesso fra tutti i terminali cognitivi, consta di tre fasi successive:

- *Accesso allo spettro*: è possibile che più secondari collocati nella stessa area, decidano di sfruttare lo stesso vuoto spettrale per le proprie comunicazioni. Per evitare collisioni è necessario implementare un protocollo di accesso opportunistico a minimo tasso di collisione possibile. Le interferenze tra secondari, nonostante non siano denotate dalla gravità tipica di un'interferenza con un primario, devono ugualmente essere affrontate.
- *Handshake tra trasmettitore e ricevitore*: al termine della fase di coordinamento, il trasmettitore deve informare il ricevitore del canale scelto, in modo da permettergli di sintonizzarsi sulla portante adeguata. Lo scambio di questo tipo di informazione è in genere attuato sul canale di controllo se i secondari sono organizzati in modalità ad-hoc, mentre viene coinvolta la base-station nel caso di modalità infrastruttura.
- *Trasmissione effettiva dei dati*: il trasmettitore può, a questo punto, finalmente procedere con la sua comunicazione. I secondari sono, comunque, considerabili come ospiti dello spettro e devono sempre essere

pronti ad avviare la fase di mobilità, non appena le circostanze che hanno consentito la trasmissione dovessero venir meno.

### 2.4.3 La fase di mobilità

La fase di mobilità interviene nel caso in cui le condizioni trasmissive del vuoto spettrale selezionato si siano deteriorate per fattori di svariata natura, rendendo impossibile la trasmissione, oppure se è apparso nel frattempo un utente primario che ha reclamato il canale in uso del secondario. L'obiettivo basilare di questo stadio del ciclo cognitivo è da un lato quello di individuare rapidamente un nuovo white space verso cui migrare (*handoff*), che garantisca la stessa qualità dei parametri trasmissivi e dall'altro gestire a tutti i livelli dello strato OSI l'interruzione della trasmissione, rendendoli trasparenti all'*handoff* e al conseguente tempo di latenza. Gli algoritmi che implementano la fase di mobilità devono essere versatili dal punto di vista protocollare [6]. Ad esempio, nel caso di una connessione TCP è necessario ricalcolare i parametri in seguito all'*handoff* e assicurarsi che il passaggio dal vecchio al nuovo regime trasmissivo sia realizzato rapidamente. Nel caso di una comunicazione FTP, invece, l'algoritmo addetto alla gestione della mobilità deve memorizzare i pacchetti dati nell'attesa di ristabilire la connessione su un nuovo vuoto spettrale. Questo provvedimento, invece, non si rende necessario nel caso di traffico real time, visto che il ritardo di trasmissione renderebbe inutilizzabile i dati differiti. La fase di mobilità è attualmente un argomento aperto alla ricerca, poiché la sua applicazione risulterà cruciale nell'ambito delle reti cognitive mobili: in tali architetture la fase di mobilità sarà avviata non appena l'utente radio-cognitivo si muove in corrispondenza del raggio di copertura di una nuova base-station. Nella nuova cella, infatti, potrebbero essere disponibili nuovi canali radio di cui effettuare il sensing ed è compito della fase di mobilità ristrutturare dinamicamente l'attività di sensing stessa.

# Capitolo 3

## Sensing

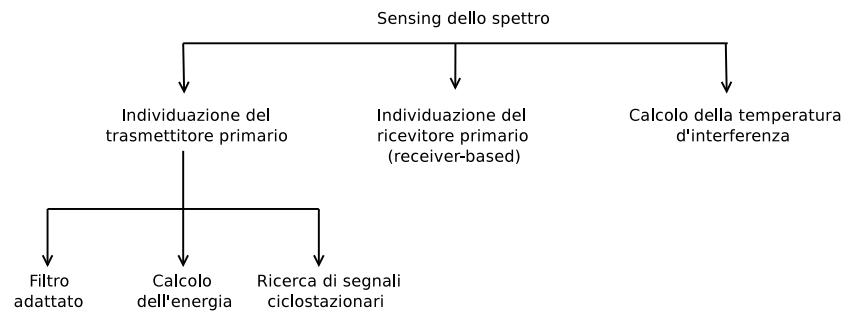
### 3.1 Il sensing dello spettro

Il sensing è la funzione più importante della radio cognitiva, perché consente di analizzare l'utilizzo dello spettro radio, per verificare la presenza di utenti primari. La definizione convenzionale di vuoto spettrale, come *una banda di frequenze che non sono utilizzate dagli utenti primari in un particolare istante e in una precisa area geografica*, data in [15], si riferisce al sensing effettuato nel dominio del tempo, dello spazio e della frequenza. Oltre a questi tre ambiti, esistono altre dimensioni che possono essere utilizzate per effettuare le operazioni di sensing, come ad esempio quella del codice e quella relativa all'angolo di arrivo del segnale, nel caso in cui i primari non trasmettano in tutte le direzioni. Quest'ultimo caso può trarre vantaggio dalle tecnologie multi-antenna, come il *beamforming*, per mezzo del quale più utenti possono essere multiplati nello stesso canale, allo stesso tempo e nella stessa area geografica [38]. Queste tecnologie consentono di creare delle altre opportunità di trasmissione per i secondari, in un'altra dimensione rispetto a quella utilizzata dai primari. Considerando tutte le possibili dimensioni, lo spazio radio può essere definito come un iperspazio, condiviso dagli utenti primari e da quelli secondari [14]. Tuttavia, l'estensione del sensing in tutti gli ambiti possibili richiede tecniche di elaborazione dei segnali sempre più avanzate e una complessità sempre maggiore.

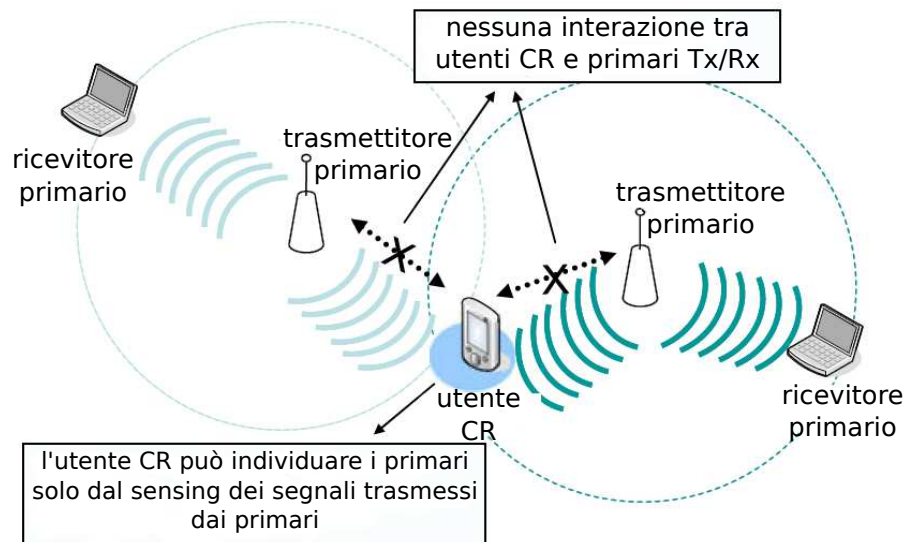
Non potendo l'utente CR interagire in alcun modo con i primari per verificarne la presenza, sono state introdotte tecniche di sensing basate sull'individuazione indiretta:

- del trasmettitore (transmitter-based), come mostrato in Figura 3.2;
- del ricevitore (receiver-based);
- della temperatura di interferenza.

La Figura 3.1 mostra la classificazione dettagliata di tali tecniche.



**Fig. 3.1:** Classificazione dei metodi di individuazione degli utenti primari.



**Fig. 3.2:** Tecniche di sensing basate sull'individuazione dei trasmettitori primari.

### 3.1.1 Individuazione del trasmettitore

Il segnale ricevuto dall'utente CR è il solo rumore AWGN  $n(t)$ , se il canale ascoltato è libero (ipotesi  $H_0$ ), oppure viene rilevato un segnale  $x(t) = s(t) + n(t)$  se è presente un utente primario attivo (ipotesi  $H_1$ ). Il segnale  $r(t)$  ricevuto in fase di sensing dall'utente secondario potrà, dunque, essere espresso come [20]:

$$r(t) = \begin{cases} n(t), & \text{se } H_0 \\ h_{PU-SU}s(t) + n(t) & \text{se } H_1 \end{cases} \quad (3.1)$$

dove il coefficiente  $h_{PU-SU}$  misura il guadagno del canale tra il trasmettitore primario e il dispositivo secondario, supponendo un canale tempo-invariante. Le tecniche di rilevazione transmitter-based finora più diffuse sono l'uso del filtro adattato, l'individuazione di energia al di sopra di una data soglia e la ricerca di segnali primari ciclostazionari.

#### Individuazione mediante filtro adattato

Il miglior metodo di individuazione di un qualunque segnale è il filtro adattato [9], che consente di massimizzare il rapporto segnale rumore presso il ricevitore. Se è nota a priori la forma d'onda  $s(t)$  utilizzata dall'utente primario è possibile sfruttare il calcolo della correlazione tra  $s(t)$  e il segnale  $r(t)$  misurato dall'utente CR. Se la correlazione campionata nell'istante di massimo valore  $T$  è al di sopra o al di sotto di una soglia prefissata, allora è possibile optare per l'ipotesi  $H_1$  o  $H_0$  rispettivamente. Il metodo offre le migliori prestazioni solo se sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- Sono note a priori le caratteristiche del segnale  $s(t)$  inviato dall'utente primario. In particolare il secondario deve essere a conoscenza dello schema di modulazione, della forma d'onda di base e del formato dei pacchetti inviati. Se il nodo CR disponesse di tali informazioni solo in maniera parziale o approssimativa il metodo fallirebbe. È possibile, eventualmente, sfruttare le trame di allineamento tipiche dei protocolli wireless per ricavare un segnale  $s(t)$  standard noto a priori da ricercare.

- Il dispositivo secondario deve avere la possibilità di sincronizzarsi con il segnale primario, per una demodulazione coerente. Tale operazione può essere effettuata ancora una volta sfruttando i metodi di sincronizzazione tipici del segnale primario da individuare.
- Il dispositivo deve essere situato entro la soglia di decodifica del segnale. Oltre tale distanza il SNR ricevuto non consente di decodificare correttamente il contenuto del segnale.

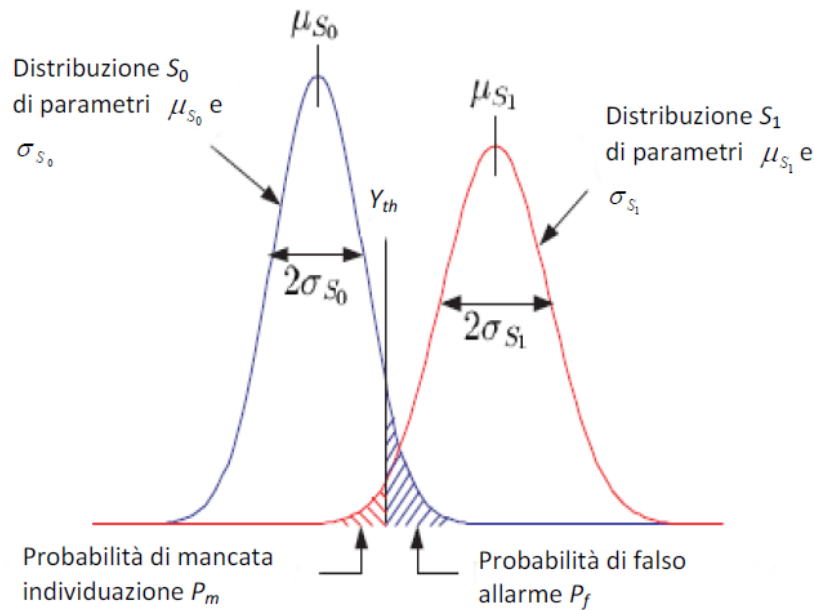
La tecnica del filtro adattato è notevolmente vantaggiosa dal punto di vista della durata temporale: sono necessari solo circa  $O(1/SNR)$  campioni per soddisfare a un dato vincolo di massima probabilità d'errore ammessa, come dimostrato in [31].

### Individuazione mediante calcolo dell'energia

Se non è nota a priori la forma d'onda di  $s(t)$  o se si preferisce una rivelazione non-coerente, è possibile calcolare l'energia  $Y$  presente nel canale ascoltato in un intervallo di osservazione di durata  $T$ . L'energia del rumore AWGN è calcolabile a priori (ad esempio in media). Se l'energia misurata sul canale fosse inferiore ad una determinata soglia ( $Y_{th}$ ), significherebbe che il canale sarebbe probabilmente libero. La probabilità di corretta individuazione dell'utente ( $P_d$ ) o di falso allarme nell'individuazione ( $P_f$ ) dipendono dal SNR e dal prodotto della banda per il tempo d'osservazione. Le due probabilità valgono:  $P_d = P(Y > Y_{th}|H_1)$  e  $P_f = P(Y > Y_{th}|H_0)$ . Per falso allarme si intende una situazione in cui il secondario, misurando erroneamente un'energia oltre la soglia, dichiara il canale occupato, mentre quest'ultimo è in realtà disponibile per una trasmissione. In modalità cooperativa il falso allarme è particolarmente deleterio, dal momento che impedisce la trasmissione a tutto il gruppo. La Figura 3.3 mostra la distribuzione (supponibile gaussiana) della potenza totale sul canale in presenza ( $S_1$ ) e in assenza ( $S_0$ ) di un segnale primario e la soglia  $Y_{th}$  decisionale. Le probabilità di mancata individuazione e di falso allarme corrispondono alle aree tratteggiate in figura. La presenza di fading (affievolimento casuale del guadagno del canale)

selettivo in frequenza inficia sul valore delle due probabilità, perché il valore dell'SNR risulta aleatorio. Valori troppo bassi di  $P_d$  portano ad alte interferenze con gli utenti primari, mentre valori troppo alti di  $P_f$  (ossia frequenti falsi allarmi del tipo  $P(Y > Y_{th}|H_0)$ ) causano un uso inefficiente dei vuoti spettrali. La tecnica del calcolo dell'energia è un'alternativa al metodo del filtro adattato, necessaria nel caso in cui i secondari si trovino oltre la soglia di decodifica del segnale primario, ma entro la soglia di individuazione che, a fronte di un SNR ricevuto più basso, consente solo di individuare la presenza o l'assenza di segnale, senza avere la possibilità di accedere al suo contenuto. Oltre al valore casuale che l'SNR può assumere in ambienti affetti da fading, sussistono altri fattori che rendono il calcolo dell'energia un procedimento non del tutto affidabile:

- Il numero di campioni necessario per avere un'individuazione sufficientemente accurata da soddisfare i vincoli sulla probabilità  $P_d$  è dell'ordine di  $O(1/SNR^2)$  [31]. Nel caso dei segnali primari ricevuti dai nodi CR, il SNR può oscillare tra -10 e -40 dB, cioè valori di SNR inferiori all'unità. Ad esempio, nel caso dei CPE dello standard IEEE 802.22 il segnale da percepire può arrivare fino a -116 dBm, corrispondente ad un SNR di -22 dB [34]. Ne consegue che in termini di prestazioni, il tempo richiesto per il calcolo dell'energia supera quello del filtro adattato, dell'ordine di  $O(1/SNR)$ .
- L'individuazione dell'energia si limita a confermare o a negare la presenza di segnale sul canale, ma non è in grado di ottenere alcuna informazione riguardo al contenuto dello stesso. Questo metodo, quindi, non è in grado di distinguere se la sorgente del segnale sia di natura primaria, secondaria o rumorosa. Alla luce di questa inefficienza è intuibile che i casi di falso allarme, ossia canale reputato occupato da primari nonostante che il canale sia libero, siano molto più frequenti [17] [19].



**Fig. 3.3:** Distribuzione (gaussiana) della potenza di rumore ( $S_0$ ) e di segnale con rumore  $S_1$  misurabili sul canale [12].

### Individuazione mediante ricerca di segnali ciclostazionari

Gli utenti primari, per inviare i loro dati sul canale radio, devono usare modulazioni basate su onde sinusoidali. Mentre la sequenza originaria di bit è un processo casuale stazionario, cioè a media costante, il processo casuale costituito dal segnale modulato è ciclostazionario, ossia il valore medio e l'autocorrelazione manifestano periodicità. Per rilevare la presenza di un utente primario nel canale analizzato (ad esempio in uno specifico intervallo di frequenze) è quindi possibile ricercare la trasmissione di segnali di natura ciclostazionaria. Una tecnica di individuazione della ciclostazionarietà ricorre all'uso della funzione di correlazione spettrale [16]. L'autocorrelazione della trasformata di un segnale modulato (quindi ciclostazionario) è caratterizzata da alti valori per componenti spettrali relativamente lontane tra loro. Tale proprietà non si verifica invece per il rumore che, essendo incorrelato, presenta valori della funzione molto bassi. In alternativa alla funzione di autocorrelazione, in genere, si usa la funzione di correlazione spettrale (SCF). Se il valore della SCF per uno sfasamento  $\alpha = 1/T$  è al di sopra di una data

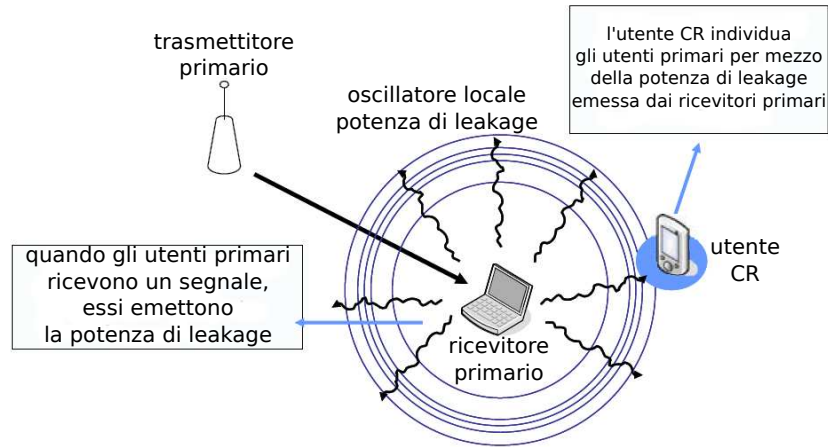


soglia, allora è presente un utente. A fronte di una complessità computazionale elevata, tale metodo consente di calcolare la correlazione del segnale modulato al netto del rumore, la cui SCF è nulla. Le prestazioni, in termini di probabilità d'errore, risultano migliori rispetto ai metodi precedenti.

Nelle CRAHN, la rilevazione di caratteristiche nel segnale primario, come la ricerca di segnali ciclostazionari, è il metodo di individuazione dei primari più efficace, ma è complesso e richiede un tempo di sensing dello spettro piuttosto lungo [4].

### 3.1.2 Individuazione del ricevitore

Il sensing cooperativo non risolve l'incertezza relativa alla posizione del ricevitore: l'interferenza con quest'ultimo è ancora una questione irrisolta. Per ovviare a tale problema è possibile focalizzare l'attenzione sull'individuazione del ricevitore primario, piuttosto che sul segnale emesso dal trasmettitore. Ogni ricevitore per poter catturare il segnale ad esso destinato deve utilizzare un oscillatore locale (ad esempio un PLL) sintonizzato sulla frequenza radio portante scelta dal mittente. Tale oscillatore emette quindi una potenza parassita, detta potenza di *leakage*, che può essere sfruttata dagli utenti CR per individuare la presenza di un ricevitore nei loro dintorni, come mostrato in Figura 3.4 [37]. I metodi per individuare il segnale emesso dall'oscillatore locale sono il filtro adattato, il rilevatore di energia e l'individuazione di segnali ciclostazionari, ossia le medesime tecniche usate per il trasmettitore con la difficoltà aggiuntiva, non indifferente, di dover discriminare il debole segnale di leakage dal rumore e dal segnale trasmesso in arrivo.



**Fig. 3.4:** Tecniche di sensing basate sull'individuazione dei ricevitori primari.

### 3.1.3 Calcolo della temperatura d'interferenza

Un altro approccio per il sensing dello spettro alla ricerca di un white space è l'utilizzo del parametro di temperatura d'interferenza  $T_I(f, B)$  [11]. Date una frequenza portante  $f$  e una banda occupata  $B$ , si può definire un parametro numerico  $T_I$  che indichi quantitativamente l'entità dell'interferenza generata da altre fonti e presente presso il ricevitore primario (Primary Receiver, PRX) del segnale licenziatario. In genere, per garantire una trasmissione primaria con una qualità adeguata, è fissato un limite massimo di tale temperatura. La temperatura di interferenza ha, dunque, un ruolo del tutto simile alla temperatura di rumore, ma differisce dal rumore AWGN, poiché l'interferenza in un dato ambiente è indipendente dall'ampiezza della banda  $B$  ed è deterministica, cioè nota a priori. La temperatura d'interferenza è calcolata come

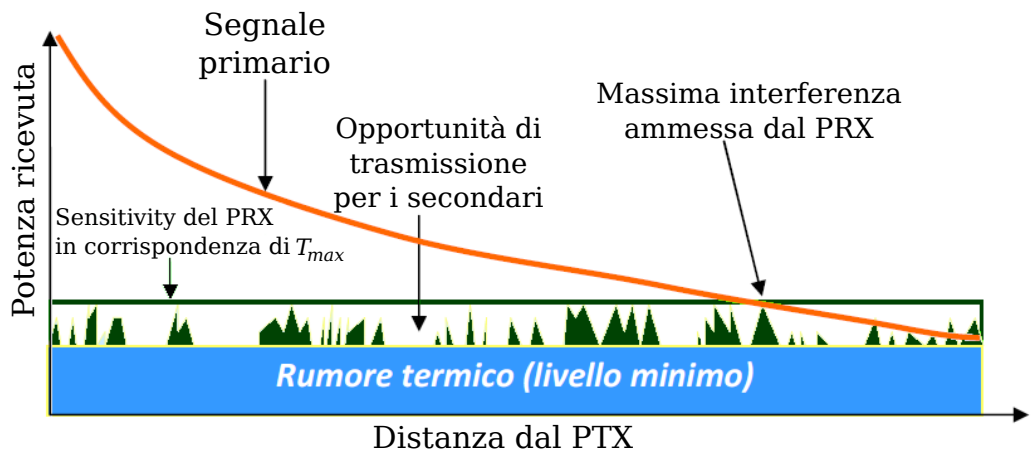
$$T_I(f, B) = \frac{P_I(f, B)}{kB} \quad (3.2)$$

dove  $P_I$  esprime la potenza totale dell'interferenza (in questo caso la somma dei segnali secondari) e  $k$  è la costante di Boltzmann. Un utente CR interessato a trasmettere su una frequenza  $f$ , può misurarne la relativa temperatura d'interferenza e, se fosse sufficientemente al di sotto della soglia massima ammessa, può aggiungere il proprio traffico senza perdite di qualità

per il ricevitore primario. La temperatura d'interferenza viene calcolata in base alla frequenza portante  $f_c$  e alla banda  $B$  del ricevitore (o dei ricevitori) primari. Data una banda radio ampia  $B$ , al suo interno sono presenti  $n$  ricevitori licenziatari, ciascuno sintonizzato su una sotto portante  $f_i$  e con banda occupata  $B_i (1 \leq i \leq n)$ . Un utente CR intenzionato a trasmettere una potenza  $P$  su una delle  $n$  sotto portanti  $f_i$  a banda  $B_i$  dovrà verificare che sia rispettato il vincolo

$$T_i(f_i) + \frac{MP}{kB_i} \leq T_{max}(f_i) \quad (3.3)$$

per ogni canale  $i$ -esimo analizzato ( $1 \leq i \leq n$ ).  $M_i$  è un coefficiente compreso tra 0 e 1 che tiene conto dell'attenuazione tra l'utente CR e il ricevitore primario. Se non fosse nota la distanza tra i due dispositivi, si potrebbe utilizzare un valore costante  $M$ . In Figura 3.5 è rappresentato il limite minimo di potenza necessario al ricevitore primario (PRX), per poter decodificare correttamente il segnale ad esso destinato e le occasioni di trasmissione secondarie.



**Fig. 3.5:** Individuazione dei vuoti spettrali mediante la tecnica del calcolo del parametro di temperatura di interferenza  $T_I$ .

La temperatura massima  $T_{max}$  deve tener conto anche della distanza dal

trasmettitore primario: a causa dell'attenuazione, la potenza del segnale primario si affievolisce, avvicinandosi sempre più al livello minimo del rumore termico. Ad una distanza elevata dall'antenna primaria, il segnale risulta debole e l'aggiunta di interferenza può rendere indistinguibile il traffico utile dal rumore. I principali svantaggi di questa tecnica, comunque innovativa, sono:

- la necessità, per il nodo secondario, di conoscere con precisione la posizione di tutti i ricevitori, sia secondari, sia primari nel suo raggio di trasmissione. Ciascun secondario, infatti, deve conoscere con esattezza la distanza che intercorre tra esso e i ricevitori, al fine di poter calcolare l'interferenza che causerebbe una sua eventuale trasmissione. Nel migliore dei casi ciò richiederebbe un sistema di localizzazione per ogni nodo secondario [32];
- l'impossibilità per gli utenti CR di distinguere tra il segnale primario e altre fonti di interferenza;
- i limiti per la rete primaria nell'allocare la propria banda libera se essa fosse soggetta a valori incostanti di interferenza: gli utenti CR potrebbero essere soggetti a sbalzi dei valori della banda libera, con difficoltà a garantire una QoS costante.

### 3.1.4 Sensing dello spettro negli attuali standard wireless

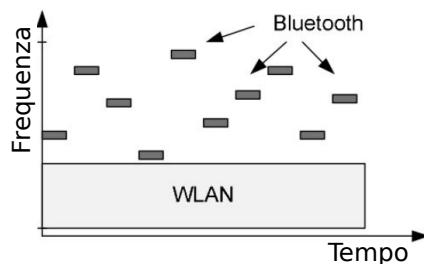
Alcuni standard wireless recenti includono delle funzioni di sensing, tipiche dei terminali cognitivi, anche se non ancora sono estese su tutto lo spettro radio, né lo utilizzano in modo opportunistico. Comunque, la conoscenza dello spettro può essere utilizzata per algoritmi di ricezione sofisticati e per l'annullamento adattativo dell'interferenza. Di seguito sono riportati alcuni standard che implementano una tipologia di sensing dello spettro per scopi adattativi o per l'accesso dinamico alla frequenza.

- **IEEE 802.11k**: è un'estensione dello standard IEEE 802.11 e, in questo caso, la fase di sensing è rappresentata da diversi tipi di misurazioni,

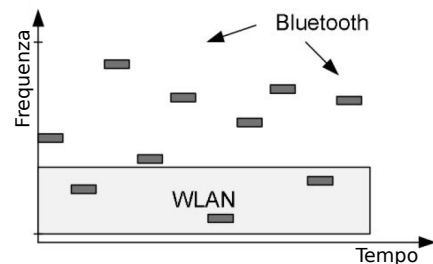
come il carico del canale e il livello del rumore [1]. Quest'ultimo rappresenta il livello di interferenza ricevuta da un terminale, presente su un canale, cioè indica tutta l'energia dei dispositivi non 802.11. L'access point raccoglie tutte queste informazioni da ogni singola mobile station, per regolare l'accesso a un determinato canale. Questi dati di sensing sono utilizzati anche per migliorare la distribuzione del traffico nella rete. Infatti, i dispositivi 802.11 si collegano di solito agli access point dai quali ricevono i segnali con potenze maggiori. In alcuni casi, questa scelta potrebbe non essere quella ottima e potrebbe portare al sovraccarico di un access point, senza utilizzare le risorse offerte da altri AP. Quindi, anche se una mobile station si collegasse ad un AP dal quale ricevesse un segnale debole, il throughput complessivo del sistema migliorerebbe, grazie ad un uso più efficiente delle risorse.

- **Bluetooth:** Bluetooth utilizza una tecnica chiamata Adaptive Frequency Hopping (AFH), per ridurre l'interferenza degli altri dispositivi wireless che lavorano attorno alla stessa frequenza di 2.4 GHz, quali i terminali IEEE 802.11b/g, i telefoni cordless e i forni a microonde [21]. La tecnologia AFH consente di rilevare le altre trasmissioni nella banda ISM ed evita di utilizzare le stesse frequenze, così da prevenire le interferenze e migliorare il bit error rate. Per il funzionamento di AFH, è richiesto un algoritmo di sensing che determina se sono presenti altri dispositivi nella banda ISM. Questo algoritmo è basato sulle statistiche collezionate e determina quali sono i canali liberi e quelli occupati. Queste statistiche possono essere il packet error rate, il BER, l'indicatore della potenza di segnale ricevuta, oppure altre ancora e sono utilizzate per classificare i canali come buoni, brutti, o sconosciuti [2]. La Figura 3.6 mostra il funzionamento di Bluetooth con AFH, mentre la Figura 3.7 mostra il funzionamento senza AFH. Nel primo caso, si nota che le collisioni con gli utenti WLAN possono essere prevenute grazie all'algoritmo di sensing AFH.
- **IEEE 802.22:** questo standard è conosciuto come lo standard della tecnologia radio cognitiva e definisce una rete wireless di dimensioni

regionali [12]. Questo standard è ancora in fase di sviluppo e una delle caratteristiche che lo distinguono dagli altri è proprio il sensing dello spettro. I dispositivi IEEE 802.22 identificano le opportunità trasmissive tra le frequenze dei canali televisivi. I requisiti di funzionamento sono una probabilità di rilevazione dei segnali primari di almeno 90% e una probabilità di falso allarme massima pari a 10% con una potenza pari a -116 dBm o superiore. Il sensing è diviso in due fasi: fast sensing e fine sensing. Nella prima fase è implementato un algoritmo di sensing poco accurato, come il calcolo dell'energia. Successivamente avviene la fase di fine sensing, che è più precisa, grazie a metodi più efficaci, come quelli descritti nel paragrafo 3.1.1. La base station può distribuire il carico di sensing tra gli utenti, dai quali poi riceve i risultati che servono per gestire le trasmissioni. Questo è un esempio pratico di sensing cooperativo centralizzato.



**Fig. 3.6:** Bluetooth previene le collisioni con le trasmissioni WLAN, grazie ad AFH.



**Fig. 3.7:** Trasmissioni Bluetooth che collidono con quelle WLAN, senza AFH.

## 3.2 Il sensing cooperativo

I metodi di individuazione del trasmettitore primario fin qui illustrati evidenziano delle grandi lacune, tra cui:

- *L'incertezza sulla posizione del ricevitore:* anche se un utente CR identificasse la presenza del trasmettitore, non sarebbe comunque in grado

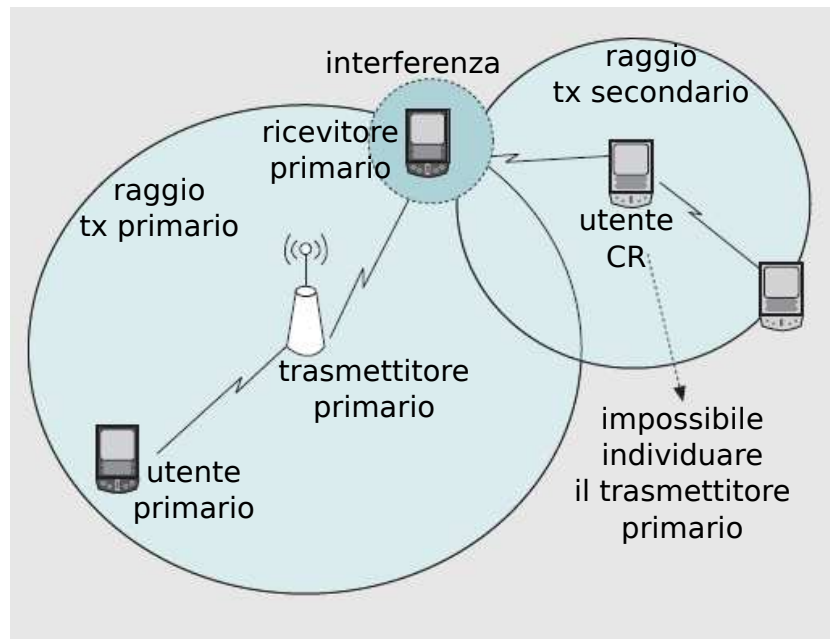
di ottenere informazioni più precise, come la posizione geografica dei PTX (Primary Transmitter) o dei ricevitori, poiché non è prevista la comunicazione tra utenti primari e secondari. Nel caso in cui il dispositivo radio-cognitivo utilizzi la stessa frequenza di un trasmettitore primario ritenuto lontano a sufficienza, è comunque possibile che un ricevitore primario si trovi a cavallo tra le due aree, con conseguente interferenza. La Figura 3.8a rappresenta uno scenario di questo tipo, denominato problema del terminale nascosto (in questo caso il ricevitore primario). Un'inefficienza, invece, è rappresentata dal caso del terminale esposto, rappresentato in Figura 3.8b: il trasmettitore secondario si trova nel raggio di copertura del trasmettitore primario, ma non è nei paraggi dal ricevitore. In fase di sensing il secondario avvertirà la presenza del PTX nei paraggi e inibirà la trasmissione, nonostante la lontananza del ricevitore primario. Le questioni del terminale nascosto ed esposto sono due sfaccettature del problema più generico di incertezza sulla posizione del ricevitore.

- *Shadowing e fading*: un utente CR, situato in prossimità di un ostacolo, potrebbe risultarne schermato e non percepire, quindi, il segnale emesso da un utente primario vicino (*shadowing*, illustrato in Figura 3.9). Oppure, un canale radio può, in un certo istante di tempo, mostrare un guadagno così basso da portare il livello di potenza del segnale allo stesso di quello del rumore, nascondendo di fatto la presenza del traffico primario (*fading*). In questi casi, l'utente secondario, reputando erroneamente libero il canale e non potendo verificare l'effettiva presenza di un trasmettitore primario, ritiene di potersi appropriare della frequenza analizzata, causando interferenza per i ricevitori licenziatari nei paraggi. Si consideri, a tal proposito, il caso di trasmissioni digitali TV su una banda ampia 6 MHz. I ricevitori devono possedere una sensibilità pari a -83 dBm, mentre il rumore termico per questo tipo di canale vale -106 dBm. Un terminale cognitivo deve essere in grado di percepire la presenza di una trasmissione primaria fino ad un'attenuazione ulteriore di 30 dB. Pertanto la sensitivity di un utente CR dovrà essere di -113

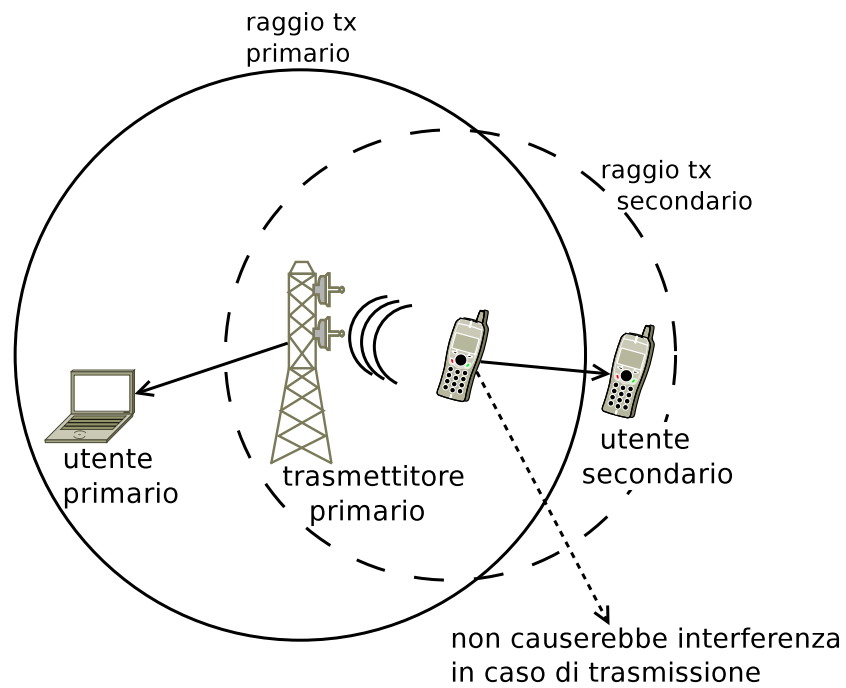
dBm, un valore al di sotto del livello del rumore termico. È opportuno ricordare che l'individuazione di segnali inferiori alla soglia del rumore non è impossibile, ma semplicemente più difficile rispetto al caso sopra soglia: i segnali meno intensi possono quindi essere rilevati con un maggiore sforzo, ad esempio sfruttando di preamboli noti presenti nella trama primaria [29].

- *La soglia dell' $SNR_{wall}$* : i terminali CR devono essere in grado di percepire segnali primari anche molto deboli, con SNR che possono oscillare tra -10 e -40 dB. È tradizionalmente condivisa l'idea secondo cui l'aumento del numero di campioni nel dominio del tempo, incrementi anche la robustezza dei secondari, intesa come la capacità di individuare i segnali meno intensi. Tuttavia, ipotizzando un rumore termico non costante, è stato dimostrato che, al raggiungimento di una soglia minima detta  $SNR_{wall}$  da parte del rapporto segnale-rumore, un aumento della complessità di campionamento condurrebbe non solo a tempi di sensing troppo elevati, ma anche alla necessità di ottenere un numero asintoticamente infinito di campioni per l'individuazione del segnale stesso [31]. L'adozione di tecniche di sensing cooperativo possono, quindi, aggirare tale barriera, consentendo di diminuire il tempo necessario all'individuazione del segnale primario da un lato e di usare sensibilità più alte per ogni singolo nodo cognitivo dall'altro.





(a)



(b)

**Fig. 3.8:** Scenario di terminale nascosto (a) ed esposto (b).

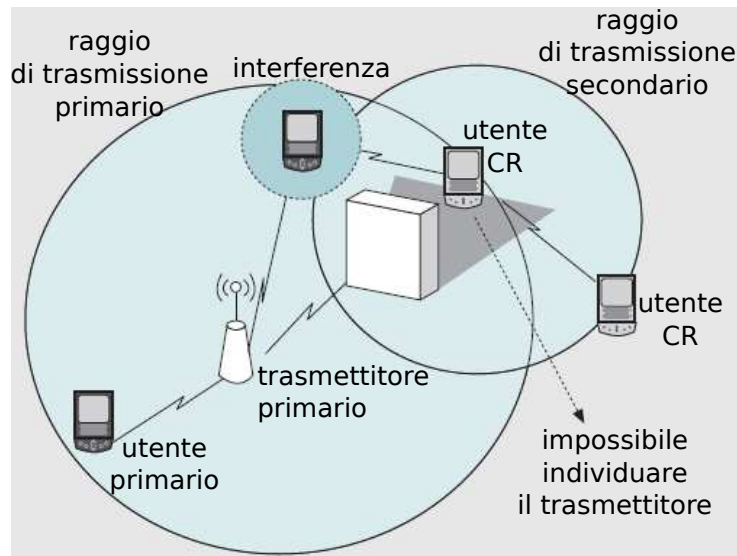


Fig. 3.9: Effetto dello shadowing sulla fase di sensing.

### 3.2.1 Prestazioni del sensing cooperativo

Al fine di superare tali impedimenti, è necessario pertanto che gli utenti CR collaborino tra di loro, condividendo le informazioni locali raccolte singolarmente (ad esempio mediante i metodi del filtro adattato), per una corretta localizzazione dei dispositivi primari: tale sistema collaborativo prende il nome di *sensing cooperativo*. Quest'ultimo risulta particolarmente efficace in ambienti con un considerevole numero di ostacoli e agenti schermanti. Se un trasmettitore primario non potesse essere individuato da un utente CR a causa di una barriera (shadowing), oppure il secondario ricevesse solamente gli echi secondari affievoliti e distorti a causa dei ritardi e delle fasi relative ai singoli percorsi (fading multi-path), sarebbe molto probabile che esso possa essere rilevato da un altro nodo CR collocato altrove nei dintorni. Confrontando le prestazioni dei due metodi di sensing disponibili (cooperativo e non), in termini di probabilità di corretta rilevazione ( $Q_d$  e  $P_d$ ) e di falso allarme ( $Q_f$  e  $P_f$  rispettivamente), si può verificare che valgono le relazioni illustrate in Tabella 3.1.

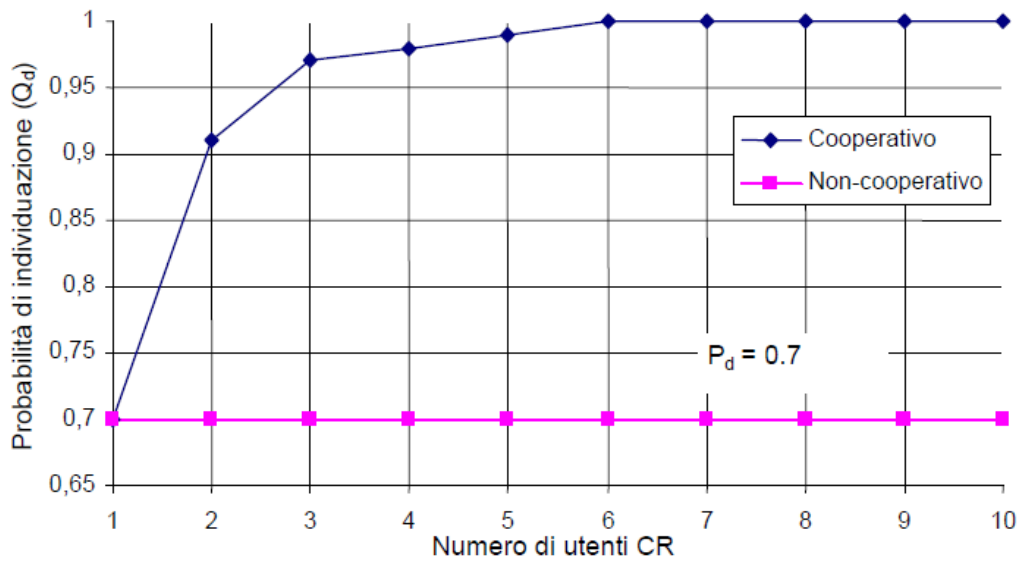
Per il calcolo di  $Q_d$  (per  $Q_f$  vale il medesimo procedimento) è necessario tenere presente che si ha una corretta individuazione dell'utente primario

Tipo di sensing	Probabilità di corretta individuazione	Probabilità di falso allarme
Non cooperativo (singolo dispositivo CR)	$P_d$	$P_f$
Cooperativo (n dispositivi CR identici)	$Q_d = 1 - (1 - P_d)^n$	$Q_f = 1 - (1 - P_f)^n$

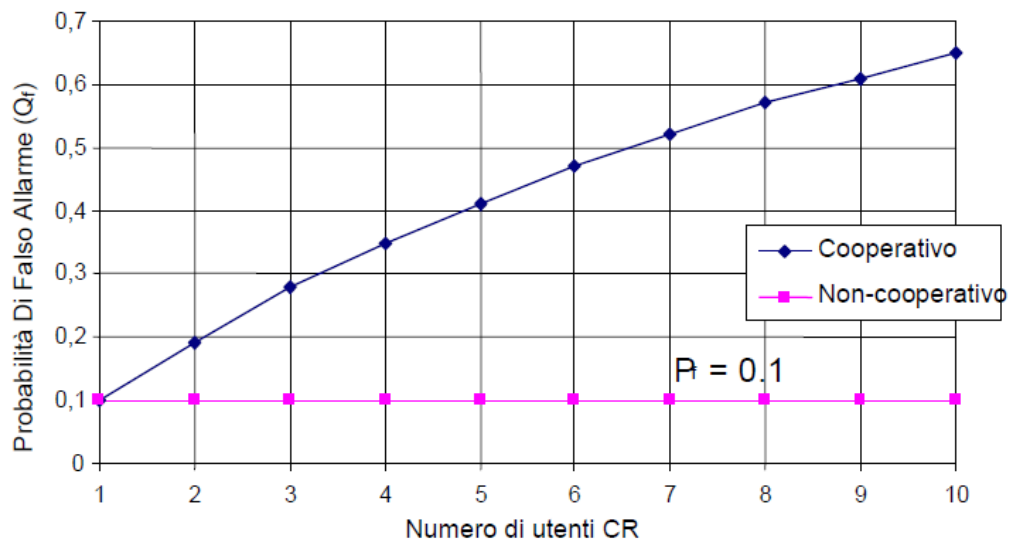
**Tabella 3.1:** Probabilità di corretta individuazione e di falso allarme nel caso individuale e cooperativo.

se almeno uno degli utenti secondari tra gli  $n$  partecipanti al sensing rileva correttamente la presenza dell'utente licenziatario. Tale probabilità è il valore complementare del caso in cui nessun utente individui il trasmettitore primario, ossia la probabilità  $P_m^n = (1 - P_d)^n$ , essendo  $P_m = (1 - P_d)$  la probabilità di *miss*, ossia di mancata individuazione di un primario. È evidente che all'aumentare di  $n$  aumenta la probabilità di corretta individuazione, ma lo stesso comportamento aumenta, purtroppo, anche la probabilità di falso allarme, come rappresentato in Figura 3.10. Nel caso di Figura 3.10a è interessante osservare che il numero di utenti che partecipano al sensing cooperativo non deve essere eccessivamente alto. È infatti sufficiente selezionare utenti cognitivi spazialmente incorrelati, dal momento che l'aggiunta al gruppo di un utente CR spazialmente correlato con uno o più già appartenenti al gruppo, non apporterebbe alcun ulteriore contributo alle informazioni collezionate. L'andamento di Figura 3.10b sussiste dietro l'ipotesi di utilizzare un metodo di sensing che non consenta al dispositivo CR di distinguere se il segnale percepito sia di natura primaria, secondaria o rumorosa, collocandosi così in una situazione in cui una trasmissione secondaria potrebbe essere identificata erroneamente con una primaria (falso allarme).

Un ulteriore vantaggio del sensing cooperativo riguarda la possibilità di ovviare al problema del  $SNR_{wall}$ : shadowing e fading possono costringere gli utenti secondari ad adottare soglie di sensibilità particolarmente basse. Grazie alla cooperazione è possibile mitigare i requisiti di sensitivity dei secondari. La Figura 3.11 mostra il guadagno di cooperazione, ossia il margine di cui è possibile innalzare la soglia di sensitivity dei dispositivi secondari grazie ai benefici apportati dalla collaborazione in fase di sensing [29].

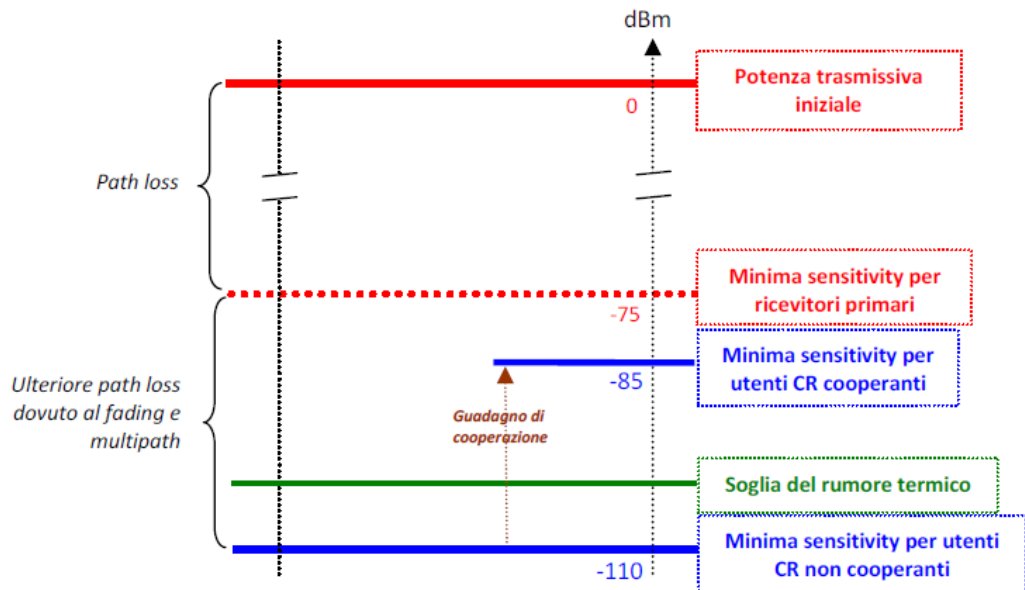


(a)



(b)

**Fig. 3.10:** Andamento della probabilità di corretta individuazione (a) e di falso allarme (b) nel caso di sensing cooperativo e individuale in funzione del numero di dispositivi CR cooperativi.



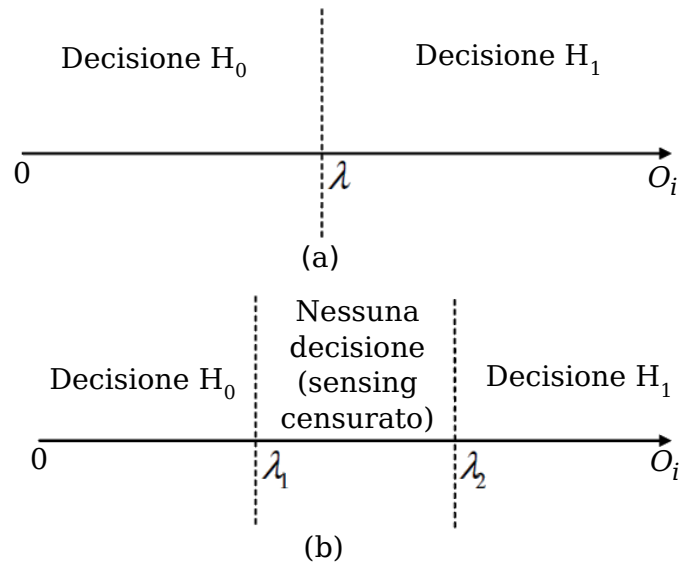
**Fig. 3.11:** Margine del guadagno derivante dalla cooperazione in fase di sensing.

### 3.2.2 Classificazione del sensing cooperativo

In base all'infrastruttura in cui è organizzata la rete secondaria si possono individuare due meccanismi di sensing cooperativo:

***Sensing cooperativo centralizzato:*** se i secondari sono gerarchicamente dipendenti da una base-station centrale che coordina le trasmissioni, concedendo l'autorizzazione a trasmettere ai terminali cognitivi che ne fanno richiesta (modalità infrastruttura), si può affidare anche la gestione del sensing a tale entità centrale. Diventa quindi compito della BS interrogare un sottoinsieme di utenti CR, le cui collocazioni geografiche siano sufficientemente incorrelate, per ottenere una fotografia dello stato occupazionale dello spettro nell'area di competenza della BS. I singoli dispositivi secondari, interpellati in seguito alla richiesta dell'antenna centrale, convergono verso di essa i risultati finali della loro fase di sensing diretto. La BS, in qualità di unità elaborativa centralizzata, genera una mappa relativa alle bande occupate e libere e offre ai

dispositivi il diritto di trasmettere, in base alle esigenze di ciascuno. Il sensing cooperativo centralizzato può essere applicato anche in modalità ad-hoc: gli utenti secondari devono autonomamente suddividersi in gruppi, ognuno dei quali deve eleggere un'unità elaborativa centralizzata (nodo leader) che possieda i necessari requisiti di autonomia energetica e capacità computazionali. Nel caso in cui il numero di utenti secondari sia elevato, la banda richiesta per inviare le informazioni di sensing al nodo centrale diventa troppo grande. Per ridurla, i risultati della fase di sensing possono essere quantizzati in un solo bit (decisioni hard) e raccolti dall'unità centrale, per mitigare gli effetti del fading dei canali e migliorare la probabilità di individuazione dei primari [22]. Inoltre, solo i terminali con delle informazioni di sensing affidabili potrebbero inviarle all'unità centrale. Questo comporta la censura delle informazioni di alcuni nodi. L'identificazione dei primari può essere effettuata con un sistema a singola o a doppia soglia [33]. Facendo riferimento alla Figura 3.12, la decisione sulla presenza di utenti primari nelle circostanze è presa confrontando i risultati della fase di sensing con una soglia (caso (a)). Ad esempio, ogni utente  $i$  può utilizzare il metodo di individuazione basato sul calcolo dell'energia e confrontare l'energia ricevuta  $O_i$  con la soglia  $\lambda$ . Se  $O_i > \lambda$  si assume la presenza di utenti primari (decisione  $H_1$ ), altrimenti si prende la decisione  $H_0$ . Nel caso (b), invece, l'energia ricevuta è confrontata con due soglie  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . Le decisioni  $H_0$  e  $H_1$  rappresentano rispettivamente l'assenza e la presenza di utenti primari, mentre il caso senza decisione significa che l'osservazione effettuata in fase di sensing non è abbastanza affidabile per stabilire la presenza dei primari. Il secondario  $i$ -esimo, quindi, comunica i propri risultati solo per quanto riguarda le decisioni  $H_0$  e  $H_1$ , mentre non riporta quelli ottenuti nei casi senza decisione, che sono censurati. Questo comporta una riduzione delle informazioni riportate al nodo centrale, rispetto al caso (a) con una singola soglia.



**Fig. 3.12:** (a) Metodo convenzionale di identificazione dei primari con una soglia singola; (b) Censura delle informazioni di sensing con un sistema a doppia soglia.

**Sensing cooperativo distribuito:** quando i secondari sono organizzati in modalità ad-hoc, le informazioni di sensing diretto e quelle ricevute dagli altri nodi vengono elaborate localmente da ciascun utente CR. La fase di decisione dello spettro è basata sulle informazioni di sensing provenienti dagli altri nodi, ma ognuno decide singolarmente su quali porzioni dello spettro accedere. Il sensing cooperativo distribuito, non necessitando di un'infrastruttura centralizzata, ha un costo ridotto rispetto al caso centralizzato e, in base al numero e alla dislocazione spaziale dei dispositivi CR coinvolti nella ricerca di utenti primari, può essere classificato in:

**parziale:** un sottoinsieme di nodi della rete secondaria, geograficamente vicini, collaborano per l'individuazione dei ricevitori primari, scambiandosi a vicenda i risultati del proprio sensing;

**totale:** i nodi sparsi per tutta la rete secondaria prendono parte al processo di sensing, eventualmente coordinati da un nodo leader;

**adattativo:** ciascun nodo passa dal sensing cooperativo al sensing individuale in base alle proprie esigenze.

Un esempio di sensing cooperativo distribuito è dato dall'approccio GUESS (Gossiping Updates for Efficient Spectrum Sensing) [3], che supporta un coordinamento efficiente dei secondari, riducendo la complessità e l'overhead. Questo approccio è basato sull'aggregazione delle informazioni locali con quelle ricevute dai nodi vicini. I dati così aggregati sono poi inviati agli altri nodi della rete, finché le informazioni di ogni nodo non sono tutte uguali, cioè finché non convergono tutte all'aggregato globale. I protocolli di tipo *gossip* sono basati sulla scelta casuale dei nodi vicini ai quale inviare le informazioni. Questa caratteristica permette di tollerare i guasti e le interruzioni della rete, rendendo così il protocollo indipendente dalla struttura della rete nella quale è implementato.

Un'altra classificazione dei regimi di cooperazione, illustrata nella Tabella 3.2, si basa sui parametri di banda richiesta dal canale di controllo (CC) di cui usufruiscono i secondari e di sensitivity di questi ultimi [17].

Ampiezza della banda del CC	Tecnica di individuazione dei PU	SNR <sub>wall</sub>	Traffico di segnalazione scambiato
1) Bassa	Energia del $P_{TX}$	Vincolante	Dati sommari
2) Bassa	Ciclostazionarietà	Non vincolante	Dati sommari
3) Elevata	Qualunque	Non vincolante	Dati approfonditi

**Tabella 3.2:** Regimi di sensing cooperativo in base al tipo di canale di controllo e al metodo di individuazione dei primari scelti.

I regimi sono riportati in ordine di prestazioni crescenti. Nel caso 1) il canale di controllo offre banda limitata, pertanto i dati scambiati dai nodi CR saranno sommari e la tecnica di individuazione dei primari non sarà particolarmente affidabile. Questo caso pur consentendo di raggiungere solo prestazioni minime, permette di aggirare la barriera rappresentata dal  $SNR_{wall}$ .



### 3.2.3 Design dei parametri fondamentali del sensing cooperativo

Durante la progettazione di una rete secondaria radio cognitiva è necessario predisporre alcuni parametri architetturali che garantiscano le migliori prestazioni possibili. In particolare è necessario stabilire, oltre all'architettura (infrastruttura o ad-hoc), alla tecnica di individuazione dei primari e alla modalità di sensing preferita:

- A) la collocazione del canale di controllo (CC);
- B) il modello di traffico dei primari e l'efficienza di sensing;
- C) la distribuzione del carico di sensing sui nodi secondari;
- D) il numero di hop per la diffusione delle informazioni di sensing.

#### A) La collocazione del canale di controllo (CC)

Per scambiarsi le sole informazioni di sensing o per inviare anche informazioni aggiuntive, gli utenti secondari devono ritagliarsi dei canali di segnalazione di ampiezza spettrale pari a  $B_{CC}$ , che richiedono interfacce radio apposite. Ad esempio, l'architettura CORVUS (Cognitive Radio approach for usage of Virtual Unlicensed Spectrum) proposta in [27] prevede l'utilizzo di un canale universale (UCC, Universal Control Channel) per la creazione e il mantenimento di gruppi di lavoro e un altro, distinto dal precedente, per la gestione interna di ciascun gruppo (denominato GCC, Group Control Channel). Il canale di comunicazione può essere ottenuto in vari modi:

- assegnato appositamente dalla normativa nella banda licenziataria, ma ciò sarebbe possibile solo a seguito della standardizzazione dell'architettura;
- ricavato nella banda libera (ad esempio in una delle bande ISM);
- ottenuto mediante UWB: permette di sovrapporre il canale di controllo alla sotto banda utilizzata, senza interferire con gli utenti primari, ma è un'opzione valida solo per reti di estensione spaziale ridotta;

- Come suggerito in [27], la scelta dell'ampiezza della banda del canale di controllo deve tener conto di un'eventuale saturazione. Una buona soglia di riferimento nella scelta del valore di  $B_{CC}$  è costituita dal rapporto fra il traffico di controllo e il traffico dati necessario al secondario per l'invio completo di un pacchetto.

## B) Modello di traffico dei primari e l'efficienza di sensing

Si prenda in considerazione [26] una rete secondaria, i cui nodi trasmissivi debbano sfruttare per il proprio traffico i vuoti spettrali, identificati in seguito ad una fase di sensing. Si individuano, quindi, due momenti successivi e periodici di lavoro: una fase di sensing, durante la quale si esamina il canale, e una fase di trasmissione, in cui il secondario può procedere con l'invio di dati esclusivamente se autorizzato dalla fase di sensing. Il design ottimale delle due operazioni sarebbe quello di eseguirle parallelamente nel medesimo istante. Questa configurazione, però, richiederebbe la gestione e l'alimentazione congiunta di due interfacce radio separate con un notevole consumo di energia. A causa dei limiti hardware tipici dei dispositivi CR è, dunque, necessario preferire una configurazione in cui le fasi di sensing e di trasmissione vengano realizzate a rotazione e periodicamente. Ipotizzando, per il momento, un sistema ad unico canale disponibile, nella prima porzione di periodo (*listen time*,  $t_S$ ) si riserva l'interfaccia radio per il sensing del canale e nella successiva frazione ( $t_{TX}$ ) si procede con la trasmissione (se sono disponibili white space). La durata dei due intervalli dipende in primo luogo dalle probabilità  $Q_d$  e  $Q_f$ , quindi dalla tecnica di individuazione dei primari prescelta (filtro adattato, calcolo dell'energia o ricerca di segnali ciclostazionari). Il design di stampo periodico adottato induce a esaminare due questioni strettamente collegate tra loro: da un lato si rende necessario evitare l'interferenza coi primari, dall'altro l'obiettivo basilare dei terminali radio-cognitivi rimane quello di sfruttare al massimo i vuoti spettrali disponibili, massimizzando l'efficienza di sensing [30]. Un vincolo da rispettare nella scelta della durata del periodo di sensing, pari a  $t_S + t_{TX}$ , è dettato dal modello di traffico dei primari. Se questi ultimi accedessero al canale

secondo uno schema TDMA o se fosse noto un parametro statistico del traffico da essi generato, sarebbe d'obbligo fissare un periodo di sensing che sia un sottomultiplo di tale valore. È quindi evidente come la scelta del valore della porzione di tempo dedicata al sensing e della porzione adibita alla trasmissione debba soddisfare entrambi gli obiettivi: optando per un tempo di sensing particolarmente duraturo, la probabilità di interferire con un primario, che inizi la trasmissione durante la seconda parte del periodo di sensing, risulta decisamente ridotta, ma aumentano drasticamente le occasioni perse di utilizzare i white space. Viceversa, riducendo il sensing a favore di un maggior intervallo di tempo adibito all'invio di dati, aumenta il bit rate massimo ottenibile dal canale, ma si intensificano anche i casi di interferenza con i primari. Come suggerito in [26], i periodi di sensing di tutti i dispositivi CR devono essere sincronizzati tra loro, altrimenti nel caso in cui il metodo di individuazione dei primari non sia in grado di discernere la natura del segnale misurato (come si verifica se si adotta un rilevamento tramite calcolo dell'energia), i dispositivi secondari trasmettenti interferirebbero con quelli in atto di ascoltare il canale, provocando falsi allarmi ricorrenti. Inoltre, i secondari devono possedere informazioni relative all'architettura dei primari. In particolare sono necessarie le informazioni relative a:

- Il tipo di traffico generato dai primari. Il caso più semplice si verifica qualora l'accesso primario al canale è deterministico: i secondari sarebbero informati con accuratezza dei possibili istanti in cui i primari potrebbero cominciare una trasmissione (ovvero ogni inizio di un time slot). In caso di accesso primario casuale, invece, è bene che i secondari dispongano di statistiche dettagliate del traffico stesso.
- Le portanti e l'estensione di ogni singolo canale radio adoperato dai primari.
- I vincoli di interferenza massima ammessi dai primari: è opportuno che i secondari sappiano se i primari siano in grado di tollerare o meno collisioni sul relativo traffico e in caso affermativo il tempo massimo di interferenza che li contraddistingue (indicato con  $T_P$ ). Il tempo di

interferenza  $T_P$  non nullo è ammissibile nel caso in cui il traffico dei primari abbia durata di attività media molto maggiore del tempo di interferenza. Ad esempio, nel caso di segnali televisivi la durata totale della trasmissione è sicuramente maggiore dell'intervallo  $T_P$ , quindi, se si dovesse verificare una collisione, la QoS dei primari non sarebbe eccessivamente intaccata.

### **C) La distribuzione del carico di sensing sui nodi secondari**

Nel caso di architetture multicanale i nodi secondari dispongono di diverse bande da analizzare alla ricerca di white space. Se da un lato questa opportunità moltiplica le occasioni di trasmissione e dunque accresce il throughput totale del sistema, dall'altro si richiede ai secondari di ascoltare più frequenze parallelamente e di servirsi in parallelo di più antenne, la cui gestione comporterebbe un incremento della complessità hardware e del costo dei singoli dispositivi. Pertanto, sebbene questa scelta diminuisca drasticamente il numero di vuoti spettrali individuabili dai secondari, è preferibile suddividere omogeneamente il carico di lavoro tra i nodi che partecipano alla fase di sensing e affidare a ciascuno un numero limitato di canali da analizzare, oltre a scegliere i partecipanti alla fase di sensing cooperativo in modo che siano spazialmente incorrelati. Nel caso di reti cognitive con base-station o clusterhead sarà compito dell'unità centrale selezionare a priori i nodi CR che dovranno prendere parte al sensing; in caso di modalità operativa ad-hoc i terminali dovranno essere identificati a priori in fase di progettazione [26].

### **D) Il numero di hop per la diffusione delle informazioni di sensing**

Nel sensing cooperativo i nodi secondari vicini tra loro si scambiano informazioni per avere una visione più accurata dello stato occupazionale del canale. È necessario specificare, tuttavia, il significato del termine vicini: se i nodi secondari hanno un raggio di copertura molto minore del raggio di copertura primario, inoltrare i risultati di sensing tra utenti molto ravvicinati (ad esempio un solo hop) preclude ad altri nodi nel raggio di copertura del trasmettitore, ma magari affetti da shadowing di beneficiare del sensing

cooperativo. Al contrario se il raggio di copertura primario e secondario fossero simili, risulterebbe deleterio inviare informazioni per un numero di hop elevato, poiché si potrebbero zittire secondari che, invece, avrebbero tutti i presupposti per condurre una trasmissione con successo.

# Capitolo 4

## Sensing cooperativo fisico e virtuale

### 4.1 L'interferenza nel dominio dello spazio, della frequenza e del tempo

I terminali radio-cognitivi devono riuscire ad evitare le collisioni con le trasmissioni primarie nel dominio della frequenza, dello spazio e del tempo. Le tecniche usate per questo scopo si differenziano a seconda della relativa sfera applicativa.

Nel dominio delle frequenze, è di importanza fondamentale che i secondari riescano ad identificare correttamente le portanti da analizzare e ad individuare l'estensione dello spettro libero in quell'istante. Un'errata valutazione di questi due parametri porterebbe, con alta probabilità, ad un utilizzo improprio delle frequenze, creando interferenza in un canale già impegnato dai primari. La tecnica di accesso multiplo OFDMA per l'architettura primaria risulta essere molto favorevole per i secondari. In questo caso, lo spettro è suddiviso in un numero discreto di sotto portanti, spaziate in modo tale da non avere interferenza mutua tra i flussi trasportati da ognuna di esse. I secondari possono così occupare dei canali liberi contigui o lontani tra loro, senza creare interferenza con le trasmissioni primarie presenti nei canali adiacenti [35]. La tecnica OFDMA, inoltre, si adatta bene ai dispositivi radio-

cognitivi con antenne multiple: ogni ricetrasmittitore può essere sintonizzato su una o più portanti tra quelle disponibili. Alla luce di questi motivi, nel caso delle simulazioni relative allo schema di sensing cooperativo proposto si suppone che i canali, identici tra loro, siano discreti e appartenenti ad una griglia OFDM.

Nello spazio, i terminali secondari devono stare attenti alla posizione dei trasmettitori e dei ricevitori primari. In un caso ideale, se la posizione di entrambi i componenti di una coppia primaria in corso di comunicazione fosse nota, si potrebbero calcolare precisamente i valori di interferenza massima ammissibile per ciascun ricevitore. Di conseguenza, si potrebbe regolare la potenza di trasmissione dei secondari in modo da evitare di disturbare eccessivamente ogni ricevitore primario e, al contempo, raggiungere il massimo valore possibile del SINR per i secondari. Ad esempio, se il ricevitore primario fosse molto vicino al proprio partner, così da garantirsi un SINR elevato, i secondari avrebbero a disposizione un ampio margine di potenza per la propria trasmissione. D'altra parte, se la distanza tra i nodi primari in corso di comunicazione consentisse il raggiungimento di un SINR al limite della soglia di decodifica, i secondari non potrebbero trasmettere. Nella realtà, tuttavia, gli utenti primari e quelli secondari non possono interagire tra loro. I nodi CR, quindi, non possono calcolare la posizione dei terminali licenziatari, ma possono soltanto sfruttare delle informazioni locali parziali, ottenute durante la fase di sensing. In generale queste informazioni riguardano la presenza o l'assenza di trasmissioni sul canale. A seconda dell'efficacia del metodo di sensing scelto (filtro adattato, calcolo dell'energia, ...), i secondari possono accedere anche alle informazioni primarie di livello MAC, oltre a quelle di livello fisico [9]. L'accesso a tali informazioni, però, è possibile solo se i secondari sono situati nel raggio di decodifica del segnale primario [31], altrimenti l'unica informazione disponibile sarebbe la presenza o l'assenza di segnale, ricavabile con il metodo del calcolo dell'energia. In questo caso, inoltre, non sarebbe possibile distinguere la natura del segnale (primaria, secondaria o rumorosa). Il sensing cooperativo contribuisce a mitigare i problemi relativi all'incertezza della collocazione del ricevitore, ma è necessario che per ciascuna coppia primaria siano presenti molteplici terminali secondari che

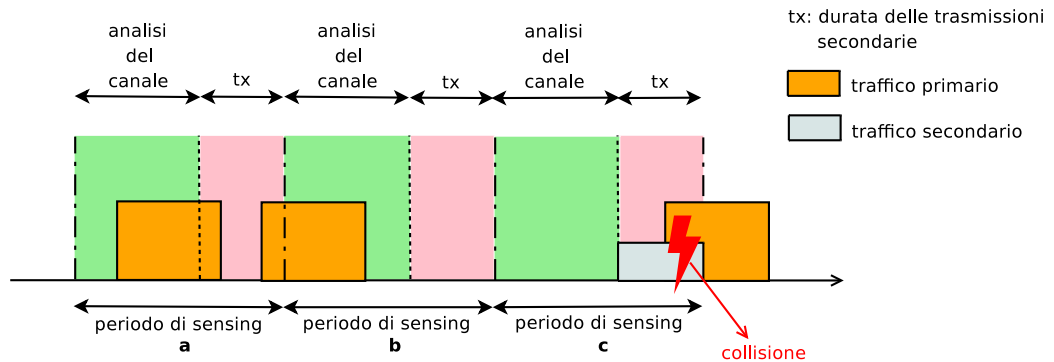
cooperino tra loro. In una situazione ideale, i secondari sono sempre in grado di decodificare il segnale primario, per poter evitare l'interferenza nella dimensione spaziale. Per rendere più realistiche le simulazioni realizzate in questa tesi, sono state utilizzate delle topologie di rete in cui la distanza tra i trasmettitori primari e i terminali secondari non garantisce sempre la decodifica corretta dei segnali primari. Nei paragrafi successivi sono spiegati nel dettaglio gli scenari applicativi utilizzati e le tecniche implementate nei terminali secondari, per minimizzare o annullare le interferenze nella dimensione spaziale.

Nel dominio del tempo, l'accesso al canale da parte dei primari può essere scandito con regolarità, oppure casualmente. Nel caso di accesso multiplo di tipo TDMA, è prevista la suddivisione deterministica del canale in time slot. I secondari possono trarre grande vantaggio da questo meccanismo, perché possono sincronizzarsi con i primari ed effettuare le operazioni di sensing all'inizio di ciascun time slot. Se questo risultasse libero, allora avrebbero a disposizione un vuoto spettrale di durata pari al time slot stesso. Le trasmissioni secondarie possono avvenire liberamente fino allo scadere dello slot, senza pericolo che il canale venga occupato da un primario. L'accesso casuale, invece, è più problematico. Se i primari usufruissero del canale in modo asincrono, i dispositivi CR potrebbero solo tentare di prevedere l'utilizzo delle risorse da parte dei primari, basandosi eventualmente sui risultati storici della fase di sensing o su informazioni di tipo statistico possedute per altre vie.

La Figura 4.1 mostra tre possibili scenari:

- a) Il nodo primario inizia la trasmissione entro lo scadere della porzione di slot riservata dal secondario per il sensing del canale. Quest'ultimo, quindi, è correttamente considerato occupato e non si verificano collisioni.
- b) Il nodo primario termina la propria trasmissione durante l'intervallo di sensing, pertanto il canale sarà valutato erroneamente occupato. La trasmissione secondaria non avrà luogo, anche se tecnicamente sarebbe





**Fig. 4.1:** Accesso primario al canale di tipo asincrono senza collisione (a), (b) e con collisione (c).

possibile. Queste situazioni conducono ad uno sfruttamento inefficiente del canale.

- c) Il nodo primario trasmette al di fuori della porzione di slot dedicata al sensing, quindi, il traffico secondario si sovrapporrà a quello primario, generando una collisione.

Gli schemi di sensing devono preventivamente evitare gli scenari del tipo (c), se il traffico primario non tollerasse le interferenze. Invece, se i terminali primari possedessero un tempo di tolleranza all'interferenza  $t_P$ , il problema si potrebbe risolvere imponendo che il tempo  $t_{TX}$  dedicato alla trasmissione sia inferiore alla soglia limite  $t_P$ . Altrimenti se i primari possedessero una tolleranza espressa dalla massima probabilità di collisione  $\alpha$ , allora i secondari, anche nel caso in cui il canale fosse valutato libero, potrebbero trasmettere solo con una probabilità  $\beta$ , dimensionata rispetto al parametro  $\alpha$ . Nel caso delle simulazioni realizzate, si è imposto che il traffico dei primari sia asincrono e che i secondari siano in grado di acquisire le informazioni relative allo stato del canale entro lo scadere del tempo di sensing. In questo modo, il meccanismo di sensing proposto previene le interferenze nella dimensione temporale.

## 4.2 Sensing cooperativo totale

Il sensing cooperativo totale prevede una stretta collaborazione tra i nodi secondari, che possono contare sulla disponibilità di un canale di controllo comune. Il principio di funzionamento di questo schema di sensing, come specificato in [26] e in [29], prevede l'inibizione delle trasmissioni di tutti i nodi secondari ogni volta che un primario viene individuato su un canale, nel caso in cui il segnale primario sia decodificabile oppure no. Questa politica di sensing è particolarmente sensibile ai casi di falso allarme e non consente un riutilizzo efficace delle risorse libere, effettivamente a disposizione dei secondari.

### 4.2.1 Schema di sensing cooperativo totale

1. *Fase di sensing:*

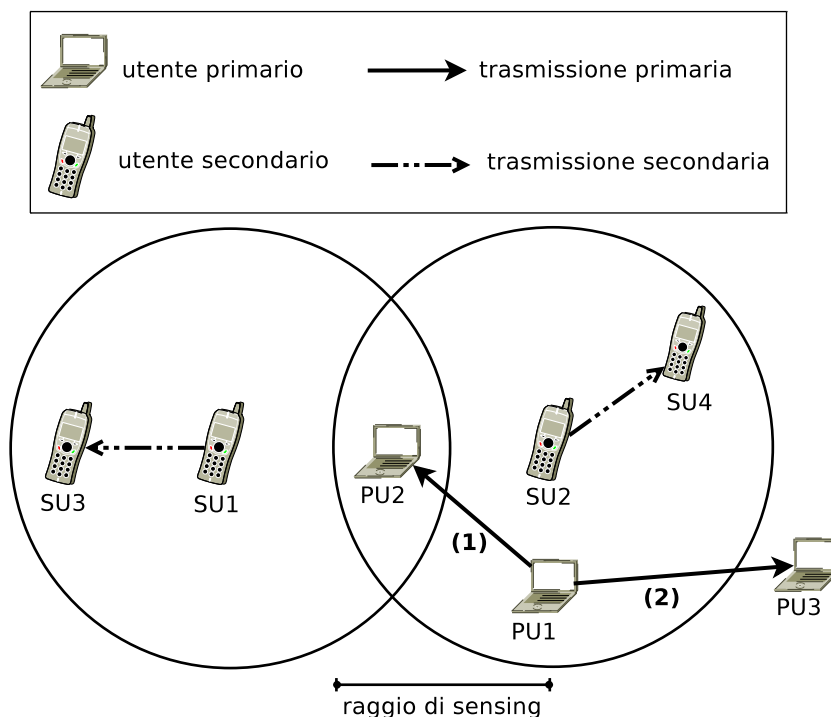
La fase di sensing avviene per un tempo pari a  $t_S$ . Se, durante questo intervallo di ascolto, il nodo CR avverte direttamente la presenza di un segnale attivo su un dato canale nella propria area di sensing, oppure gli viene notificata via CC da un altro nodo, allora il canale in questione è dichiarato occupato. Il secondario deve avvisare tutti i nodi della rete della presenza di un primario sul canale in questione, mediante un apposito messaggio trasmesso attraverso il CC. Inoltre, ogni secondario che riceve questo messaggio deve inoltrarlo ai nodi adiacenti, sempre attraverso il CC. L'effetto risultante è la diffusione dell'informazione relativa all'occupazione del canale a tutti i nodi secondari della rete. Per evitare circoli viziosi delle informazioni, il nodo secondario deve inibire l'inoltro di messaggi che ha generato esso stesso o che sono già transitati presso di esso.

2. *Fase di accesso:*

La fase di accesso prevede l'accesso a rotazione sul canale di tutti gli  $N_S$  dispositivi secondari. In questo modo è garantita l'assenza di collisioni con altri terminali secondari.

## 4.2.2 Inefficienze del sensing cooperativo totale

Con riferimento alla rete di piccole dimensioni illustrata in Figura 4.2, si desiderano valutare le inefficienze del sensing cooperativo totale.



**Fig. 4.2:** Comportamento efficiente (1) e inefficiente (2) del sensing cooperativo totale.

Ad esempio, nel caso (1) in di Figura 4.2, PU1 trasmette a PU2 e SU2 informa SU1 che il canale è occupato. In questo caso, il sensing cooperativo è utile, perché previene l'interferenza sulla comunicazione primaria diretta a PU2 che, essendo un ricevitore, non è stato rilevato da SU1.

D'altra parte, quando PU1 trasmette a PU3 (caso (2) in Figura 4.2), SU2 informa SU1 che il canale è occupato, per mezzo del canale di controllo, impedendo erroneamente a SU1 di trasmettere. Infatti, supponendo che il raggio di trasmissione secondario sia uguale al raggio di sensing, poiché il ricevitore primario PU3 non si trova nel raggio di trasmissione di SU1, SU1 potrebbe trasmettere senza creare interferenza su PU3. Il sensing cooperativo totale si limita ad inviare ai secondari l'informazione di canale occupato,

senza considerare la posizione del ricevitore primario. Questo non consente uno sfruttamento efficiente dei vuoti spettrali da parte dei secondari.

Il sensing cooperativo totale, quindi, ha un funzionamento molto conservativo, poiché inibisce le trasmissioni secondarie anche quando non è strettamente necessario.

### 4.3 Sensing DiSCo

In questo paragrafo si introduce il paradigma di sensing cooperativo proposto per reti cognitive ad-hoc, chiamato DiSCo (*Distributed Smart Cooperative*). Lo scopo di questo tipo di sensing è quello di raggiungere un'elevata efficienza d'uso dei vuoti spettrali, superando le inefficienze del sensing cooperativo totale e minimizzando, oppure annullando quando possibile, le interferenze con i segnali primari. Il presupposto per il funzionamento del sensing DiSCo è la capacità dei nodi CR di ottenere le informazioni contenute nel segnale primario, durante la fase di sensing e di condividerle con gli altri utenti CR. Ad esempio, si può utilizzare la tecnica del filtro adattato, per il metodo di individuazione dei primari, come descritto in [9].

Considerando la topologia rappresentata in Figura 4.2, si supponga che ogni secondario conservi in una memoria una lista degli utenti primari presenti nella propria area di sensing e che abbiano trasmesso almeno una volta in passato. Alla luce di tali prerequisiti, SU1 sa che nelle sue vicinanze è presente solo PU2 e lo inserisce nella lista dei trasmettitori passati. SU2 può inserire nella sua lista sia PU1, sia PU2.

Non appena PU1 trasmette a PU2 (caso (1)), SU2 legge le informazioni contenute nel segnale primario e identifica PU2 come il ricevitore della trasmissione primaria. SU2 comunica subito a SU1 l'identità del ricevitore, cioè PU2, tramite il canale di controllo e SU1 confronta queste informazioni di sensing ricevute con la propria lista di trasmettitori primari passati. Dal momento che PU2 è il ricevitore ed è contenuto nella lista di SU1, quest'ultimo può intuire che il primario è nel suo raggio di trasmissione e che non è possibile accedere al canale senza collisioni. Lo stesso vale anche per SU2, perché PU2 è presente anche nella sua lista.

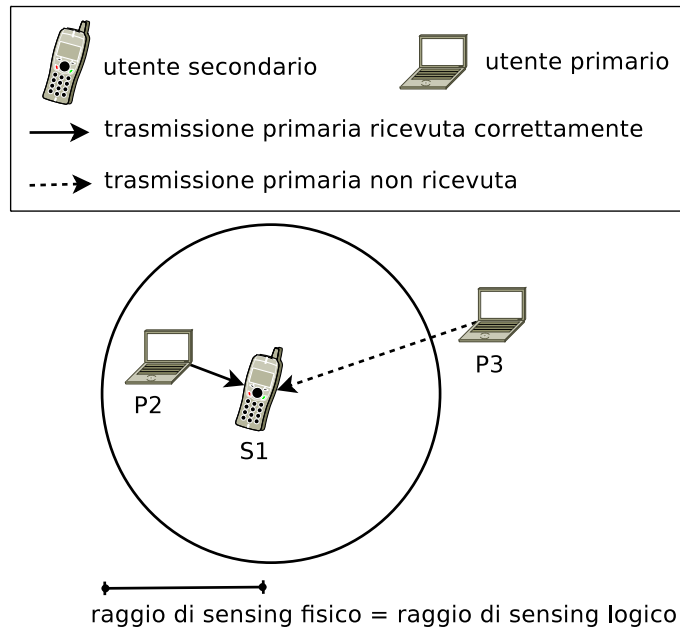
Nel caso (2), invece, il ricevitore PU3 segnalato da SU2, non è nella lista di SU1, né in quella di SU2, perciò i secondari possono giungere alla conclusione che il destinatario della trasmissione in atto sul canale non è nel loro raggio di trasmissione e possono inviare i loro dati sul canale senza pericolo di collidere con gli utenti licenziatari.

Confrontando il comportamento del sensing DiSCo in questo esempio con quello del sensing cooperativo descritto nel paragrafo 4.2.2, si nota che il sensing DiSCo, a differenza dell'altro schema di sensing, consente a SU1 di sfruttare il vuoto spettrale nel caso (2). Questo dimostra come il meccanismo di sensing in grado di identificare l'identità del ricevitore possa superare le inefficienze del sensing cooperativo, senza disturbare le trasmissioni primarie.

### 4.3.1 Il sensing a doppia soglia

Per rendere più realistici gli scenari applicativi considerati, è stato introdotto il concetto di doppia soglia di sensing, implementato soltanto nei terminali secondari di una rete cognitiva. Si distinguono due soglie: una soglia fisica e una soglia logica. La soglia fisica corrisponde alla sensitivity del ricevitore e può essere espressa come la potenza minima ricevuta o come il SINR minimo, necessari per ottenere un segnale visibile al ricevitore. La soglia logica, invece, corrisponde al SINR minimo necessario per decodificare correttamente i segnali ricevuti. In questa tesi, la soglia fisica e quella logica, espresse in termini di SINR, sono chiamate rispettivamente SF e SL. Ad entrambe le soglie è associato un raggio omonimo, il quale rappresenta la distanza che deve esserci tra un trasmettitore e un ricevitore, perché il segnale ricevuto abbia un SINR pari a quello della soglia corrispondente. La soglia fisica è sempre minore o uguale a quella logica, in termini di SINR e il raggio fisico è sempre maggiore o uguale a quello logico.

Ad esempio, la Figura 4.3 mostra il caso in cui la soglia fisica è uguale a quella logica, cioè i raggi di sensing fisico e logico coincidono. In questo caso, tutti i segnali ricevuti con un SINR maggiore o uguale a SF sono anche decodificabili. L'area della circonferenza rappresenta la zona di sensing fisico e logico del terminale S1. In questo esempio, tutti i messaggi inviati da P2,



**Fig. 4.3:** Sensing con la soglia fisica e soglia logica uguali.

che si trova all'interno di quest'area, sono ricevuti e sono anche correttamente decodificati da S1, perché hanno un SINR maggiore della soglia  $SL$ . Viceversa, tutte le trasmissioni provenienti da P3, situato all'esterno dell'area di sensing fisico, non sono ricevute da S1, né tanto meno decodificate, perché hanno un SINR minore di  $SF$ .

D'altra parte, se la soglia logica fosse maggiore di quella fisica, sarebbe necessario un SINR più alto della soglia  $SF$  per decodificare i messaggi. Di conseguenza, il raggio logico sarebbe più corto di quello fisico. Ad esempio, questo si può capire considerando una comunicazione tra una coppia di terminali secondari. L'espressione del SINR del segnale ricevuto da un secondario della coppia considerata è la seguente:

$$SINR = \frac{P_r(d)}{P_N + P_I} \quad (4.1)$$

dove:

- $P_r(d)$  è la potenza ricevuta dal terminale secondario, posto a distanza  $d$  dal trasmettitore;

- $P_N$  è la potenza del rumore termico del ricevitore.
- $P_I$  è la potenza dei segnali interferenti, provenienti da altri terminali.

Per avere un SINR maggiore, in assenza di interferenza dovuta da altre trasmissioni in atto, cioè considerando  $P_I = 0$ , è necessario che la potenza ricevuta aumenti. A questo scopo, bisogna considerare l'espressione generale di  $P_r(d)$ :

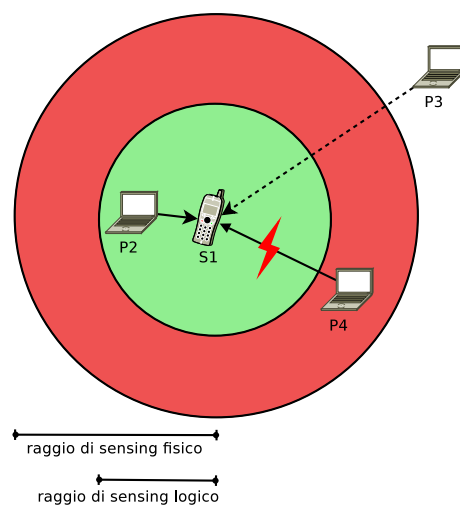
$$P_r(d) = \frac{\lambda^2 P_o}{16\pi^2 d^\gamma} \quad (4.2)$$

dove:

- $\lambda$  è la lunghezza d'onda;
- $P_o$  è la potenza trasmessa;
- $\gamma$  è il coefficiente di attenuazione: per lo spazio libero vale 2, per gli ambienti con attenuazione maggiore si può arrivare fino a 4, mentre per gli ambienti indoor può valere fino a 6.

Si può notare che  $P_r(d)$  aumenta al diminuire della distanza tra trasmettitore e ricevitore, a parità di potenza trasmessa  $P_o$ . Quindi, per ottenere un SINR più alto, la distanza tra i terminali deve diminuire. Questo spiega perché il raggio logico diminuisce all'aumentare della soglia logica. Questa situazione è rappresentata nella Figura 4.4.

Come nell'esempio rappresentato in Figura 4.3, il terminale S1 non riceve i messaggi provenienti da P3, perché esso si trova al di fuori della zona di sensing fisico, mentre i segnali provenienti da P2 sono ricevuti e correttamente decodificati. Il terminale P4, invece, si trova ad una distanza da S1, compresa tra il raggio di sensing logico e quello di sensing fisico. Di conseguenza, i segnali inviati da P4 sono ricevuti da S1, ma non sono decodificabili. Infatti, questi segnali hanno un SINR maggiore della soglia SF, ma minore della soglia SL. In pratica, S1 è in grado di sentire le trasmissioni del terminale P4, ma non è mai in grado di decodificarle. Si può notare, quindi, che al crescere della soglia logica, la zona di corretta decodifica dei messaggi si restringe, cioè il raggio logico diminuisce e i terminali devono trovarsi ad una distanza sempre più ravvicinata per comunicare senza errori tra loro.



**Fig. 4.4:** Sensing con la soglia logica maggiore della soglia fisica.

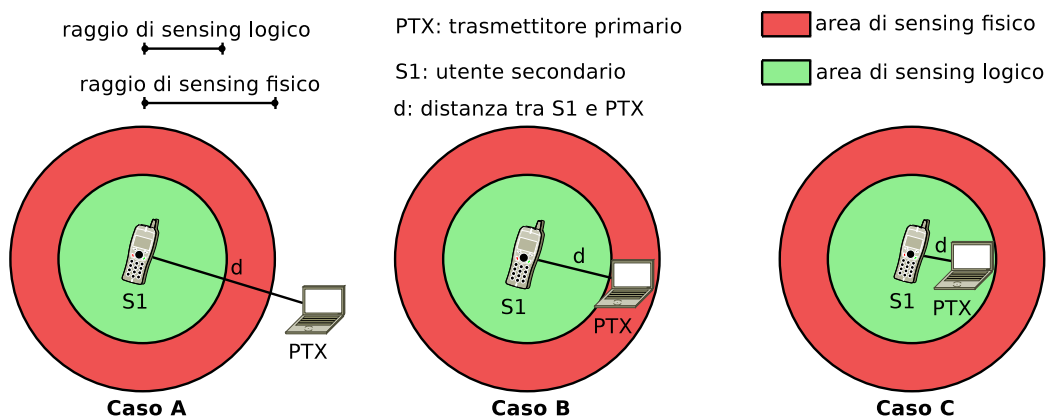
La Figura 4.5 mostra i tre possibili casi che possono verificarsi alla ricezione di un segnale, da parte di un terminale secondario:

**caso A:** Il segnale ricevuto ha un SINR minore di  $SL$ , quindi, il ricevitore non sente proprio la trasmissione in atto. Questo significa che il trasmettitore si trova al di fuori dell'area di sensing fisico del ricevitore, cioè ad una distanza maggiore del raggio fisico.

**caso B:** Il segnale ricevuto ha un SINR maggiore di  $SF$ , ma minore di  $SL$ . In questo caso, il segnale non può essere decodificato, ma il ricevitore si accorge della trasmissione in atto. Il trasmettitore, quindi, si trova nella zona compresa tra il raggio logico e quello fisico.

**caso C:** Il segnale ricevuto ha un SINR maggiore di  $SF$  e di  $SL$ . In questa situazione, il segnale è correttamente decodificato, perché entrambe le soglie sono superate e il trasmettitore si trova ad una distanza minore o uguale al raggio logico.





**Fig. 4.5:** Tre possibili casi di sensing con la soglia logica maggiore della soglia fisica.

### 4.3.2 Recupero dei messaggi non decodificati

L'implementazione della doppia soglia di sensing nei terminali secondari non consente sempre una corretta decodifica dei messaggi provenienti dai nodi situati in prossimità. Questo porta a delle inefficienze nella fase di sensing, perché non è sempre possibile elaborare le informazioni contenute nei messaggi primari.

In questo paragrafo si introduce un metodo usato dai terminali secondari, per superare il limite introdotto dalla doppia soglia di sensing. Lo scopo di questa tecnica è quello di rendere disponibili ai secondari le informazioni contenute nei segnali che non sono decodificabili, perché sono trasmessi da terminali situati nella loro zona di non decodifica. L'unico presupposto di questa tecnica è l'esistenza di un canale di controllo, condiviso da tutti i secondari. In questa tesi, il recupero dei messaggi è utilizzato dai secondari per ottenere le informazioni contenute nei segnali dei primari, che non sono stati decodificati correttamente.

L'esempio illustrato nella Figura 4.6 mostra come avviene il recupero dei messaggi non decodificati. Supponiamo che il trasmettitore primario PTX1 si trovi nella regione di sensing logico di S2 e nella regione di non decodifica di S1. In questa situazione, quando PTX1 invia un messaggio a PRX1, il

segnale emesso da PTX1 è perfettamente decodificabile da S2, ma non da S1, perché riceve un segnale con un SINR che non è sufficiente per superare la soglia logica. A questo punto, S2 ha a disposizione le informazioni contenute nel messaggio primario, mentre S1 può solo rendersi conto che c'è un canale occupato, senza riuscire a distinguere la natura primaria o secondaria, né il contenuto della trasmissione stessa.

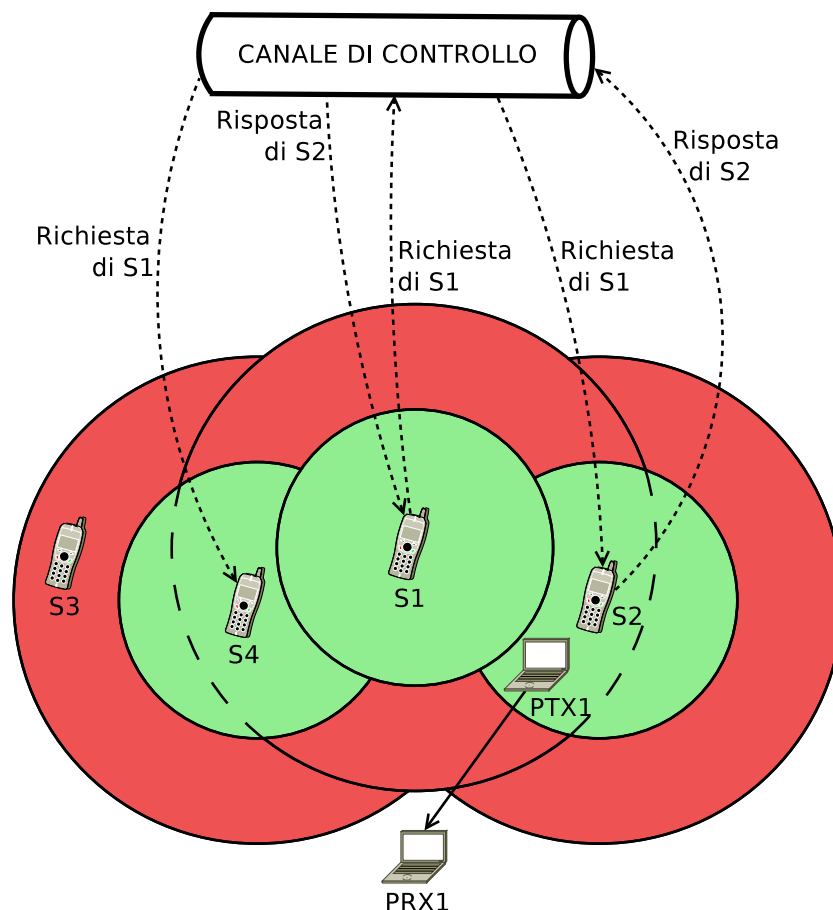
Il recupero del messaggio non decodificato avviene secondo i seguenti passaggi:

1. Il trasmettitore primario PTX1 invia un messaggio al ricevitore primario PRX1.
2. S2 decodifica la trasmissione di PTX1 e conserva localmente una copia identica del messaggio primario ricevuto.
3. Quando S1 rileva la trasmissione di PTX1, ma non riesce a decodificarla, invia sul canale di controllo un messaggio per chiedere agli altri terminali secondari se sono riusciti a decodificare lo stesso messaggio. Questo messaggio di richiesta viene ricevuto da tutti i secondari che si trovano nel raggio di trasmissione di S1, cioè da tutti i terminali a 1 hop di distanza da S1. Per questo motivo, è ricevuto da S2 e da S4, ma non da S3.
4. S2 riceve la richiesta e risponde a S1 inviandogli la copia del messaggio primario, che ha decodificato correttamente. S4, invece, non ha sentito la trasmissione primaria, perché PTX1 si trova all'esterno della sua area di sensing fisico, quindi, non risponde alla richiesta di S1.
5. S1 riceve una risposta solo da S2, contenente il messaggio che non è riuscito a decodificare.

Alla fine di questa procedura, anche S1 è in grado di elaborare le informazioni contenute nel messaggio primario, che servono per il sensing cooperativo logico, come è descritto nei paragrafi successivi. Questo meccanismo permette di estendere virtualmente l'area di sensing logico, quando si aumenta il

valore della soglia logica. Infatti, quando S1 effettua il recupero del messaggio non decodificato, il risultato è identico a quello che si otterrebbe se il messaggio fosse stato ricevuto e decodificato direttamente da S1. In pratica, il recupero dei messaggi non decodificati cerca di riportare il raggio di sensing logico alla stessa lunghezza del raggio di sensing fisico.

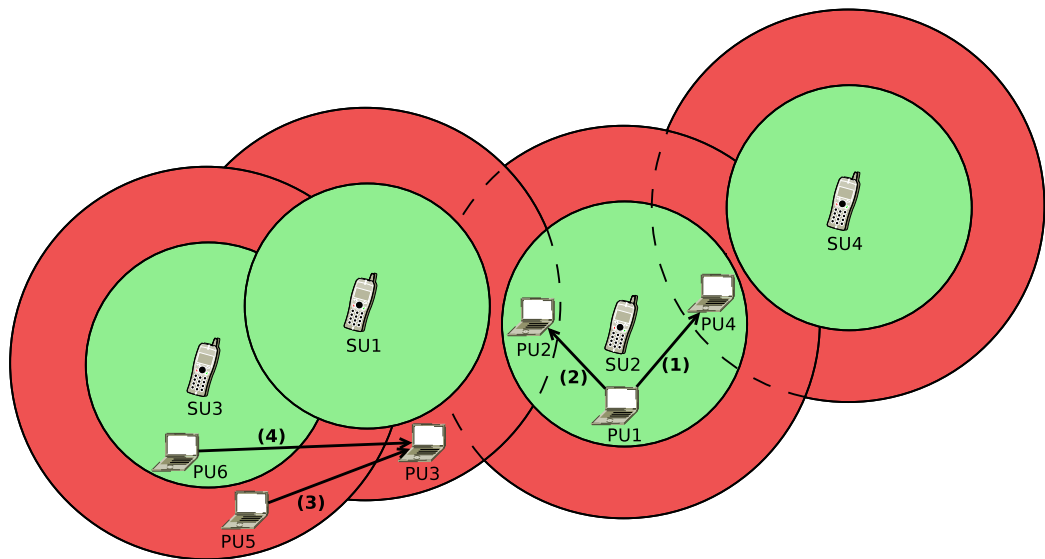
L'invio del messaggio di richiesta, da parte dei terminali che non hanno decodificato una trasmissione, è limitato ai soli nodi a 1 hop di distanza. Questo consente di un utilizzo efficiente del canale di controllo. Infatti, se il messaggio di richiesta fosse inviato a tutti i secondari, la maggior parte di essi non potrebbe rispondere, perché sarebbe troppo lontana dalla zona dove è avvenuta la trasmissione (come il terminale S5 in Figura 4.6).



**Fig. 4.6:** Messaggi scambiati sul canale di controllo dai secondari per recuperare le trasmissioni non decodificate.

### 4.3.3 Soluzione delle problematiche introdotte dalla doppia soglia di sensing

La tecnica, descritta nel paragrafo 4.3.2, è molto utile al sensing DiSCo nei casi in cui il raggio di sensing logico è minore di quello fisico. Questo è dimostrato dall'esempio seguente.



**Fig. 4.7:** Sensing DiSCo con la soglia logica maggiore della soglia fisica e recupero dei messaggi non decodificati.

Considerando la rete rappresentata in Figura 4.7, i terminali primari si trovano in posizioni diverse e, supponendo che inizialmente tutti trasmettano almeno una volta, le liste locali di ogni nodo secondario si riempiono nei modi seguenti:

- PU1 e PU4 si trovano nella zona di decodifica di SU2, quindi, SU2 può inserirli nella sua lista di trasmettitori locali;
- PU2 è nella zona di decodifica di SU2 e in quella di non decodifica di SU1, quindi, in un primo momento, solo SU2 può inserirlo nella lista dei trasmettitori locali. Successivamente, grazie alla tecnica del recupero dei messaggi non decodificati, SU1 riceve da SU2 la trasmissione

primaria attraverso il canale di controllo (come è descritto nel paragrafo 4.3.2). In questo caso, sia SU1, sia SU2 possono inserire nella propria lista locale l'identità di PU2. Lo stesso succede a SU4 con PU4: il primario è nella zona di non decodifica del secondario, ma SU4 può recuperare il messaggio di PU4, perché SU2 lo ha decodificato.

- PU3 e PU5 si trovano rispettivamente nella zona di non decodifica di SU1 e SU3, quindi, non possono essere inseriti nelle loro liste locali, né è possibile recuperare le loro trasmissioni.
- PU6 è nella zona di sensing logico di SU3, quindi viene inserito nella sua lista locale.

Terminata la fase iniziale in cui tutti i primari trasmettono almeno un messaggio, il contenuto delle liste locali e i trasmettitori primari che non sono stati decodificati sono riportati nella tabella 4.1.

<b>SU:</b>	<b>SU1</b>	<b>SU2</b>	<b>SU3</b>	<b>SU4</b>
<b>contenuto lista locale:</b>	PU2	PU1, PU2, PU4	PU6	PU4
<b>PU non decodificati:</b>	si (PU3)	no	si (PU5)	no

**Tabella 4.1:** Liste locali dei nodi secondari.

Ogni volta che un secondario decodifica un messaggio e apprende l'identità del ricevitore primario, lo pubblicizza sul canale di controllo. Grazie alle informazioni contenute nelle liste locali, i nodi CR che in passato hanno già sentito lo stesso terminale primario, capiscono che il ricevitore pubblicizzato è nella loro area di sensing logico. Questo meccanismo è sufficiente ad evitare le interferenze, se il raggio di sensing logico fosse uguale a quello di sensing fisico.

Tuttavia, quando il raggio di sensing logico è minore di quello fisico, possono verificarsi dei casi in cui non si riescono a recuperare tutti i messaggi non decodificati, perciò non è possibile estrarre le informazioni logiche dai messaggi primari. In queste situazioni, non è possibile individuare la posizione dei ricevitori primari. Questo è il caso di SU1 e di SU3, che non possono accedere rispettivamente al contenuto delle trasmissioni di PU3 e PU5. Di

conseguenza, il sensing DiSCo si comporta diversamente in base ai risultati della fase di sensing:

**sensing logico (o virtuale):** quando la trasmissione primaria è decodificata da almeno un secondario, questo deve inviare attraverso il canale di controllo un messaggio contenente l'identità del ricevitore primario. I secondari che ricevono questo messaggio, controllano se lo stesso primario è contenuto nella propria lista locale, consultando la tabella 4.1. Se il ricevitore primario è incluso nella loro lista locale di trasmettitori passati, non utilizzano le risorse primarie perché, in questo caso, esso si trova nei loro paraggi.

**sensing fisico:** quando la trasmissione primaria non è decodificata da nessun secondario, non è possibile scoprire l'identità del ricevitore primario, quindi, neanche la sua posizione. In questo caso i nodi CR devono avvisare gli altri nodi, inviando un messaggio sul canale di controllo. Tutti i secondari che ricevono questo messaggio non possono trasmettere, a prescindere dal contenuto delle loro liste locali. Questo comportamento è lo stesso di quello del sensing cooperativo totale.

In entrambi i casi, i messaggi sul canale di controllo possono essere inoltrate fino a un numero di hop fissato, per evitare di bloccare le trasmissioni dei secondari che si trovano molto lontani dal ricevitore primario e per non sovraccaricare troppo il canale di controllo. Con la doppia soglia di sensing, la probabilità di collisione sui primari non è più nulla, perché non è sempre possibile decodificare le trasmissioni primarie per accedere alle informazioni in esse contenute e inserire l'identità dei trasmettitori nelle liste locali. In questi casi, il sensing logico, che è basato su queste informazioni, non consente di localizzare tutti i ricevitori e i secondari che non conoscono l'identità di tutti i primari contenuti nella propria area di sensing fisico, possono creare interferenza sulle trasmissioni primarie. Tuttavia, grazie al meccanismo di recupero dei messaggi non decodificati, queste situazioni si presentano in un numero molto limitato, perché si riducono i casi in cui non è possibile decodificare i messaggi primari.

Ora è possibile capire il comportamento del sensing DiSCo, considerando le quattro trasmissioni primarie in Figura 4.7:

1. Nel caso (1), SU2 decodifica la trasmissione da PU1 a PU4, che è contenuto nella lista locale di SU2, quindi, SU2 non potrà trasmettere. In questo caso, entra in funzione il sensing logico e SU2 allerta gli altri secondari, pubblicizzando l'indirizzo del ricevitore PU4 sul canale di controllo. SU4 giustamente non trasmette, perché PU4 è contenuto nella sua lista, grazie al recupero dei messaggi non decodificati. Infatti, se questa tecnica non fosse stata utilizzata, SU4 avrebbe trasmesso perché PU4 non sarebbe contenuto nella sua lista. SU3 e SU1, invece, non hanno sentito PU4 in passato, come mostrato nella tabella 4.1 e possono accedere al canale. In questa situazione non si creano interferenze.
2. Nel caso (2), PU1 invia a PU2 un messaggio che è decodificato da SU2, il quale apprende l'identità del ricevitore. SU2 controlla la sua lista locale e capisce che PU2 è nel suo raggio logico. Anche in questo caso si usa il sensing logico e SU2 invia attraverso il canale di controllo un messaggio agli altri secondari, pubblicizzando l'indirizzo del ricevitore PU2. SU3 e SU4 non hanno nella propria lista locale PU2, quindi, possono trasmettere. SU1, invece, non può accedere al canale perché ha in lista PU2, grazie al recupero dei messaggi non decodificati. In questa situazione non si creano interferenze.
3. Nel caso (3), PU5 invia a PU3 un messaggio che non è decodificato da nessuno, quindi, il sensing logico basato sulle liste locali non può funzionare, ma si usa il sensing fisico. SU3 attiva l'allarme di sensing fisico e avvisa gli altri secondari di non trasmettere, per mezzo del canale di controllo. Lo stesso sarebbe valido anche se PU3 si trovasse nella regione di sensing logico di SU1 perché, se quest'ultimo conoscesse tutti i primari vicini, rimarrebbe sempre incognito ai secondari il destinatario della trasmissione originata da PU5. In questa situazione, tutti i terminali non possono utilizzare le risorse primarie.
4. Nel caso (4), PU6 invia a PU3 un messaggio che è decodificato solo

da SU3. Questa volta SU3 riesce a capire che il ricevitore è PU3, tuttavia, non si conosce la sua posizione, perché PU3 non è contenuto in nessuna delle liste locali dei secondari. Lo schema di sensing utilizzato è il sensing logico, quindi, si inserisce nei messaggi inviati sul canale di controllo l'identità del ricevitore primario PU3. Dal momento che nessuno ha nella propria lista locale PU3, tutti i secondari sono liberi di utilizzare le risorse primarie. In questo caso SU1 crea interferenza sul ricevitore PU3, perché non sa di avere questo primario nel suo raggio di sensing. Queste situazioni accadono quando non è possibile recuperare i messaggi non decodificati.

In tutte le quattro situazioni, il sensing cooperativo totale avrebbe inibito le trasmissioni di tutti i secondari; il sensing DiSCo, invece, riesce ad ottenere un'efficienza migliore perché sfrutta meglio i vuoti spettrali nei casi (1), (2) e (4). Nel sensing DiSCo con la doppia soglia, tuttavia, le interferenze non sono più nulle, ma si presentano in pochi casi, grazie al meccanismo di recupero dei messaggi non decodificati.

Nel caso in cui non si usasse il recupero dei messaggi non decodificati con la doppia soglia di sensing, dal momento che le liste locali conterrebbero poche informazioni, il sensing DiSCo dovrebbe lavorare sempre con il sensing fisico. Alla ricezione di un messaggio di sensing logico, un secondario non dovrebbe trasmettere anche se il ricevitore primario non fosse contenuto nella sua lista. Quindi, il comportamento del sensing DiSCo, senza il recupero dei messaggi non decodificati, è identico a quello del sensing cooperativo totale, come è dimostrato dai risultati ottenuti nel Capitolo 5.

#### **4.3.4 Schema di sensing DiSCo**

Come per tutti i protocolli MAC di stampo opportunistico, anche nel caso dello schema DiSCo, si possono individuare due fasi distinte di lavoro: la fase di sensing e quella di accesso.

1. *Fase di sensing:*



All'inizio del listen time, per un intervallo di durata pari a  $t_S$ , ogni nodo secondario effettua il sensing di tutti i canali primari disponibili.

*sensing logico*: per ogni portante rilevata occupata da un segnale che si è riusciti a decodificare, il nodo secondario estrae le informazioni relative all'identità del nodo trasmettitore (ID-PTX) e ricevitore (ID-PRX) e salva una copia locale del messaggio primario, per poterlo inviare a chi non lo ha decodificato. Gli indirizzi dei PTX individuati per la prima volta sono memorizzati nella lista locale, mentre quelli dei PRX sono pubblicizzati mediante l'invio in broadcast sul CC di uno specifico messaggio di sensing logico, che indica l'identità del PRX e la portante occupata, ossia la coppia (ID-PRX, ID-Ch). Il nodo mittente deve specificare anche per quanti hop l'informazione dovrà essere diramata.

Per ogni trasmissione rilevata, ma non decodificata, si invia in broadcast la richiesta di recupero dei messaggi non decodificati (come in Figura 4.6). Se almeno un secondario risponde con il messaggio primario, si procede con il sensing logico, altrimenti si utilizza il sensing fisico.

*sensing fisico*: per ogni trasmissione rilevata, ma non decodificata, né recuperata, si invia in broadcast sul CC uno specifico messaggio di sensing fisico, contenente soltanto il canale ID-Ch occupato, specificando per quanti hop l'informazione deve essere diramata. Il nodo mittente considera occupato il canale ID-Ch.

Per ogni messaggio ricevuto sul CC contenente l'identificativo del ricevitore primario, i nodi secondari verificano se gli identificativi specificati sono contenuti nella propria lista dei trasmettitori. Se dal controllo risulta una corrispondenza, allora il relativo canale è considerato occupato, perché il ricevitore è collocato nei paraggi. Altrimenti, se non è presente alcun match, il canale può essere dichiarato disponibile ad accogliere una trasmissione secondaria. Questo stesso controllo delle corrispondenze nella lista locale è effettuato anche da ogni terminale che ha pubblicizzato il ricevitore primario sul CC. Un trattamento a parte è riservato ai messaggi di sensing provenienti dal ricevitore secon-

dario partner. Affinché la trasmissione vada a buon fine è necessario che i canali liberi siano gli stessi sia lato trasmettitore, sia lato ricevitore. Pertanto, ogni STX deve sempre considerare impegnati i canali che il suo partner gli indica come occupati, anche se per il trasmettitore secondario il canale sarebbe libero, sia da sensing diretto, sia dalla consultazione della lista locale.

Per ogni messaggio ricevuto sul CC contenente soltanto l'identificativo ID-Ch, i nodi secondari considerano occupato questo canale, indipendentemente dal contenuto delle liste locali.

## 2. Fase di accesso:

Al termine della fase di sensing, ciascun secondario avrà a disposizione un vettore binario di dimensione  $N_{CH}$  indicante i canali occupati e quelli liberi. Ha inizio, a questo punto, la fase vera e propria di accesso al canale. Tutti i nodi secondari che dispongono di almeno un vuoto libero, possono usufruirne per inviare dati. I nodi che hanno più vuoti spettrali possono sceglierne a caso solamente uno. A rotazione, a partire dall'utente CR con indirizzo più basso e in ordine crescente, ogni nodo avrà a disposizione nell'intervallo di trasmissione (di durata  $t_{TX}$ ) un intervallo di tempo inversamente proporzionale al numero di trasmettitori secondari totali. Sia  $C$  la capacità massima di una portante primaria, allora ogni  $STX_i$  ( $1 \leq i \leq N_S$ ) ha a disposizione un rate pari a:

$$R_i = \frac{t_{TX}}{(t_{TX} + t_S)N_S}C$$

Il STX, prima di procedere con la trasmissione, comunica al proprio partner il canale di cui ha intenzione di servirsi, tramite il canale di controllo. Dal momento che le informazioni di sensing sono distribuite e visto il trattamento privilegiato riservato ai messaggi di sensing provenienti dal ricevitore, i canali disponibili lato trasmettitore saranno certamente liberi anche presso il ricevitore. Non è pertanto necessaria una negoziazione del canale disponibile tra i secondari, ma solo una comunicazione da parte del STX del canale scelto casualmente tra quelli liberi.

A trasmissione avvenuta il nodo secondario destinatario dovrà riscontrare al mittente il buon esito della trasmissione. Il principale vantaggio dell'accesso al canale secondo un meccanismo a rotazione del tipo proposto assicura l'assenza di collisioni tra nodi secondari. Le collisioni tra i primari, invece, sono assenti in virtù delle ipotesi preliminari adottate: le uniche collisioni che si possono verificare sono, pertanto, esclusivamente tra un utente licenziatario e uno CR.

# Capitolo 5

## Strategia di accesso multicanale distribuito

### 5.1 Sensing DiSCo ottimizzato

Allo scopo di migliorare ulteriormente il sensing DiSCo è stata modificata la fase di accesso ai canali attraverso una strategia distribuita di selezione del canale, di seguito riportata; infatti il sensing cooperativo totale e il sensing DiSCo non tengono conto della qualità dei canali liberi dai primari in modo da migliorarne la scelta. Il sensing DiSCo ottimizzato, oggetto di questa tesi, permette di migliorare le prestazioni in termini di throughput e di interferenze con i segnali primari.

#### 5.5.1 Schema di sensing DiSCo ottimizzato

La fase di sensing resta la medesima del sensing DiSCo, di seguito è riportata la fase di accesso migliorata:

Fase di accesso:

Al termine della fase di sensing, ciascun secondario avrà a disposizio-

ne un vettore binario di dimensione  $N_{CH}$  indicante i canali occupati e quelli liberi. Ha inizio, a questo punto, la fase vera e propria di accesso al canale. Tutti i nodi secondari che dispongono di almeno un vuoto libero, possono usufruirne per inviare dati. I nodi che hanno più vuoti spettrali possono sceglierne solamente uno nel modo seguente: per ogni canale libero ciascun secondario calcola una funzione di utilità  $F_i$  ( $1 \leq i \leq N_{CH}$ ) che fornisce un'indicazione sulla qualità del canale  $i$ -esimo in termini di probabilità di collisione con i primari e di occupazione del canale da parte degli utenti secondari; la funzione di utilità  $F_i$  è calcolata nel modo seguente:

$$F_i = \frac{B_i(1 - Prc_i)}{Nrs_i}$$

dove:

- $B_i$ : banda del canale  $i$ -esimo;
- $Nrs_i$ : stima del numero medio dei nodi secondari che hanno trasmesso nelle trasmissioni precedenti sul canale  $i$ -esimo;
- $Prc_i$ : stima della probabilità di collisione media tra nodi primari e secondari nelle trasmissioni precedenti sul canale  $i$ -esimo:

$$Prc_i = \frac{Nrc_i}{Nrp_i}$$

dove:

- $Nrc_i$ : stima del numero medio di collisioni misurate sui ricevitori primari nelle trasmissioni precedenti sul canale  $i$ -esimo; si assume un caso ideale in cui ai secondari siano note tali collisioni;
- $Nrp_i$ : stima del numero medio dei primari sentiti (decodificati o non decodificati) che hanno trasmesso nelle trasmissioni precedenti sul canale  $i$ -esimo.

Il secondario sceglie il canale che massimizza la funzione  $F_i$ , cercando un compromesso tra banda maggiore, minore probabilità di collisione e minor numero di secondari sul canale.

Ciascun secondario comunica sul CC ai vicini situati nel suo raggio di

trasmissione (si assume che i secondari conoscano i vicini nel proprio raggio di trasmissione) se ha trasmesso, su quale canale e se vi è stata collisione; in tal modo ciascun secondario è in grado di conoscere la storia passata dell'occupazione dei canali e della probabilità di collisione. La stima  $N_{rp_i}$  è relativa al numero di primari sentiti dal singolo secondario nel suo raggio di trasmissione, primari sentiti anche dagli altri vicini secondari del suo raggio di trasmissione.

La trasmissione avviene come nel sensing DiSCo con un meccanismo a rotazione. In Figura 4.1 è riportato sotto forma di pseudo-codice l'algoritmo dello schema di sensing proposto.

Pseudo-codice 5.1: Schema del sensing DiSCo con recupero dei messaggi non decodificati.

```

Parametri:
T //durata di un periodo di sensing (Figura 4.1)
ts //durata del listen time (Figura 4.1)
Nch //numero dei canali primari analizzati in fase di
    sensing
MyID //indirizzo del nodo secondario compreso tra 0 e il
    numero di coppie secondarie  $N_S$ 
MyPartnerId //indirizzo del nodo partner compreso tra 0 e
    il numero di coppie secondarie  $N_S$ 
c //numero identificativo del canale, compreso tra 1 e Nch
SF //soglia fisica: valore minimo di SNR per ricevere i
    messaggi (Figura 4.5).
SL //soglia logica: valore minimo di SNR per decodificare
    correttamente i messaggi ricevuti (Figura 4.5).
 $B_i$  // Vettore che indica per ogni canale  $1 \leq c \leq Nch$  la banda corrispondente
//struttura per lo scambio delle informazioni di sensing
Messaggio = {Canale, PRXavv, LeftHop, Route[NumHop], Count}
InfoChannel = {Source, Dest, Canale}
Richiesta = {Source, Timestamp} //usato per chiedere agli
    altri secondari un messaggio che non è stato
    decodificato
ListaRichieste={timestamp, canale} //lista contenente i
    timestamp e il canale dei messaggi non decodificati
ListaInformazioniMsg={Source, Dest, Canale, timestamp}

```

```

//lista contenente i dati dei messaggi correttamente
    decodificati
// struttura per lo scambio delle informazioni su occupazione e
    collisioni dei canali
Messaggio InfoStima = { Source, Canale, NrCollisioni[Canale],
NrSTX[Canale]}
// messaggio inviato dai STX per inviare informazioni su occupazione e collisioni
    del canale su cui hanno appena trasmesso
ListaSTX={ Source } // lista contenente i STX nel raggio di trasmissione
del nodo secondario

Inizializzazione variabili:
//Lista locale dei PTX e relativa dimensione
    DimListaTX=0;

ListaTX=∅;
//Lista dei ricevitori correnti e relativa dimensione
    DimListaRX=0;

ListaRX=∅;
//Vettore binario che indica lo stato occupazionale del
    canale sulla base del sensing diretto
Per ogni c  $1 \leq c \leq Nch$  OccupazioneSD[c]=0;
//Vettore binario che indica lo stato occupazionale del
    canale sulla base della consultazione incrociata della
    ListaTX con i PRXavv
Per ogni c  $1 \leq c \leq Nch$  OccupazioneLista[c]=0;
ListaRichieste=∅; ListaInformazioniMsg=∅;
Per ogni c,  $1 \leq c \leq Nch$  FunzioneUtilità[c]=0;
//Vettore che indica la qualità del canale sulla base dei vettori
    Prc e Nrs
Per ogni c,  $1 \leq c \leq Nch$  Prc[c]=0;
//Vettore che indica la stima della probabilità di collisione tra nodi
    primari e secondari nei periodi di sensing precedenti
Per ogni c,  $1 \leq c \leq Nch$  Nrs[c]=0;
//Vettore che indica la stima del numero dei nodi secondari che
    hanno trasmesso nei periodi di sensing precedenti
NrSensingPeriod //numero totale di periodi di sensing precedenti

```

```

1. Fase di sensing:
Ogni T unità di tempo:
Analizza il canale per un tempo  $t_s$ ;
Per ogni  $c$ ,  $1 \leq c \leq N_{ch}$  {
    //Su ogni canale disponibile si verifica lo stato dei
    canali (libero/occupato) e si inseriscono i risultati
    nel vettore del Sensing Diretto (SD). Si considerano
    solo i messaggi ricevuti con un SNR maggiore o uguale a
    SF
Se (rilevi la presenza di un segnale primario con  $SNR \geq SF$ 
sul canale  $c$ ) {
    Se ( $SNR \geq SL$ ) {
        //messaggio decodificato correttamente
        //Inserisco le informazioni di questo messaggio nella
        ListaInformazioniMsg:
        ListaInformazioniMsg.timestamp=messaggio_ricevuto.timestamp;
        ListaInformazioniMsg.Source=messaggio_ricevuto.Source;
        ListaInformazioniMsg.Dest=messaggio_ricevuto.Dest;
        ListaInformazioniMsg.Canale=messaggio_ricevuto.Canale.

        Estrai gli indirizzi ID_PRX e ID_PTX;
        Se ID_PTX  $\notin$  ListaTX
            Aggiungi ID_PTX a ListaTX;
        Se ID_PRX  $\notin$  ListaRX
            Aggiungi ID_PRX a List
            aRX; Crea Messaggio:
            Messaggio.Canale=c;
            Messaggio.PRXavv=ID_
            PRX; Messaggio.LeftH
            op=NumHop; Messaggio.
            Source=MyID;
            Messaggio.Count=0;
            Invia Messaggio via CC.
    }
Altrimenti {
    //messaggio non decodificato:  $SF \leq SNR < SL$ 

```



```

//chiedo agli altrisecondari se lo hanno decodificato
    Inserisci nella ListaRichieste:
    messaggio_ricevuto.Timestamp e
    messaggio_ricevuto.Canale
    Crea un messaggio Richiesta:
    Richiesta.Source=MyID;
    Richiesta.Timestamp=messaggio_ricevuto.Timestamp;
    Invia Richiesta sul CC.
}

}
Altrimenti
//messaggio che non ha superato la soglia fisica: SNR<SF
    OccupazioneSD[c]=0;
}

//Richiesta di recupero di un messaggio non decodificato.
Se ricevo un messaggio Richiesta durante il listen time ts:
    //controllo se ho decodificato questo messaggio e ne ho salv
    ato una copia
Per ogni elemento di ListaInformazioniMsg:
    Se (Richiesta.Timestamp=ListaInformazioniMsg.timestamp) Crea
    un messaggio MsgDecodificato:
    MsgDecodificato.timestamp=ListaInformazioniMsg.timestamp;
    MsgDecodificato.Source=ListaInformazioniMsg.Source;
    MsgDecodificato.Dest=ListaInformazioniMsg.Dest;
    MsgDecodificato.Canale=ListaInformazioniMsg.Canale; Invi
    a MsgDecodificato a Richiesta.Source via CC.
Altrimenti
    Non ho decodificato il messaggio con
    timestamp=Richiesta.Timestamp.

//Recupero di un messaggio non decodificato.
Se ricevo un MsgDecodificato durante il tempo ts e
    (ListaRichieste!=0)
Per ogni elemento di ListaRichieste:
    Se ListaRichieste.timestamp=MsgDecodificato.timestamp
    cancella ListaRichieste.timestamp

```

```

Estrai gli indirizzi ID_PRX (Dest) e ID_PTX (Source) da
    MsgDecodificato;
Se MsgDecodificato.Source∉ListaTX
    Aggiungi MsgDecodificato.Source a ListaTX;
Se MsgDecodificato.Dest∉ListaRX
    Aggiungi MsgDecodificato.Dest a ListaRX;
Crea Messaggio:
    Messaggio.Canale=MsgDecodificato.Canale; Mess
    aggio.PRXavv=MsgDecodificato.Dest;
    Messaggio.LeftHop=NumHop; Mess
    aggio.Source=MyID;
    Messaggio.Count=0;
Invia Messaggio via CC.

//Al termine del tempo ts di sensing dei canali, devo
    controllare se sono riuscito a recuperare TUTTI i
    messaggi che non ho decodificato. Se non ci sono
    riuscito, ListaRichieste non è vuota, allora invio un
    MessaggioSensingFisico per bloccare le trasmissioni
    fino a NumHop.
Se ListaRichieste!=∅:
    Per ogni elemento contenuto in ListaRichieste:
    Crea Messaggio:
        Messaggio.Canale=c;
        Messaggio.LeftHop=NumHop; Mess
        aggio.Source=MyID;
        Messaggio.Count=0;
    Invia Messaggio via CC.

Per ogni Messaggio ricevuto
//Se è un messaggio di sensing fisico, non trasmetto
Se Messaggio.PRXavv=∅
    OccupazioneLista[Messaggio.Canale]=1;
Altrimenti è un messaggio di sensing logico

```

```

//Se il messaggio di sensing proviene dal ricevitore-partner
tutti i canali occupati dal suolato, non sono utilizzabili
nemmeno presso il STX; viceversa se il STX notifica al
suo SRX un canale occupato, indipendentemente dalla posizio
ne del PRX il canale può essere escluso da quelli liberi.
Se Messaggio.Route[0]==MyPartnerId
OccupazioneLista[Messaggio.Canale]=1;

Per  $0 \leq j \leq \text{DimListaTX}$ 
//Si verifica, all'arrivo di ogni messaggio, se il PRX
avvertito è stato in passato anche un trasmettitore (1)
o no (0) e si memorizza l'informazione fornita dalla
Lista
Se Messaggio.PRXavv=ListaTX[j]
OccupazioneLista[Messaggio.Canale]=1;
//Prima di propagare il messaggio è necessario controllare
che non sia già passato per il nodo e che il PRX
segnalato non sia già stato direttamente individuato dal
secondario via SD
Se (Per ogni  $0 \leq k \leq \text{NumHop}$  Messaggio.Route[k]!=MyID &&
Per ogni  $0 \leq j \leq \text{DimListaRX}$  ListaRX[j]!=Messaggio.PRXavv)
Se Messaggio.LeftHop>0
Messaggio.LeftHop=Messaggio.LeftHop-1;
Messaggio.Route[Messaggio.Count]=MyID;
Messaggio.Count=Messaggio.Count+1;
Invia Messaggio via CC;

Se sei un trasmettitore
Per ogni Messaggio InfoStima ricevuto:
Se InfoStima.Source è contenuto nella mia ListaSTX aggiorna le stime Prc[c] e
Nrs[c]:

Prc[c] = (Prc[c]+InfoStima.NrCollisioni.collisions[c])/NrSensingPeriod;
Nrs[c] = (Nrc[c]+InfoStima.NrSTX.STX[c])/NrSensingPeriod;

```

Per ogni  $c$   $1 \leq c \leq N_{ch}$  libero sia per il SD che in seguito alla ricezione di messaggi sul CC, calcola la FunzioneUtilità[c] sulla base dei messaggi InfoStima ricevuti sul CC dai soli STX nel mio raggio di trasmissione e scegli il canale con max FunzioneUtilità[c]:

$$\text{FunzioneUtilità}[c] = \frac{B[c](1 - \text{Prc}[c])}{\text{Nrs}[c]}$$

//Si ripristinano i valori iniziali delle variabili temporanee

Per ogni  $c$   $1 \leq c \leq N_{ch}$  OccupatoSD[c]=OccupatoLista[c]=0;  
 DimListaTX=0; ListaTX=∅;  
 DimListaRX=0; ListaRX=∅;  
 ListaRichieste=∅; ListaInformazioniMsg=∅;  
 Pianifica prossimo istante di sensing;  
 Per ogni  $c$   $1 \leq c \leq N_{ch}$  FunzioneUtilità[c]=0;

2. Fase di accesso opportunistico:

(a) Trasmettitore secondario:

Sintonizza l'antenna sul canale  $c$ ;

Calcola il tempo d'attesa come attesa=MyID\*tTX/Ns;

Attendi fino ad attesa;

Crea un messaggio InfoChannel:

InfoChannel.Source=MyID;

Infochannel.Dest=MyPartnerId;

InfoChannel.Canale=c.

Invia un messaggio al secondario MyPartnerId sul canale  $c$ ;

Crea un messaggio InfoStima:

InfoStima.Source=MyID;

```
InfoStima.Canale=c;
InfoStima.NrSTX=STX[c]+1;
InfoStima.NrCollisioni=collisioni[c]+1;
```

Invia Messaggio via CC ai STX della ListaSTX.

Se (ricevi un ACK)

```
Incrementa il contatore delle trasmissioni avvenute con
successo.
```

**Altrimenti**

Crea un messaggio InfoStima:

```
InfoStima.Source=MyID;
InfoStima.Canale=c;
InfoStima.NrSTX=STX[c]+1;
InfoStima.NrCollisioni=collisioni[c]+1;
```

Invia Messaggio via CC ai STX della ListaSTX.

}

**(b) Ricevitore secondario**

Ricevi un messaggio di InfoChannel

Se (InfoChannel.Dest=MyID)

```
sintonizzati sul canale InfoChannel.Channel
```

Ricevi un messaggio;

```
//se il messaggio è ricevuto correttamente, cioè se ha un
SNR maggiore o uguale a SL
```

```
Se (SNR_messaggio ≥ SL e messaggio.Source=MyPartnerId)
invia ACK a MyPartnerId sul CC.
```

# Capitolo 6

## Analisi prestazionale

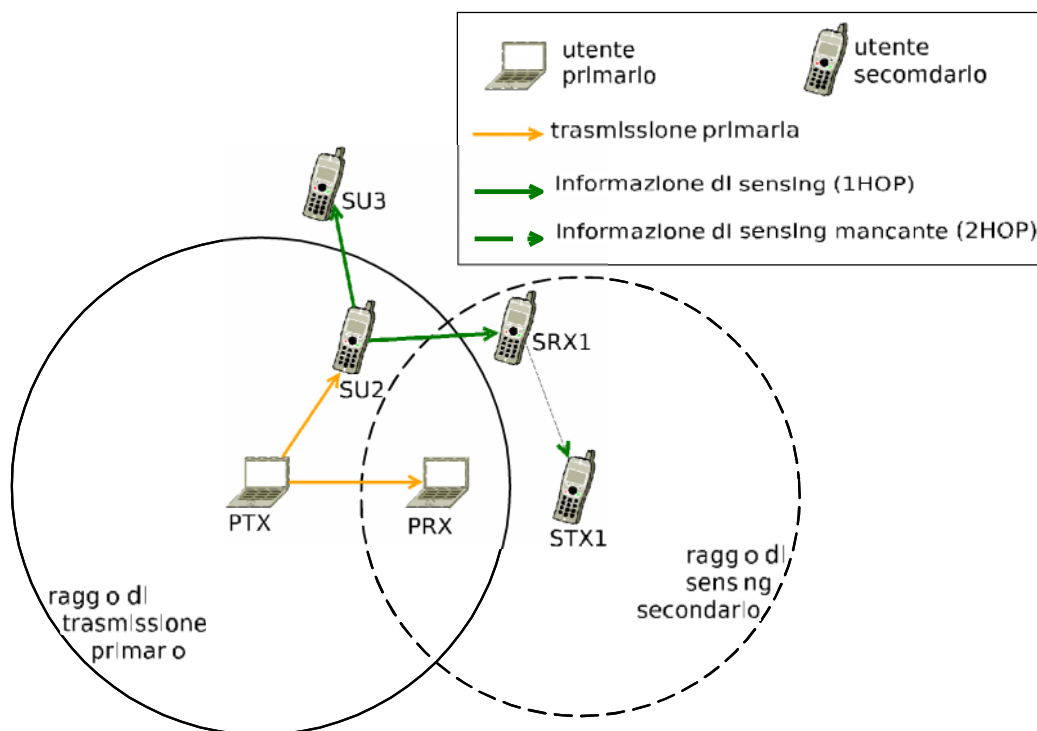
In questo capitolo si valutano e confrontano le prestazioni del sensing cooperativo totale, DiSCo e DiSCo ottimizzato.

Il sensing cooperativo totale prevede una fase di sensing diretto seguita da una fase di scambio dei risultati tra i secondari. Ogni nodo CR che riceve un messaggio di canale occupato, indipendentemente dall'identità e dalla posizione del dispositivo segnalato, inibisce la trasmissione anche nel caso in cui la coppia primaria non sarebbe disturbata da una sua trasmissione. Questa politica di accesso al canale per i terminali secondari conduce a:

- Una diminuzione della probabilità di collisione con i nodi primari rispetto agli altri casi.
- Un uso poco efficiente delle occasioni di trasmissione, che sono sfruttate solo in minima parte.

Il sensing DiSCo consente di migliorare l'efficienza di sfruttamento del canale rispetto al sensing cooperativo totale e di mantenere la probabilità di collisione ad un livello basso all'aumentare della soglia logica. Infatti, all'aumentare della soglia logica risulta sempre più difficile decodificare e localizzare i primari e la probabilità di collisione può essere ridotta sola da due parametri: il numero di hop e la frequenza di trasmissione dei primari.

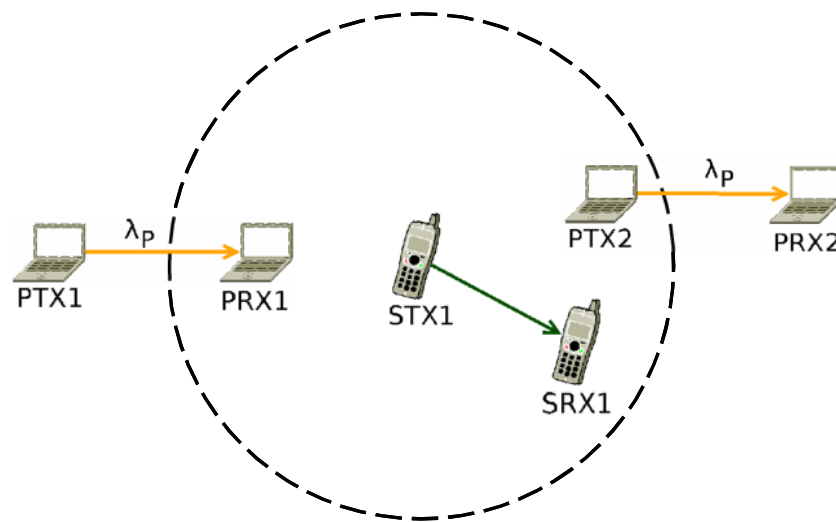
- Al diminuire del numero di hop, l'efficienza di sfruttamento dei vuoti spettrali migliora, però non è più nulla la probabilità di collisione dal momento che il problema del terminale nascosto non è risolto. In particolare, con riferimento alla Figura 6.1, viene illustrato uno scenario in cui la propagazione ad un solo hop non è sufficiente ad evitare l'interferenza sul ricevitore primario. Il SU2, non informato dal SU1 della presenza di un trasmettitore primario in atto di inviare dati, tenterà a sua volta di accedere al canale generando una collisione sul PRX. Aumentando il numero di hop, per propagare un'informazione di sensing fisico, si possono ridurre i casi di interferenza.



**Fig. 6.1:** Topologia di rete secondaria sensibile all'inefficienza dello schema di sensing cooperativo a 1-hop.

- La probabilità di collidere con i primari diminuisce all'aumentare del traffico primario sulla rete. Questo può essere spiegato facendo riferimento alla piccola topologia di rete rappresentata in Figura 6.2. Si può

facilmente notare che al crescere del traffico primario (ossia al crescere della frequenza di trasmissione  $\lambda_p$ ), aumenta anche la probabilità che il secondario trovi, in fase di sensing, il canale impegnato da uno dei trasmettitori primari circostanti. Di conseguenza, diminuiscono i vuoti spettrali (effettivi o errati) individuati dal nodo secondario trasmittente. Il risultato globale risultante è una diminuzione della probabilità di collisione con i nodi licenziatari.



**Fig. 6.2:** Effetto della frequenza di trasmissione dei primari  $\lambda_p$  sul sensing dei secondari.

Il sensing DiSCo ottimizzato, rispetto al sensing cooperativo totale e DiSCo, grazie alla selezione del canale, basata su stime di trasmissioni precedenti e sulla banda a disposizione, ha i seguenti vantaggi:

- Una distribuzione sui canali delle trasmissioni dei secondari che aumenta il throughput.
- Una fase di accesso che permette di scegliere canali a minore probabilità di collisione sui primari.



## 6.1 Descrizione del simulatore

Le simulazioni degli schemi di sensing sono state realizzate mediante il tool open source OMNeT++ [24]. OMNeT++ è un ambiente di simulazione ad eventi discreti. Il suo settore di applicazione iniziale è stata la simulazione di reti di comunicazione, ma la sua flessibilità d'uso e l'interfaccia grafica intuitiva hanno esteso il suo utilizzo fino alla simulazione di complessi sistemi e di architetture hardware. Il nucleo di ogni simulazione in OMNeT++ è costituita dai moduli semplici (simple module), componenti software programmati in C++ e in grado di interagire tra loro a seguito dello scambio di messaggi (detti anche eventi). I singoli moduli-base sono assemblati in configurazioni più complesse (compound module), descritte attraverso il linguaggio di alto livello NED. Il Mobility Framework (MF) è un'espansione del tool OMNeT++ che offre funzionalità aggiuntive per la simulazione di reti wireless statiche o mobili. La sua caratteristica fondamentale risiede nel Control Channel, un modulo in grado di gestire i link tra i vari nodi a partire dalle sole coordinate cartesiane. In Figura 6.3 è mostrata una topologia di rete del tipo utilizzato per le simulazioni.

Ogni nodo primario o secondario è rappresentato da un modulo composto, i cui moduli semplici sono elencati di seguito e rappresentati nella Figura 6.4.

*Modulo del livello fisico:* è il livello fisico OSI che svolge la funzione di ricevere i messaggi inviati sul canale e di calcolare il valore del SINR relativo a ciascun messaggio arrivato. In questo modulo è implementata la soglia fisica, che permette di ricevere solo i messaggi che hanno un SINR maggiore di essa.

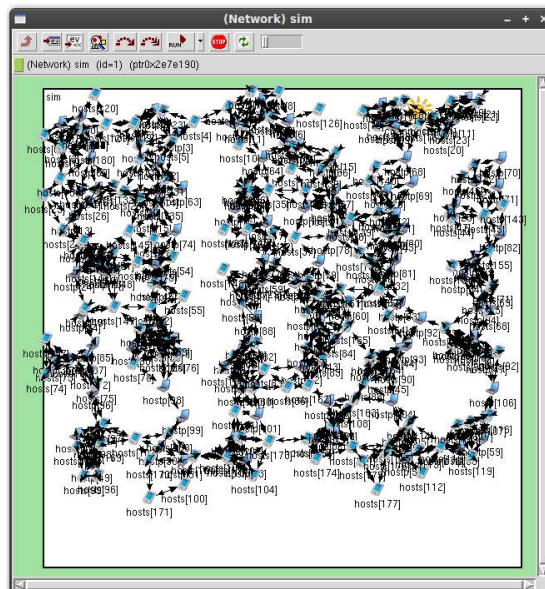
*Modulo del decider:* svolge la funzione di verificare, per ciascun messaggio, se il SINR è inferiore o superiore al valore della soglia logica. Tutti i messaggi con un SINR minore di essa sono scartati. Il decider in genere svolge anche la funzione di controllo relativamente alla presenza di errori nei bit, ma in questo caso si presuppone che da questo punto di vista il canale sia ideale, pertanto non si verificano mai errori sui singoli bit.

*Modulo del livello MAC:* svolge la funzione di accesso al canale radio. Sia per i primari, sia per i secondari, è compito del modulo rappresentante il livello MAC, in collaborazione con il livello fisico, sintonizzarsi sul canale

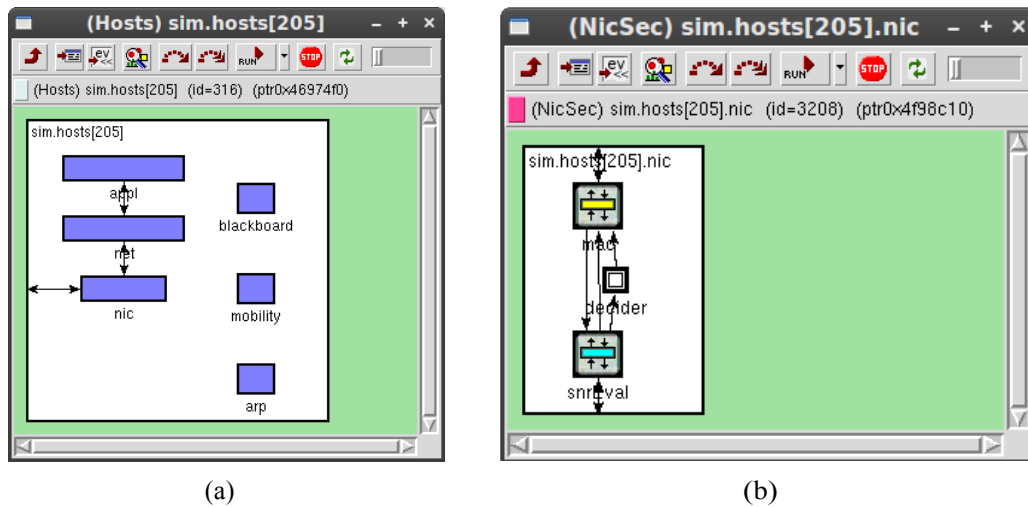
scelto da ogni coppia. Nel caso dei primari, ogni coppia sceglie un canale tra quelli disponibili, mentre per i secondari il canale è scelto casualmente tra quelli rilevati liberi durante la fase di sensing. I moduli relativi al livello fisico e MAC, insieme al decider costituiscono l'interfaccia adibita all'accesso al mezzo di comunicazione (detto anche modulo nic rappresentato in Figura 6.4).

*Modulo del livello di trasporto:* svolge le operazioni di routing, ma in questo caso i destinatari dei messaggi sono predeterminati dal momento che i primari e i secondari sono organizzati in coppie.

*Modulo del livello applicativo:* è il fulcro dell'attività dei nodi primari e secondari. Nel caso dei dispositivi primari questo livello si occupa dello scambio di messaggi con il ricevitore, mentre nel caso dei secondari gestisce le operazioni di sensing (avvalendosi della collaborazione dei livelli inferiori), il controllo incrociato tra la lista dei trasmettitori passati e dei ricevitori correnti, lo scambio dei messaggi di sensing fino al numero di hop stabilito, l'accesso al canale secondo il meccanismo di rotazione descritto nei paragrafi precedenti, il riscontro dei messaggi al termine del periodo di sensing. Questo livello deve anche interfacciarsi con il livello MAC e il livello fisico, indicando di volta in volta il canale (eventuale) su cui è stato individuato un vuoto spettrale e con il modulo del decider, per avviare la procedura di recupero dei messaggi non decodificati, quando necessario.



**Fig. 6.3:** Esempio di topologia di rete utilizzato per le simulazioni.



**Fig. 6.4:** Struttura di un nodo secondario (a) e dettaglio del modulo composto nic (b).

## 6.2 Ipotesi preliminari

Le ipotesi preliminari riguardanti l'architettura primaria e il traffico da essa generato sono elencate di seguito.

L'architettura primaria è di tipo ad-hoc ed è costituita da  $N_p$  coppie di nodi che comunicano tra loro in maniera asincrona, scambiandosi alternativamente messaggi di lunghezza prefissata. Ognuno dei  $N_p$  nodi è immobile ed è individuato univocamente da un identificativo (ad esempio un indirizzo). Il canale radio è suddiviso in un numero prestabilito  $N_{CH}$  di portanti OFDM che costituiscono l'insieme di canali, ciascuno a banda diversa, a disposizione dei primari, per le trasmissioni canoniche e dei secondari, per le relative trasmissioni opportunistiche; le bande sono fissate per i nodi primari, sono dunque loro assegnati i canali su cui trasmettere.

Per avere una visione più generale possibile non è specificato alcun meccanismo di accesso al canale da parte dei primari. Ciascuna coppia accede ad una portante scelta a caso e si suppone che non si verifichino mai collisioni tra licenziatari che accedono alla stessa portante.

Per quanto riguarda invece l'architettura secondaria e la fase di sensing valgono i presupposti elencati di seguito.

I nodi secondari, analogamente a quelli primari, sono organizzati in mo-

dalità ad-hoc e sono suddivisi in  $N_S$  coppie prestabilite in cui ciascun membro assume staticamente o il ruolo di trasmettitore, o quello di ricevitore. Al di là del ruolo assunto, ogni secondario deve partecipare alla fase di sensing e condividere con gli altri nodi i risultati ottenuti. Una peculiarità che accomuna tutti i secondari è l'impiego di una struttura dati, denominata lista locale, contenente gli identificativi dei trasmettitori primari rilevati nel proprio raggio di sensing fisico, che hanno inviato in passato messaggi ad altri primari.

In questa tesi, si è scelto di posizionare le coppie di trasmettitori e ricevitori secondari ad una distanza minore o uguale al raggio di sensing logico (come nel caso C in Figura 4.5), per rendere sempre decodificabili le loro comunicazioni, in assenza di interferenza dei segnali primari.

La tecnica di individuazione dei primari è il filtro adattato. Si suppone che se i secondari possono decodificare un messaggio primario, allora possono accedere alle informazioni di livello MAC, estraendo in particolare sia l'indirizzo del trasmettitore, sia quello del ricevitore.

In fase di sensing diretto i secondari sono sempre in grado di individuare i trasmettitori licenziatari che sono all'interno del loro raggio di sensing logico o fisico. La probabilità di falso allarme individuale (ossia la probabilità di stimare scorrettamente impegnato il canale nonostante questo sia effettivamente libero) e di mancata individuazione (ossia la probabilità di valutare libero il canale per effetto di fading o di shadowing, anche se questo è in realtà occupato) sono nulle:  $P_f = P_m = 0$ .

Nel primo periodo di sensing, tutti i terminali primari inviano un messaggio di *discovery* perché i secondari possano rilevarli e possano riempire le proprie liste locali con gli indirizzi dei trasmettitori. Questo garantisce il corretto funzionamento del sensing logico perché, se le liste fossero vuote, i terminali secondari trasmetterebbero con alta probabilità di collisione.

I nodi secondari sono dotati di due dispositivi radio. Il primo è sintonizzato permanentemente sul canale di controllo ed è utilizzato per lo scambio delle informazioni di sensing. Il secondo, invece, è utilizzato a rotazione e periodicamente per eseguire il sensing (per un tempo pari a  $t_S$ , detto *listen time*) o la trasmissione/ricezione (per un tempo  $t_{TX}$ ). L'intervallo di tempo

$(t_S + t_{TX})$  è detto periodo di sensing. Quando è utilizzato per il sensing, la modalità di analisi è wideband, cioè il secondario può analizzare con la stessa antenna tutti i canali primari della griglia OFDM. A fronte di una maggiore complessità hardware, questa configurazione consente di coprire tutti i canali a disposizione e di poter osservare nella sua totalità il processo di occupazione dell'intero spettro. All'aumentare del numero di canali primari analizzati  $N_{CH}$ , i secondari possono incrementare gradualmente la propria efficienza. Un maggior numero di canali a disposizione aumenta il numero di vuoti spettrali disponibili, ma richiede un maggior tempo di ascolto del canale. Nel caso delle simulazioni eseguite, si suppone che il tempo dedicato al sensing ( $t_S$ ) sia sempre maggiore del tempo minimo necessario all'ascolto di tutti i canali. Quando è impiegata per la trasmissione, l'antenna può trasmettere solo su uno degli eventualmente molteplici canali liberi disponibili e per un tempo massimo commisurato al numero di trasmettitori secondari presenti. Nel caso dei secondari che rivestono il ruolo di ricevitori, il ricetrasmittitore deve essere sintonizzato sul canale specificato dal trasmettitore.

Ogni nodo primario è sempre attorniato da un numero sufficiente di secondari, dislocati opportunamente per evitare l'insorgere dei problemi di terminale nascosto, nonostante la cooperazione. In riferimento alla Figura 6.5, si può notare che, pur essendo instaurato un regime di sensing cooperativo, i due soli terminali secondari non possono autonomamente individuare il segnale primario, con conseguente interferenza sul PRX. Il vincolo appena introdotto vigila affinché situazioni di questo genere non si verifichino, ma sia sempre presente almeno un secondario in grado di individuare e pubblicizzare la presenza della trasmissione primaria (come illustrato in Figura 6.6). Un maggior numero di secondari, inoltre, aumenta la probabilità di recupero dei messaggi non decodificati, costringendo così il sensing DiSCo ad utilizzare il sensing fisico solo in pochi casi. Tuttavia, non è garantito il recupero dei messaggi non decodificati nella totalità dei casi. Per evitare le collisioni, come quelle del tipo c illustrato in Figura 4.1, si suppone che i primari trasmettano entro lo scadere del listen time corrente, oppure attendano l'inizio del sensing period successivo, per poter effettuare la propria trasmissione. Tutti i secondari sono sincronizzati tra loro, pertanto l'inizio del

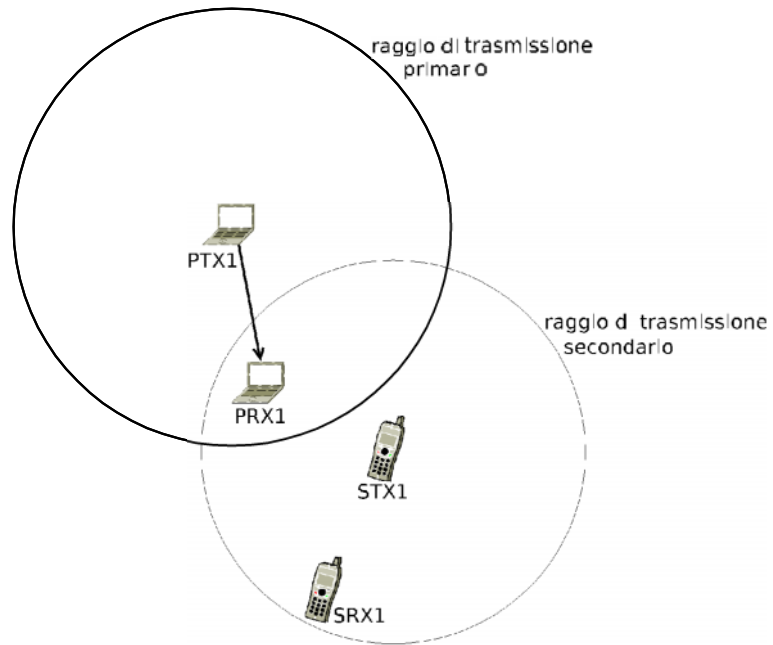


Fig. 6.5: Problema del terminale nascosto non risolvibile.

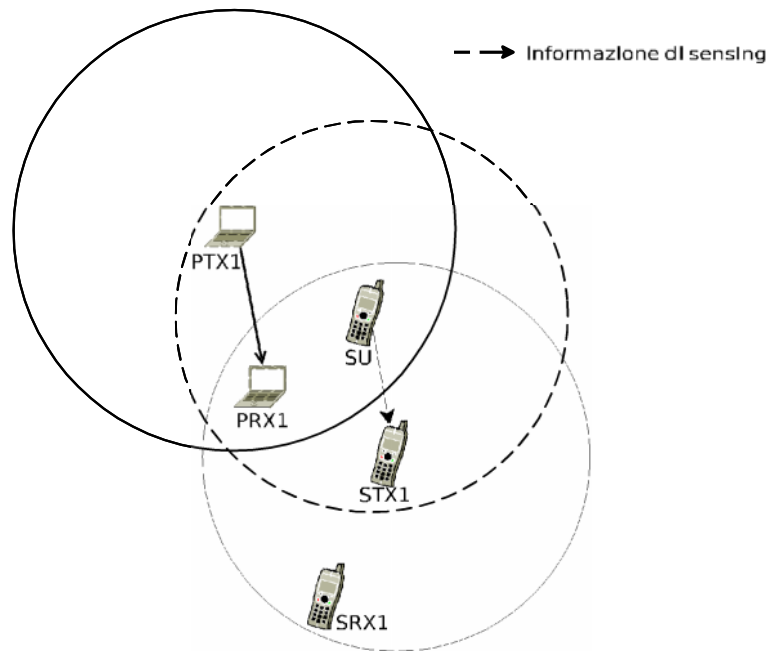


Fig. 6.6: Problema del terminale nascosto risolto grazie alla presenza di un utente secondario aggiuntivo.

listen time è il medesimo per ognuno di essi.

Il canale di controllo (CC) dei secondari può essere ricavato nella banda libera. Si suppone, al di là della sua collocazione fisica, che il canale abbia dei tempi di trasmissione e di propagazione trascurabili e che le trasmissioni avvengano sempre con successo, senza errori né collisioni. I dati inviati sul CC hanno i seguenti scopi. La funzione primaria è quella di permettere ai secondari di condividere i risultati di ciascuna fase di sensing e di scambiare le informazioni per recuperare i messaggi non decodificati e per la scelta del canale. Inoltre, il CC permette alle coppie trasmettitore-ricevitore di accordarsi sul canale da utilizzare per le comunicazioni, nel caso in cui sia disponibile almeno una portante OFDM libera. L'ultimo tipo di informazione in transito sul CC riguarda l'invio di riscontri che i SRX mandano ai loro partner, per confermare il buon esito della trasmissione.

### 6.3 Variabili di ingresso

Le topologie di rete sono state generate casualmente, distribuendo i terminali in modo omogeneo nella rete. Il traffico offerto dai primari ha un intervallo d'attesa  $T$  tra la ricezione di un messaggio e l'invio della relativa risposta, distribuito esponenzialmente con parametro  $\lambda_p$  e valore atteso pari a  $1/\lambda_p$ :

$$P(T = t) = \lambda_p e^{-\lambda_p t}$$

La scelta di alternare per ogni dispositivo il ruolo di trasmettitore e ricevitore è dovuta dal fatto che in questo modo è possibile migliorare l'accuratezza delle simulazioni. Si ipotizzi, ad esempio, uno scenario come quello mostrato in Figura 5.7. In tale frangente, PU1, quando è in fase di trasmissione, assume il ruolo di terminale nascosto per il terminale STX1. Se, però, PU1 svolgesse esclusivamente il ruolo di ricevitore, non emergerebbe durante la simulazione lo scenario di terminale nascosto sottostante. Quindi, grazie all'alternanza dei ruoli tra i due primari è possibile evidenziare l'insorgere di una situazione di terminale nascosto per PU1 nei confronti di STX1.

Secondo il modello utilizzato per la propagazione del segnale, la potenza ricevuta  $P_r$  presso il destinatario, posto ad una distanza  $d$  dal trasmettitore, ha un andamento dato dall'espressione 4.2.

Il raggio di trasmissione primario  $R_p$  è sempre maggiore o uguale al raggio secondario  $R_s$ , pertanto la potenza trasmittiva massima irradiabile dal

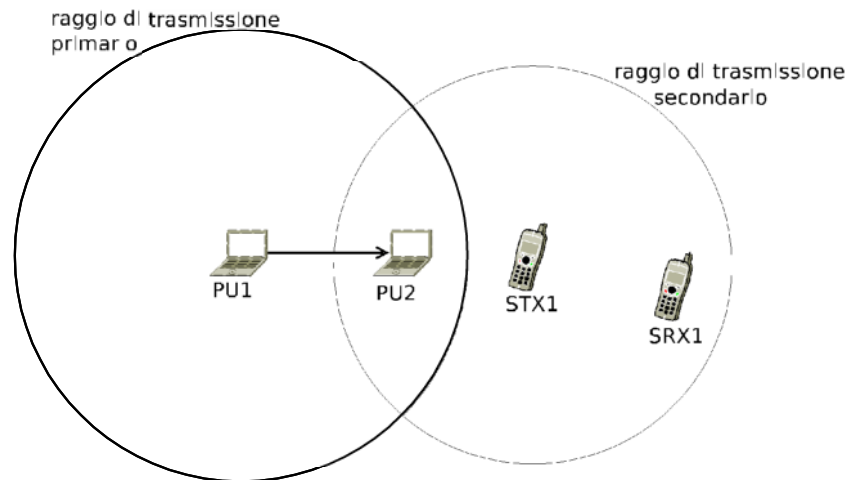


Fig. 6.7: Effetto dell'alternanza dei ruoli di trasmettitore e ricevitore dei terminali primari.

trasmettitore primario è sempre superiore a quella dei secondari. In questo modo, in caso di interferenza, si riduce il numero di ricevitori primari coinvolti. Ipotizzando una potenza emessa dai primari pari a 0.1 mW e di 0.05 mW per i secondari e per entrambi una soglia fisica sulla potenza ricevuta pari a -100 dBm, i raggi di trasmissione corrispondenti sono pari a 47,78 m per i primari e 39,19 m per i secondari. Per quanto riguarda le modalità di calcolo del rapporto segnale con rumore e interferenza (SINR) si assume che il rumore termico abbia una soglia pari a -120 dB. Pertanto, in assenza di interferenze, la soglia fisica (SF) è pari a 20dB. La soglia logica (SL) deve essere maggiore o uguale a quella fisica. Nel caso in cui siano uguali, entrambe varrebbero 20dB. Per valori di SL maggiori di 20dB, si crea una zona di non decodifica, perciò non tutti i messaggi possono essere correttamente decodificati. Nel corso delle simulazioni, la soglia SL è stata imposta ai seguenti valori: 20, 23, 25 e 27 dB, che corrispondono rispettivamente ai raggi logici pari a 39,19 32,15 28,21 e 24,73 metri.

Per un terminale licenziatario i messaggi primari ad esso inviati dal relativo nodo partner sono definiti segnale utile, tutti i messaggi secondari sono, invece, definiti segnali interferenti. Per i terminali secondari, viceversa, il segnale utile è costituito dai messaggi ricevuti dal relativo nodo partner, mentre tutti i segnali primari sono segnali interferenti. Si ricorda che, in base alle ipotesi iniziali, i segnali primari e secondari non interferiscono tra loro stessi.



Il modulo decider ha il compito di controllare se si sono verificati su un dato messaggio eventi di interferenza. Si suppone che sia i primari sia i secondari non siano in grado di recuperare parti corrotte di segnale: ne consegue che i messaggi devono necessariamente essere totalmente integri. In particolare, è sufficiente che anche in un solo istante il SINR sia sceso al di sotto della soglia logica per dichiarare illeggibile un messaggio. In tabella 5.1 sono sintetizzati tutti i parametri mantenuti costanti al variare delle simulazioni.

Parametro	Descrizione	Valore
$P_{o,P}$	Potenza massima emessa dai trasmettitori primari	0,1 mW
$P_{o,S}$	Potenza massima emessa dai trasmettitori secondari	0,05 mW
$R_P$	Raggio di copertura primario	47,78 m
$R_S$	Raggio di copertura secondario	39,98 m
SF	Soglia fisica sui segnali ricevuti	-100 dBm / 20dB
$f_{\min} - \lambda_{\max}$	Minima frequenza - Massima lunghezza d'onda del canale radio utilizzato	868 MHz - 0,345 m
$\gamma$	costante di attenuazione	3,5
$R_{CC}$	velocità del canale di controllo	$\infty$

Tabella 6.1: Valori dei parametri mantenuti costanti nel corso delle simulazioni.

Uno dei vincoli dello schema di sensing proposto consiste nel fatto che i primari trasmettano il proprio traffico asincrono entro la fine del periodo di sensing, in modo che i secondari siano sempre in grado di sentire le trasmissioni primarie durante il tempo di sensing  $t_S$  (come mostrato in Figura 4.1). La prevenzione delle collisioni, dunque, non dipende dalla durata del periodo di sensing ma esclusivamente dalla topologia di rete generata casualmente. Per questo motivo il periodo di sensing è stato suddiviso in due parti di durata fissata: il 55% del tempo è dedicato al sensing, mentre il restante 45% è dedicato alla trasmissione.

Il numero di utenti secondari  $N_S$  è pari a circa 2,5 volte il numero di primari  $N_P$ . Questo favorisce la cooperazione dei secondari sia per il sensing, sia per il recupero dei messaggi non decodificati. Durante le simulazioni

il numero dei primari è stato fissato a  $N_P = 108$  e quello dei secondari a  $N_S = 276$ . Per quanto riguarda il numero di canali usati è stato scelto un minimo di due e un massimo di quattro, di banda rispettivamente: 10-20-30-40 MHz.

## 6.4 Fattori di merito

Le prestazioni degli schemi di sensing cambiano in funzione dei seguenti parametri:

- il numero di canali primari disponibili  $N_{CH}$  ;
- il numero di hop di propagazione delle informazioni di sensing  $N_{HOP}$  ;
- la frequenza di trasmissione dei primari  $\lambda_P$  ;
- il valore della soglia di sensing logico SL.

Nel seguito le prestazioni degli schemi di sensing analizzati sono quantificate mediante i parametri sotto elencati.

- Traffico primario sul canale ( $T_P$ ): indica l'intensità del traffico primario presente sul canale, misurato in pacchetti/s. Ogni primario attende un tempo casuale  $T$  prima di rispondere al proprio nodo partner. Tale variabile è distribuita esponenzialmente con parametro  $\lambda_P$ . Il valore atteso è pari a  $1/\lambda_P$ , pertanto all'aumentare dell'intensità  $\lambda_P$  diminuisce il relativo tempo d'attesa tra un messaggio e la relativa risposta, con conseguente incremento dei messaggi primari inviati sul canale. Nella seguente analisi prestazionale il traffico primario è misurato nella sua versione normalizzata, ossia rispetto al proprio valore massimo, corrispondente a un intervallo  $T=0$  tra un messaggio e la relativa risposta. Nella tabella 6.2, sono riportati i valori del traffico primario utilizzati.
- Throughput di trasmissione dei secondari (TH): indica lo sfruttamento del canale inteso come rapporto banda-messaggi secondari trasmessi in ciascun canale a banda diversa.

- Efficienza di trasmissione dei secondari ( $\eta_S$ ): indica la percentuale di messaggi secondari trasmessi con successo rispetto al totale di pacchetti inviati da un utente secondario. Il valore dell'efficienza è intrinsecamente legato al valore del parametro  $\lambda_p$  e dell'accuratezza dei risultati ottenuti in fase di sensing. Il meccanismo di accesso al canale per i secondari è di tipo a rotazione:

Numero medio di trasmissioni primarie:	114	177,75	324	713
Numero medio di trasmissioni primarie normalizzato:	0,07	0,11	0,20	0,44
Numero medio di trasmissioni primarie inviate in un periodo di sensing:	1,9	2,96	5,4	11,88

Tabella 6.2: Valori del traffico primario usati nel corso delle simulazioni.

il tempo di trasmissione, di durata  $t_{TX}$  è suddiviso in  $N_S$  sotto intervalli identici, ciascuno riservato ad un trasmettitore secondario. Ne consegue che il valore del tempo di trasmissione influenza la massima efficienza raggiungibile dai secondari, ma è contemporaneamente vincolato anche dal numero di dispositivi secondari totale che accedono ai vuoti spettrali a rotazione. Ogni secondario può, in base ai risultati della fase di sensing, accedere al canale, oppure no. Se il vuoto spettrale può essere sfruttato, allora il bit rate raggiungibile massimo è pari a:

$$R_i = \frac{t_{TX}}{(t_{TX} + t_S)N_S} C_{x_i(t)} \quad 1 \leq i \leq N_S$$

dove  $x_i(t)$  è una funzione binaria che vale 1 se la fase di sensing autorizza la trasmissione e 0 altrimenti. Nei risultati presentati in seguito, l'efficienza è normalizzata al valore massimo ottenuto nel caso in cui il traffico primario è nullo.

- Probabilità di collisione sui primari ( $P_C$ ): indica la probabilità che un messaggio secondario si sovrapponga ad uno primario, anche parzialmente, presso il medesimo ricevitore. È calcolata come il numero di messaggi collisi, sul totale di inviati da un utente primario al suo partner.
- Utilizzo dei canali (U): indica la percentuale di utilizzo dei canali da parte dei secondari.

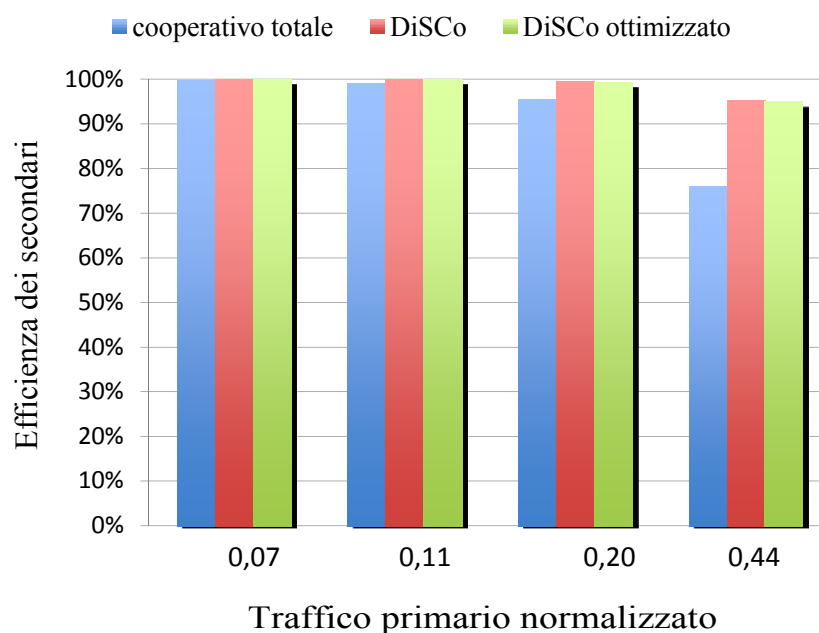
## 6.5 Risultati numerici

In questo paragrafo sono confrontati i risultati numerici ottenuti con gli schemi di sensing presentati nel capitolo 4 e 5: il sensing cooperativo totale, il sensing DiSCo e il sensing DiSCo ottimizzato. Le prestazioni sono confrontate in termini di efficienza, throughput, probabilità di collisione con i primari e utilizzo dei canali da parte dei secondari, in funzione del numero di hop, del traffico dei primari e del valore della soglia di sensing logico uguale o maggiore della soglia di sensing fisico.

### 6.5.1 Efficienza

In Fig. 6.8 è mostrata l'efficienza al variare del numero di hop; in tutti e tre i casi di sensing l'efficienza diminuisce all'aumentare del numero di hop; infatti il sensing cooperativo totale riduce drasticamente le opportunità di trasmissione dei secondari perchè le informazioni di sensing bloccano tutti i nodi che le ricevono. Anche nel sensing DiSCo e DiSCo ottimizzato il sensing fisico riduce le occasioni di trasmissione ad un numero di secondari sempre maggiore ma in misura minore rispetto al sensing cooperativo totale grazie all'utilizzo del meccanismo di recupero dei messaggi; infatti le informazioni di sensing logico hanno effetto solo sui nodi più vicini ai secondari che decodificano le trasmissioni primarie. Con un numero di hop maggiore di due, quindi, le informazioni logiche non riducono le occasioni di trasmissioni secondarie, perché ci si allontana sempre di più dal ricevitore primario. Questo spiega perché aumentando il numero di hop, l'efficienza diminuisce di meno nel caso del sensing DiSCo. Le informazioni del sensing cooperativo totale, invece, continuano ad inibire le trasmissioni secondarie anche quando non è necessario. Questo conferma l'inefficienza di questo schema di sensing.

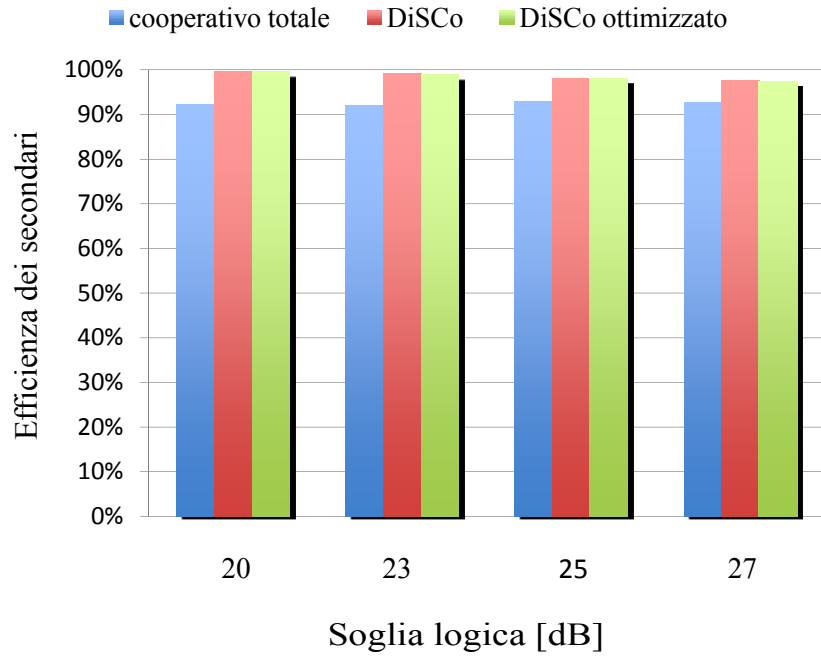
Infine si nota che l'efficienza dei sensing DiSCo è uguale poichè le opportunità di trasmissione sono uguali, il numero di messaggi inviati è lo stesso, ciò che cambia infatti è la sola fase di accesso, di selezione del canale (non essendoci collisioni tra secondari i messaggi inviati sono trasmessi con successo, è diversa invece la probabilità di creare interferenza sui ricevitori primari, come spiegato nel paragrafo 6.5.3).



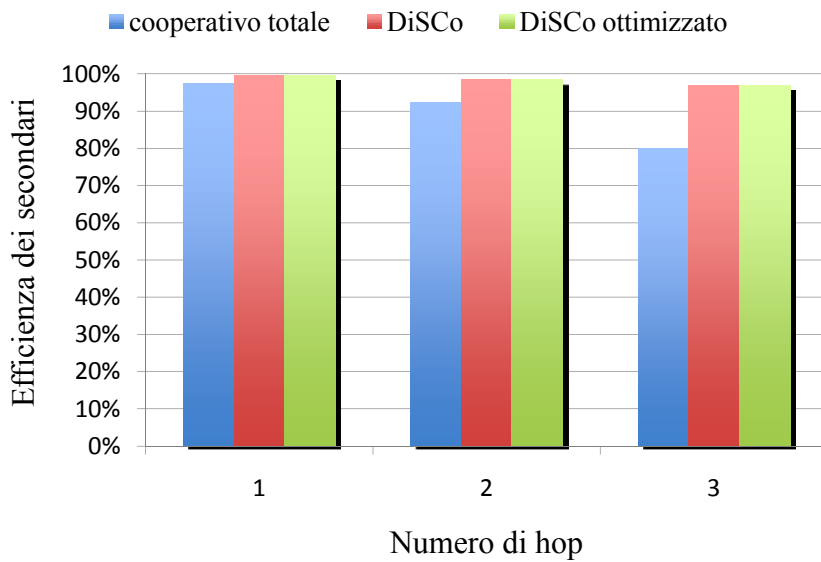
**Fig. 6.8:** Efficienza di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{OP}}=2$  e  $N_{CH}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.

La Fig. 6.9 mostra l'efficienza al variare del traffico primario; in tutti e tre i casi di sensing l'efficienza diminuisce all'aumentare del traffico dei primari poichè diminuiscono i vuoti spettrali individuati dai secondari, ovvero le opportunità di trasmissione e di conseguenze si riduce l'efficienza, in misura minore nei sensing DiSCo rispetto al sensing cooperativo totale grazie all'utilizzo del meccanismo di recupero dei messaggi.

Il grafico in Fig. 6.10 mostra l'efficienza al variare del valore di soglia del sensing logico ( $SL=20-23-25-27$  dB, soglia fisica SF sempre fissa a 20 dB); nei due casi di sensing DiSCo l'efficienza diminuisce all'aumentare della soglia logica poichè aumenta il numero di messaggi primari non decodificati, ovvero si riescono a recuperare sempre meno messaggi primari, quindi entra in funzione più spesso il sensing fisico che riduce le opportunità di trasmissione dei secondari e di conseguenza riduce l'efficienza. Nel sensing cooperativo totale invece l'efficienza non varia all'aumentare della soglia logica poichè, non utilizzando il meccanismo di recupero dei messaggi, ne è indipendente (che il secondario abbia decodificato oppure no il primario, inibisce la trasmissione). L'efficienza nel sensing cooperativo totale risulta minore rispetto ai sensing DiSCo poichè non sfrutta il meccanismo di recupero dei messaggi.

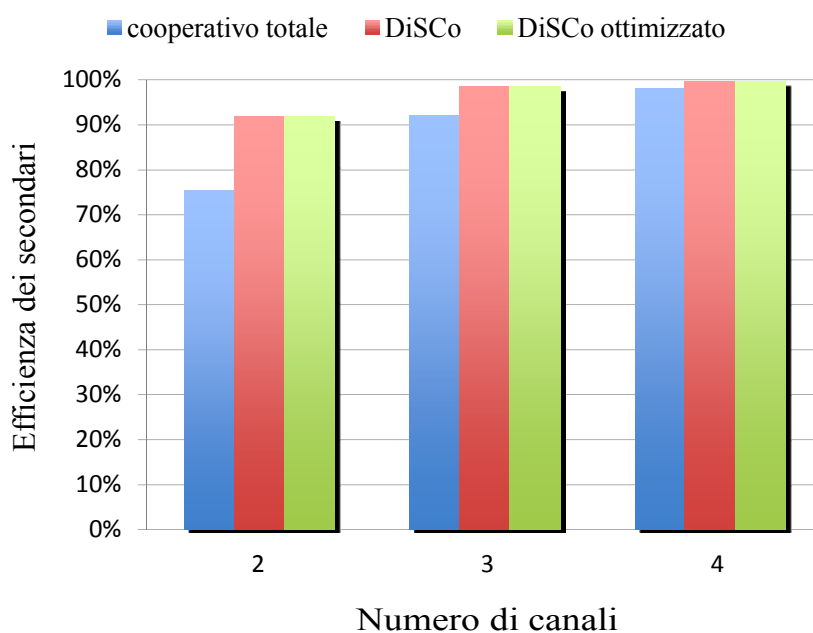


**Fig. 6.9:** Efficienza di trasmissione dei secondari con  $N_{HOP}=2$  e  $N_{CH}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.



**Fig. 6.10:** Efficienza di trasmissione dei secondari con  $N_{HOP}=1, 2, 3$  e  $N_{CH}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.

Il grafico di Fig. 6.11 mostra l'efficienza al variare del numero di canali; in tutti e tre i casi di sensing l'efficienza incrementa all'aumentare del numero di canali primari poichè aumentano i vuoti spettrali individuati dai secondari, ovvero le opportunità di trasmissione; l'efficienza nei sensing DiSCo è maggiore rispetto al sensing cooperativo totale grazie all'utilizzo del meccanismo di recupero dei messaggi.



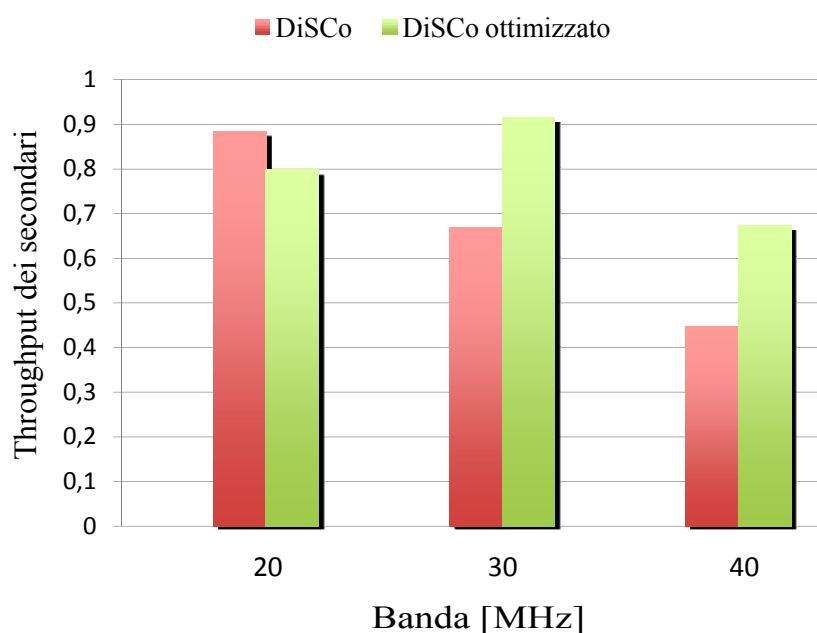
**Fig. 6.11:** Efficienza di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{OP}}=2$  e  $N_{CH}=2, 3$  e 4 nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.

## 6.5.2 Throughput

Il throughput essendo dato dal rapporto tra banda del canale e nodi secondari che vi hanno trasmesso, è valutato nel solo caso di sensing DiSCo e sensing DiSCo ottimizzato perché è misurato a parità di messaggi trasmessi, diversi nel sensing cooperativo totale che, utilizzando il solo sensing fisico, inibisce maggiormente le trasmissioni; nei sensing DiSCo le opportunità di trasmissione sono uguali, ciò che cambia è la fase di accesso, di selezione del canale.



Dalla Fig. 6.12 si nota un throughput maggiore nel DiSCo ottimizzato poiché la strategia di selezione del canale permette di distribuire, di bilanciare le trasmissioni dei secondari in base alla banda a disposizione dei canali liberi e al numero di accessi agli stessi. Il sensing DiSCo, scegliendo casualmente tra i canali liberi presenta quindi uno sfruttamento meno efficiente ed un throughput più basso per i canali di banda 20 e 30 MHz; nel canale a banda pari a 40 MHz invece il throughput risulta più elevato del sensing DiSCo ottimizzato poiché quest'ultimo sfrutta maggiormente il canale a banda maggiore. Si può notare inoltre che il sensing DiSCo ottimizzato presenta un throughput maggiore per il canale a banda intermedia, poiché rappresenta un miglior compromesso tra banda maggiore e numero minore di secondari che occupano il canale.



**Fig. 6.12:** Throughput di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{ OP}}=2$  e  $N_{C\text{ H}}=3$  nei casi di sensing DiSCo e DiSCo ottimizzato.

### 6.5.3 Probabilità di collisione

Per quanto riguarda la probabilità di collisione in corrispondenza dei ricevitori primari, si distinguono vari casi che dipendono dal valore della soglia logica (la soglia fisica è fissata a 20 dB):

- soglia logica = 20 dB e numero di hop = 1: quando le informazioni di sensing sono propagate fino a 1 hop nella rete, la probabilità di collisione diminuisce all'aumentare del traffico primario, come nell'esempio in Figura 6.2, perchè diminuiscono i vuoti spettrali individuati dai secondari e, di conseguenza, i casi di interferenza (Fig. 6.13); si nota, inoltre, che  $P_C$  è più alta nel caso dei due sensing DiSCo con 1 hop, perchè questi schemi di sensing inibiscono di meno le occasioni di trasmissione ai secondari, rispetto al sensing cooperativo totale con 1 hop (Fig. 6.15);

- soglia logica = 20 dB e numero di hop  $\geq 2$ : la probabilità di collisione si annulla per un numero di hop maggiore o uguale a due (Figura 6.13). Questo significa che i problemi di terminale nascosto sono risolti quando la cooperazione tra i secondari coinvolge i nodi ad almeno 2 hop di distanza, come nell'esempio in Figura 6.1. Questo risultato, però è ottenuto in due modi diversi: nel caso dei sensing DiSCo per mezzo del sensing logico, nel caso del sensing cooperativo totale per mezzo del sensing fisico.

- soglia logica = 23/25/27 dB e numero di hop  $\geq 1$ : nei tre casi di sensing la probabilità di collisione diminuisce all'aumentare del traffico dei primari perchè diminuiscono i vuoti spettrali individuati dai secondari e, di conseguenza, i casi di interferenza, come mostrato in Fig. 6.13;

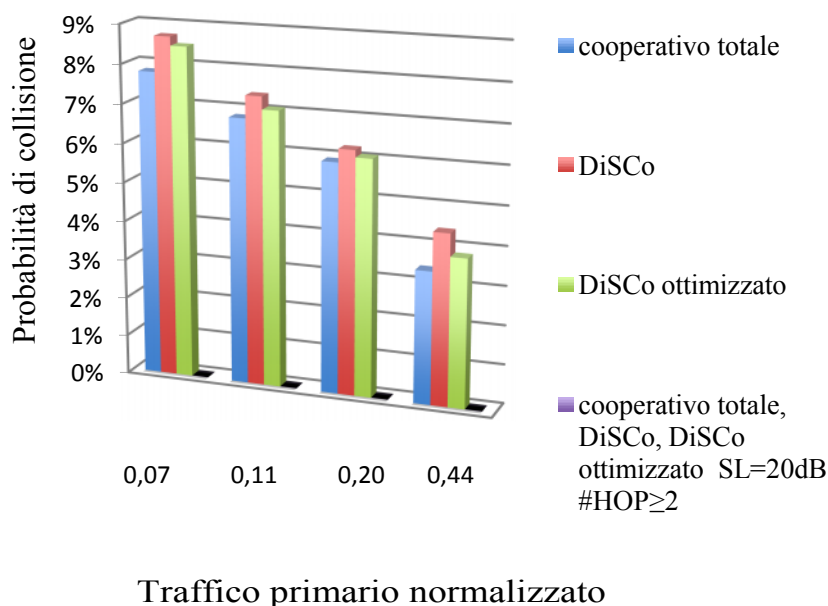
- soglia logica = 23/25/27 dB e numero di hop  $\geq 1$ : come mostrato in Fig. 6.14, nei tre casi di sensing la probabilità di collisione diminuisce all'aumentare del numero di canali primari poichè risulta meno probabile che i secondari, avendo a disposizione più canali liberi, trasmettano proprio sul canale utilizzato dai primari;

- soglia logica = 23/25/27 dB e numero di hop  $\geq 1$ : nei tre casi di sensing la probabilità di collisione diminuisce all'aumentare del numero di hop perchè il sensing fisico si diffonde maggiormente nella rete, come mostrato in Fig. 6.15;

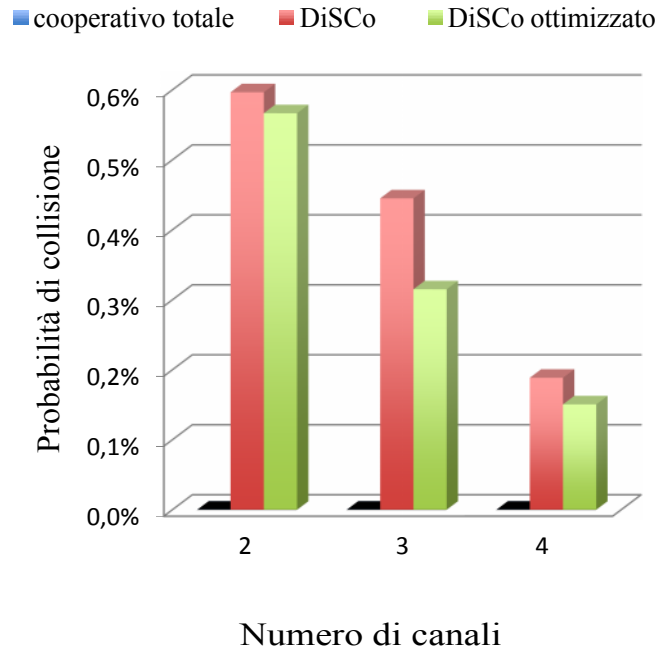
- soglia logica = 23/25/27 dB e numero di hop  $\geq 1$ : come mostrato in Fig. 6.16, nei due casi di sensing DiSCo la probabilità di collisione aumenta all'aumentare della soglia logica poichè si recuperano sempre meno messaggi primari; si nota che le interferenze con i primari non sono più nulle come nel caso in cui le soglie logiche sono uguali. Il fatto che si presentino dei casi di interferenza è dovuto al fatto che le liste locali dei secondari non contengono gli identificativi dei primari situati nella zona di non decodifica, quando non è possibile recuperare le loro trasmissioni. Anche se le informazioni di sensing sono inoltrate fino a due hop di distanza, come

mostrato in Figura 5.1, le collisioni si verificano quando i messaggi di sensing logico non trovano le stesse corrispondenze nelle liste locali che si otterrebbero se la soglia di sensing logico fosse impostata, come la soglia fisica, a 20 dB. Questo si verifica più spesso all'aumentare della soglia logica, perché si recuperano sempre meno messaggi.

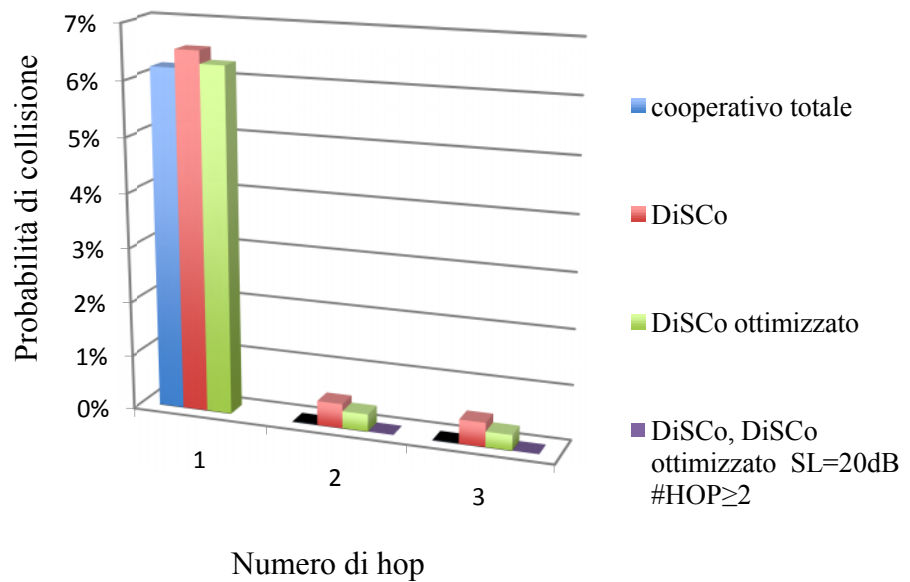
Nei casi esposti sopra, rispetto al sensing cooperativo totale, la probabilità di collisione è maggiore o uguale nel caso dei due sensing DiSCo perché questo schema di sensing ha un'efficienza più alta e inibisce di meno le occasioni di trasmissione ai secondari; inoltre il sensing DiSCo ottimizzato, rispetto al sensing DiSCo, presenta una probabilità di collisione con i primari minore grazie alla strategia di selezione del canale implementata che permette di selezionare, tra i canali liberi dalle trasmissioni dei primari, quelli a minore probabilità di collisione.



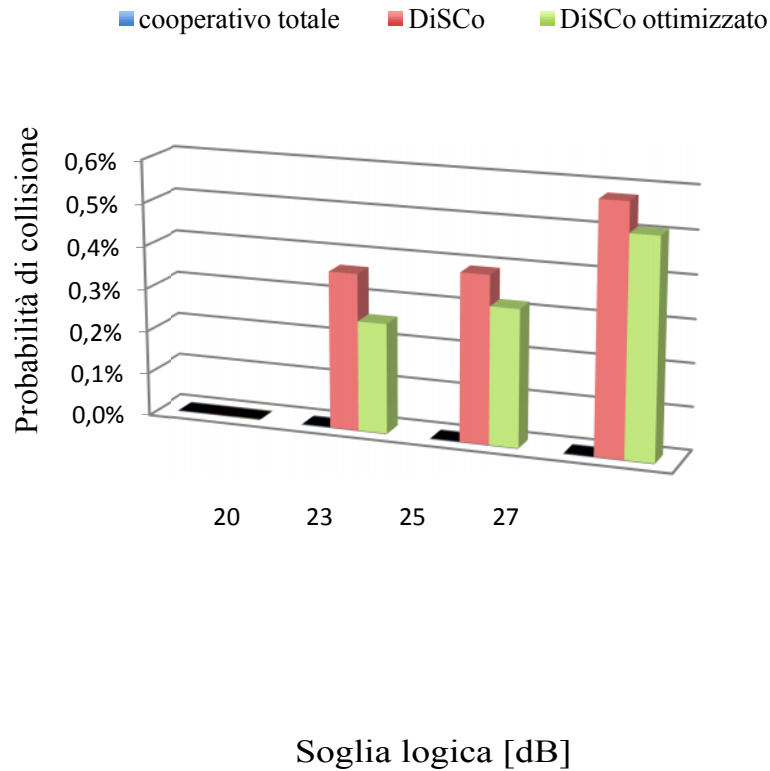
**Fig. 6.13:** Probabilità di collisione dei primari con  $N_{HOP} = 1$  e  $N_{CH} = 3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.



**Fig. 6.14:** Probabilità di collisione dei primari con  $N_{HOP}=2$  e  $N_{CH}=2, 3$  e 4 nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.



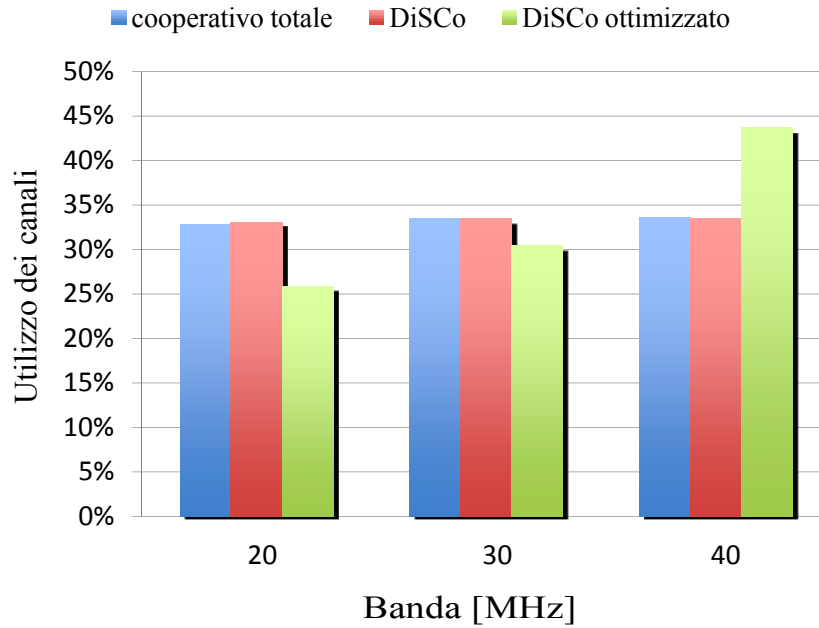
**Fig. 6.15:** Probabilità di collisione dei primari con  $N_{HOP}=1, 2, 3$  e  $N_{CH}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.



**Fig. 6.16:** Probabilità di collisione dei primari con  $N_{H\text{ OP}}=2$  e  $N_{C\text{ H}}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.

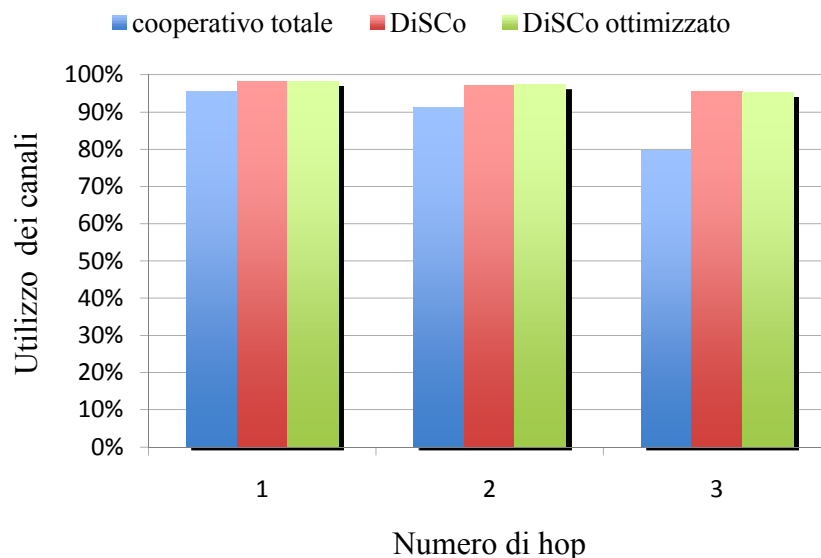
### 6.5.4 Utilizzo dei canali

In Fig. 6.17 è mostrata la percentuale di utilizzo dei canali ciascuno a banda diversa (in questo caso tre) nel sensing cooperativo totale, sensing DiSCo e sensing DiSCo ottimizzato; nei primi due tipi di sensing si nota che i canali sono usati in percentuale uguale perchè in presenza di due o più canali liberi la scelta è casuale mentre è diversa la percentuale di utilizzo dei canali nel sensing ottimizzato poichè la scelta si basa sulla banda del canale e sulle stime precedenti di probabilità di collisione con i primari e numero di secondari che occupano i canali; in quest'ultimo caso quindi si nota che vengono sfruttati maggiormente i canali a banda superiore, tenendo comunque sempre conto del compromesso tra le tre stime sopra citate (maggiore banda, minore probabilità di collisione e minore numero di secondari).



**Fig. 6.17:** Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{ OP}}=2$  e  $N_{C\text{ H}}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.

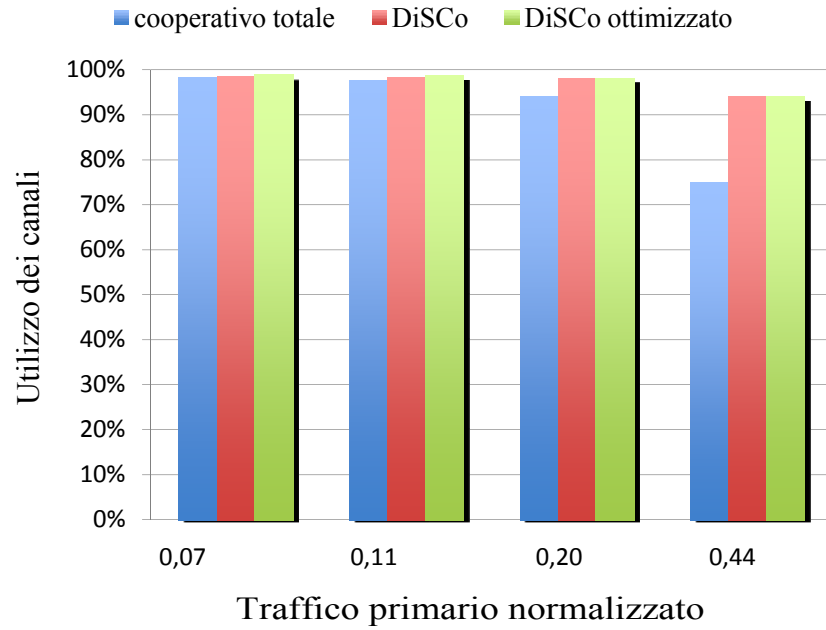
In Fig. 6.18 è mostrato l'utilizzo totale (normalizzato al valore massimo ottenuto nel caso in cui il traffico primario è nullo) dei canali al variare del numero di hop; in tutti e tre i casi di sensing l'utilizzo dei canali diminuisce all'aumentare del numero di hop; infatti il sensing cooperativo totale riduce drasticamente le opportunità di trasmissione dei secondari perchè le informazioni di sensing bloccano tutti i nodi che le ricevono. Anche nel sensing DiSCo e DiSCo ottimizzato il sensing fisico riduce le occasioni di trasmissione ad un numero di secondari sempre maggiore ma in misura minore rispetto al sensing cooperativo totale grazie all'utilizzo del meccanismo di recupero dei messaggi. Infine si nota che l'utilizzo dei canali dei sensing DiSCo è uguale poichè il grafico ne mostra l'utilizzo totale sui tre canali.



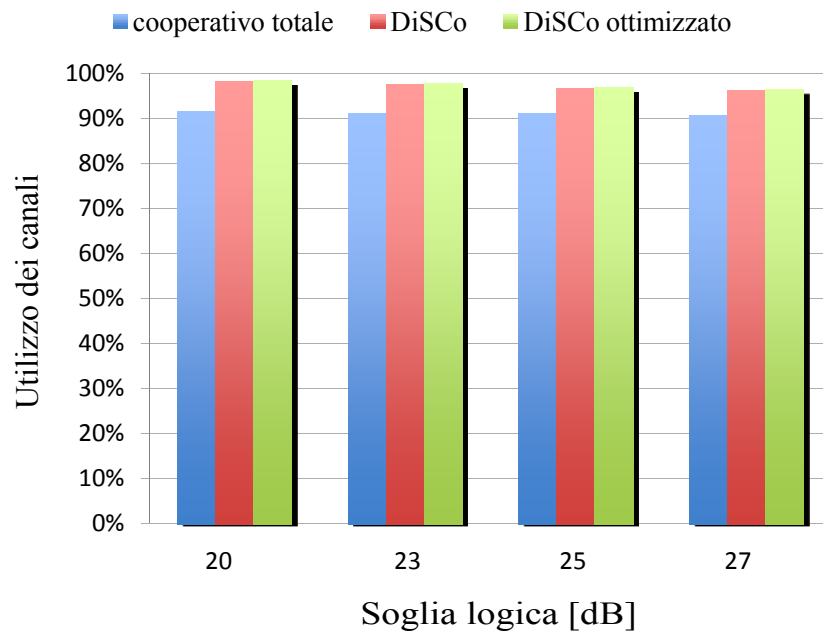
**Fig. 6.18:** Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{ OP}} = 1, 2, 3$  e  $N_{C\text{ H}} = 3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.

La Fig. 6.19 mostra l'utilizzo totale dei canali al variare del traffico primario; in tutti e tre i casi di sensing l'utilizzo dei canali diminuisce all'aumentare del traffico dei primari poichè diminuiscono i vuoti spettrali individuati dai secondari, ovvero le opportunità di trasmissione e di conseguenza si riduce l'utilizzo dei canali, in misura minore nei sensing DiSCo rispetto al sensing cooperativo totale grazie all'utilizzo del meccanismo di recupero dei messaggi.

Il grafico in Fig. 6.20 mostra l'utilizzo totale dei canali al variare del valore di soglia del sensing logico ( $SL=20-23-25-27$  dB, soglia fisica SF sempre fissa a 20 dB); nei due casi di sensing DiSCo l'utilizzo dei canali diminuisce all'aumentare della soglia logica poichè aumenta il numero di messaggi primari non decodificati, ovvero si riescono a recuperare sempre meno messaggi primari, quindi entra in funzione più spesso il sensing fisico che riduce le opportunità di trasmissione dei secondari e di conseguenza riduce l'utilizzo dei canali. Nel sensing cooperativo totale invece l'utilizzo dei canali non varia all'aumentare della soglia logica poichè, non utilizzando il meccanismo di recupero dei messaggi, ne è indipendente (che il secondario abbia decodificato oppure no il primario, inibisce la trasmissione). L'utilizzo dei canali nel sensing cooperativo totale risulta minore rispetto ai sensing DiSCo poichè non sfrutta il meccanismo di recupero dei messaggi.



**Fig. 6.19:** Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{ OP}}=2$  e  $N_{C\text{ H}}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.



**Fig. 6.20:** Utilizzo dei canali di trasmissione dei secondari con  $N_{H\text{ OP}}=2$  e  $N_{C\text{ H}}=3$  nei casi di sensing DiSCo, DiSCo ottimizzato e cooperativo totale.



# Conclusioni

L'inefficienza dell'allocazione statica delle risorse radio ha portato alla ricerca di meccanismi alternativi di accesso allo spettro, prima tra tutti la tecnologia radio cognitiva, che mira ad utilizzare opportunisticamente i periodi di inattività del canale, tutelando le trasmissioni dei nodi primari. La più grande difficoltà da affrontare per la prevenzione dell'interferenza con i primari consiste nel fatto che i terminali secondari non possono interagire con i licenziatari. Un possibile modo per individuarne la presenza è quello di intercettare il segnale trasmesso.

La condivisione delle informazioni relative allo stato occupazionale del canale, permette ai secondari di cooperare in modo da evitare le collisioni presso i ricevitori primari. Il sensing logico consente di decodificare il segnale primario per accedere alle informazioni in esso contenute. Così, i dispositivi secondari sono in grado di ottenere indirettamente le informazioni relative alla presenza di ricevitori. Tuttavia, non è sempre possibile decodificare le trasmissioni primarie a causa della doppia soglia di sensing. Questo comporta delle inefficienze nel funzionamento del sensing logico, perché al crescere della soglia di decodifica i secondari riescono ad identificare sempre meno terminali primari nel proprio raggio di sensing. Grazie alla tecnica del recupero dei messaggi non decodificati è possibile ottenere delle prestazioni molto simili a quelle del caso ideale, in cui tutti i messaggi ricevuti sono correttamente decodificati, raggiungendo un buon compromesso in termini di

efficienza dei vuoti spettrali e probabilità di collidere con i primari. Lo schema di sensing DiSCo e DiSCo ottimizzato migliorano nettamente l'efficienza di trasmissione dei secondari nei confronti del sensing cooperativo totale e la probabilità di collisione diminuisce al crescere del numero di hop a cui sono inoltrate le informazioni di sensing.

Altro aspetto rilevante è la scelta migliore delle risorse a disposizione, ovvero la scelta del canale migliore tra quelli disponibili in termini di banda, occupazione del canale da parte dei dispositivi secondari e probabilità di collisione presso i ricevitori primari.

Lo schema di sensing DiSCo ottimizzato, proposto in questa tesi, grazie all'utilizzo ed alla condivisione tra i secondari di stime sull'occupazione dei canali e sulla probabilità di collisione dei primari, permette una migliore distribuzione delle trasmissioni dei secondari sui canali a bande differenti, ottenendo, rispetto al sensing DiSCo, un throughput maggiore e una minore probabilità di interferenza sui ricevitori primari.

Possibili sviluppi futuri consistono nell'implementazione di un protocollo MAC opportunistico o di un protocollo di routing per reti cognitive.

# Bibliografia

- [1] Draft supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems - lan/man specific requirements - part 11: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications: Specification for radio resource measurement. The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc. Std. IEEE 802.11k/D0.7, Oct. 2003.
- [2] Specification of the bluetooth system, master table of contents & compliance requirements. Bluetooth, SIG Std. Bluetooth Standard, Nov. 2004.
- [3] Nabeel Ahmed, David Hadaller, and Srinivasan Keshav. Guess: gossiping updates for efficient spectrum sensing. In *MobiShare '06: Proceedings of the 1st international workshop on Decentralized resource sharing in mobile computing and networking*, pages 12–17, New York, NY, USA, 2006.
- [4] I. Akyildiz, Won-Yeol Lee, and K. Chowdhury. Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks. *IEEE Network*, 23(4):6–12, July/August 2009.
- [5] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, and Kaushik R. Chowdhury. CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks (Elsevier) Journal*, 7(5):810–836, July 2009.

- [6] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, and Shantidev Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Comput. Netw.*, 50(13):2127–2159, 2006.
- [7] I.F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, M.C. Vuran, and S. Mohanty. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(4):40–48, 2008.
- [8] H. Zheng C. Peng and B. Y. Zhao. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access. *ACM Mobile Networks and Applications (MONET)*, 11(4):555–76, Aug. 2006.
- [9] D. Cabric, S.M. Mishra, and R.W. Brodersen. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, volume 1, pages 772–776 Vol.1, 2004.
- [10] M. Cesana, E. Ekici, and Y. Bar-Ness. Networking over multi-hop cognitive networks. *IEEE Network*, 23(4):4–5, July/August 2009.
- [11] T. Charles Clancy. Dynamic spectrum access using the interference temperature model. *Annals of Telecommunications*, 64(7):573–592, August 2009.
- [12] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and N. Sai Shankar. IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In *Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005*, pages 328–337, November 8–11, 2005.
- [13] Sito della Federal Communication Commission (FCC). <http://www.fcc.gov/oet/info/database/spectrum/>.
- [14] A.L. Drozd, I.P. Kasperovich, C.E. Carroll, and A.C. Blackburn. Computational electromagnetics applied to analyzing the efficient utilization of the rf transmission hyperspace. In *Proc. IEEE/ACES International*

Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, pages 1077–1085, 2005.

- [15] Kolodzy et al. Next generation communications: Kickoff meeting. In DARPA, Oct. 2001.
- [16] A. Fehske, J. Gaeddert, and J. H. Reed. A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 144–150, November 8–11, 2005.
- [17] G. Ganesan and Y. Li. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 137–143, November 8–11, 2005.
- [18] S. Geirhofer, Lang Tong, and B. M. Sadler. Cognitive radios for dynamic spectrum access - dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting white space. *Communications Magazine, IEEE*, 45(5):66–72, May 2007.
- [19] A. Ghasemi and E. S. Sousa. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 131–136, November 8–11, 2005.
- [20] A. Ghasemi and E. S. Sousa. Spectrum sensing in cognitive radio networks: the cooperation-processing tradeoff. *Wireless Communications Mobile Computing*, 7(9):1049–1060, May 2007.
- [21] N. Golmie, N. Chevrollier, and O. Rebala. Bluetooth and wlan coexistence: challenges and solutions. *Wireless Communications, IEEE*, 10(6):22–29, 2003.
- [22] J. Hillenbrand, T.A. Weiss, and F.K. Jondral. Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems. *IEEE Communications Letters*, 9(4):349–351, 2005.

- [23] Omer Ileri. Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server. In Proc. of IEEE DySPAN, pages 194–202, 2005.
- [24] Sito internet del simulatore ad eventi discreti OMNeT++: <http://www.omnetpp.org>.
- [25] S. Krishnamurthy, M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash. Control channel based mac-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks. In Proc. IEEE Military Communications Conference MILCOM 2005, pages 455–460 Vol. 1, 2005.
- [26] Won-Yeol Lee and I.F. Akyildiz. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions*, 7(10):3845–3857, 2008.
- [27] L. Ma, X. Han, and C.-C. Shen. Dynamic open spectrum sharing mac protocol for wireless ad hoc networks. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 203–213, 8–11 Nov. 2005.
- [28] Rekha Menon, R.M. Buehrer, and J.H. Reed. Outage probability based comparison of underlay and overlay spectrum sharing techniques. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 101–109, 2005.
- [29] S.M. Mishra, A. Sahai, and R.W. Brodersen. Cooperative sensing among cognitive radios. In Proc. IEEE International Conference on Communications ICC '06, volume 4, pages 1658–1663, 2006.
- [30] Yiyang Pei, Anh Tuan Hoang, and Ying-Chang Liang. Sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks: How frequently should spectrum sensing be carried out? In Proc. IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC 2007, pages 1–5, September 3–7, 2007.

- [31] Anant Sahai, Niels Hoven, and Rahul Tandra. Some fundamental limits on cognitive radio. In in Forty-second Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 2004.
- [32] N. S. Shankar, C. Cordeiro, and K. Challapali. Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 160–169, November 8–11, 2005.
- [33] Chunhua Sun, Wei Zhang, and K.B. Letaief. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints. In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2007, pages 1–5, 2007.
- [34] R. Tandra and A. Sahai. Snr walls for feature detectors. In Proc. 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2007, pages 559–570, April 17–20, 2007.
- [35] H. Tang. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 151–159, 2005.
- [36] Qiwei Wang and Haitao Zheng. Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks. In Proc. 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference CCNC 2006, volume 1, pages 625–629, 2006.
- [37] B. Wild and K. Ramchandran. Detecting primary receivers for cognitive radio applications. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 124–130, November 8–11, 2005.
- [38] T. Yucek and H. Arslan. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11(1):116–130, 2009.

- [39] Lan Zhang, Ying-Chang Liang, and Yan Xin. Joint admission control and power allocation for cognitive radio networks. In Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP 2007, volume 3, pages III-673-III-676, April 15-20, 2007.
- [40] H. Zheng and Lili Cao. Device-centric spectrum management. In Proc. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2005, pages 56-65, 2005.
- [41] Ilaria Malanchini, Matteo Cesana, Nicola Gatti: On Spectrum Selection Games in Cognitive Radio Networks. In Proceedings of the 21<sup>th</sup> IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM); Honolulu, USA, November 30 - December 4, 2009.
- [42] L. Marìn, L. Giupponi: Performance evaluation of spectrum decision schemes for a Cognitive Ad-Hoc Network, 978-1-4244-2644-7/08 © 2008 IEEE.
- [43] Leith, D. J. and Clifford, P. (2006) A self-managed distributed channel selection algorithm for WLANs. In: 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006. IEEE, pp. 1-9. ISBN 0-7803-9549-2.
- [44] Mubashir Husain Rehmani, Aline Carneiro Viana, Hicham Khalife and in Serge Fdida. Toward reliable contention-aware data dissemination multi-hop cognitive radio ad-hoc networks, INRIA RESEARCH REPORT RR-7288 DECEMBER 2009.