



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
TESI DI LAUREA TRIENNALE

RADIO COGNITIVE: STATO DELL'ARTE

RELATORE: Ch.mo Prof. Tomasin Stefano

LAUREANDO: *Vianello Leonardo*

Padova, 18 Febbraio 2010

Indice

1	Introduzione	1
2	Motivazioni	3
3	Caratteristiche e Definizioni	9
3.1	Caratteristiche richieste	9
3.1.1	Frequency Agility	10
3.1.2	Adaptive Modulation	10
3.1.3	Transmit Power Control	10
3.1.4	Geographic Location Monitoring	10
3.1.5	Spectrum Sharing	11
3.1.6	Spectrum Sensing	12
3.1.7	Security	13
3.1.8	Intelligence	14
3.2	Definizioni	15
3.2.1	Dynamic Spectrum Access	15
3.2.2	Software Defined Radio	17
3.2.3	Cognitive Radio	18
3.2.4	Cognitive Network	20
4	Standard di Cognitive Radio	23
4.1	Confronto tra definizioni	23
4.2	Ciclo cognitivo	27
4.3	Standard in sviluppo	31
5	Approcci e Soluzioni	35
5.1	Approcci di analisi	35
5.2	Soluzioni proposte	39
5.3	Prototipi	44
6	Conclusioni	47

Capitolo 1

Introduzione

Nel 2009 si è celebrato il centenario¹ dall'assegnazione del premio Nobel per la fisica a Guglielmo Marconi, come riconoscimento del suo contributo allo sviluppo della telegrafia senza fili, e sono passati poco più di centodieci anni dai suoi primi esperimenti nelle colline bolognesi attorno Villa Grifone.

In questo relativamente breve lasso di tempo si è avuto uno sviluppo enorme in questo campo che ha continuato ad evolversi fino ad oggi: passando per le comunicazioni radio in codice Morse, le trasmissioni radio AM e FM (Amplitude Modulation e Frequency Modulation), le prime trasmissioni di immagini televisive, i radar, siamo arrivati alle comunicazioni satellitari, la telefonia mobile, le reti locali senza fili e la televisione in digitale.

L'ultima frontiera nello sviluppo di dispositivi di comunicazione radio sono le *Radio Intelligenti* o *Radio Cognitive*, pensate da J. Mitola alla fine degli anni novanta. La differenza con le altre tecnologie è che si vuole dotare di intelligenza e adattabilità i dispositivi radio, in modo che possano adattarsi alle varie situazioni senza la mano dell'uomo e appendere da esse. Gli studi in questo ambito sono enormemente cresciuti negli ultimi cinque anni: come evidenzia Haykin [1], nel 2008 cercando la voce "radio cognitiva" si potevano trovare 1154 articoli realizzati dai membri dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), contro i 6 del 2003: oggi se ne contano ben 2764.

Lo scopo di questa tesi è quello di presentare il concetto di radio cognitiva, le sue caratteristiche e fare un confronto con le varie definizioni che le sono state affibiate nel corso della loro breve esistenza. Pertanto nel Capitolo 2 verranno presentate le principali motivazioni che hanno portato all'idea e poi allo sviluppo della ricerca nel campo delle radio cognitive. Nel Capitolo 3 saranno descritte le principali caratteristiche che sono richieste ad una radio cognitiva, e verrà data la prima e la più recente definizione di radio cognitiva, oltre alle definizioni di accesso dinamico allo spettro, software defined radio e rete cognitiva. Ulteriori

¹Sito internet degli eventi e mostre: <http://www.marconicentenarynobel.it>.

definizioni di radio cognitiva e un loro confronto è sviluppato nel Capitolo 4 in cui è anche presentato il ciclo cognitivo e una panoramica sugli standard in sviluppo nell'ambito delle radio intelligenti. Il Capitolo 5 invece descrive gli approcci utilizzati nello studio delle radio e reti cognitive, quali ad esempio la teoria dei giochi, il calcolo evolutivo e la logica fuzzy, e poi illustrate alcune soluzioni proposte riguardo ai problemi di spectrum sensing e progettazione di protocolli intelligenti, e elencati alcuni prototipi di radio cognitiva realizzati. In conclusione il Capitolo 6 riporta alcune problematiche che saranno oggetto di studio nei prossimi anni.

Capitolo 2

Motivazioni

Lo spettro delle onde elettromagnetiche è l'intervallo di tutte le possibili radiazioni elettromagnetiche. Storicamente la parte più utilizzata per le comunicazioni radio è la fascia bassa delle onde radio che hanno frequenza compresa tra 0 e 30 GHz, principalmente perché facilmente generabili con la tecnologia del XIX e XX secolo, ma anche perché, avendo una lunghezza d'onda maggiore, possono propagarsi per riflessione ionosferica anche a distanze intercontinentali.

Il resto dello spettro è suddiviso in :

- Microonde: 30–300 GHz
- Infrarossi: 300 GHz–428 THz
- Luce Visibile: 428 THz–749 THz
- Ultravioletti: 749 THz–30 PHz
- Raggi X: 30 PHz–300 EHz
- Raggi gamma: ≥ 300 EHz

Attualmente la fascia più utilizzata è quella tra i 30 MHz e i 10 GHz in cui sono assegnate bande per le radio AM e FM, le televisioni analogiche e digitali, telefonia mobile come GSM (Global System for Mobile Communication) e UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), reti wireless come Bluetooth e Wi-Fi (Wireless Fidelity), e satelliti, come evidenziato nella Figura 2.1.

La crescente domanda di multimedialità e di accesso ad internet nei dispositivi portatili, ha portato in questi ultimi anni ad una richiesta sempre maggiore di accesso allo spettro in determinate bande. A fronte di questo, alcune organizzazioni nazionali come la Federal Communications Commission (FCC) e internazionali come la Shared Spectrum Company (SSC) negli Stati Uniti hanno voluto investigare sull'effettivo sfruttamento delle bande spettrali concesse in licenza ai vari enti.

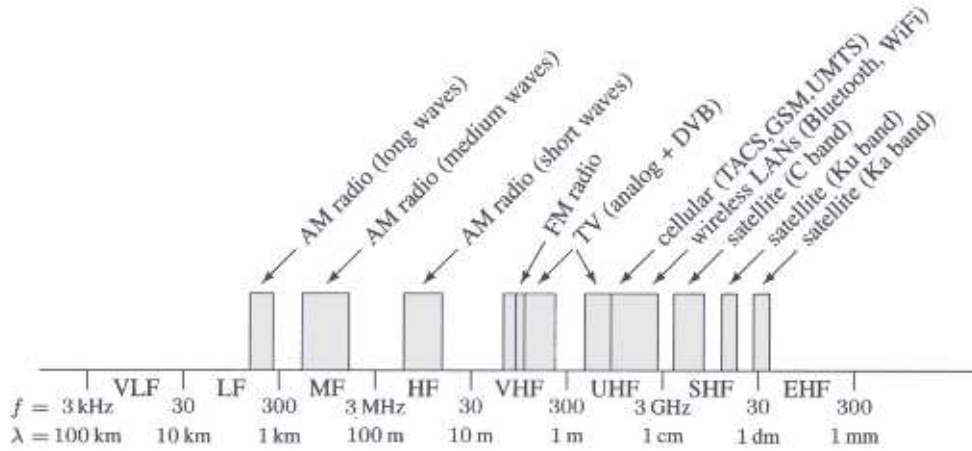


Figura 2.1: Suddivisione dello spettro radio. Tratto da [2].

Al fine di poter confrontare e quantificare l'efficienza dei differenti servizi radio è utile definire il concetto di *efficienza spettrale* che è la misura di quanto efficacemente il sistema di comunicazione sfrutta la banda di trasmissione. Nella formula data dalla IEEE 802 in [3] si ha che l'efficienza wireless è:

$$W_{eff} = \frac{C \cdot N_s}{B \cdot A} \left[\frac{Bit \cdot User}{m^2} \right]$$

dove C è la capacità del sistema di trasmettere informazione in bit/s , N_s è il numero di connessioni o utenti nella rete nell'area coperta dal segnale e utilizzando la banda allocata B in Hertz, ed A l'area coperta dal sistema wireless in m^2 .

Le analisi della FCC condotte dalla Spectrum Policy Task Force (SPTF) in alcune metropoli americane come Atlanta, New Orleans e San Diego [4] mostrano che più del 70% dello spettro allocato non è usato continuamente. Quelle della SSC [5] mostrano come, ad esempio, a New York lo spettro sia occupato tra il 5.2% e il 13.2% delle possibilità. Come esempio è rappresentata in Figura 2.2 l'occupazione media per fasce nelle sette località in cui sono state effettuate le rilevazioni. A conferma dello scarso sfruttamento dello spettro, in [6] vi sono delle misurazioni effettuate nella fascia VHF dei 30–300 MHz che verificano la presenza di ampie bande sottoutilizzate sia in zone urbane che rurali.

Per migliorare l'utilizzo dello spettro, oltre all'efficienza spettrale wireless si potrebbero considerare altri parametri come quelli suggeriti in [4]:

$$Efficienza\ Economica = \frac{valore\ dell'output}{costo\ totale\ input}$$

$$Efficienza\ Tecnica = \frac{output}{costo\ totale\ input}$$

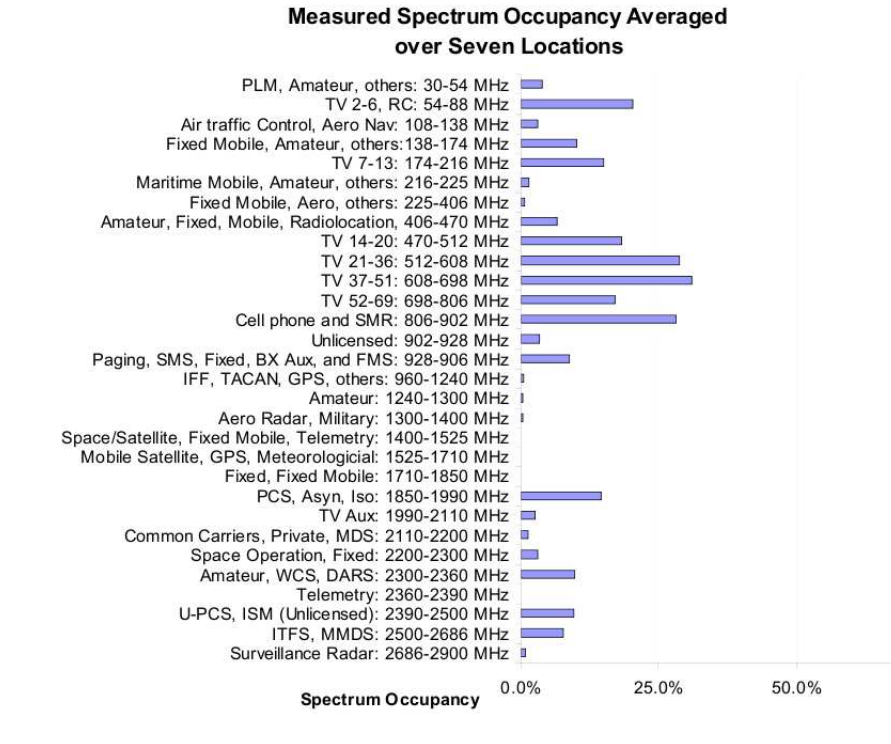


Figura 2.2: Occupazione dello spettro per banda. Fonte [5].

Purtroppo come riscontrato dalla SPTF non è possibile, anzi non è consigliabile considerare unicamente uno di questi tre parametri quando si vogliono paragonare servizi radio diversi e cercare di migliorarli. Per tutti i servizi infatti si presenta una delle due seguenti situazioni:

- tutto lo spettro è assegnato ma non pienamente usato in una data area
- lo spettro è assegnato e utilizzato completamente

Il primo caso lo possiamo considerare “*ad accesso limitato*”, in cui l’efficienza spettrale può essere migliorata aumentando il numero di accessi che gli utenti hanno sullo spettro o aumentandone il numero totale.

Il secondo caso lo possiamo invece considerare “*a throughput limitato*” che si può solo migliorare cercando di fornire agli utenti già presenti una maggiore velocità di trasferimento delle informazioni incrementando la capacità del canale trasmissivo.

Partendo con lo scopo di raggiungere un’efficienza spettrale e diramando il problema in questi due casi, la FCC propone alcuni aspetti su cui puntare che riguardano uno o entrambi i casi, e che vengono riassunti dalle relazioni grafiche di Figura 2.3. Gli aspetti quali lo scoraggiare l’uso inefficiente dello spettro, quello di aggiornare le normative degli stati con lo sviluppo della tecnologia e quello di cercare di raggruppare sistemi tecnicamente compatibili si possono considerare

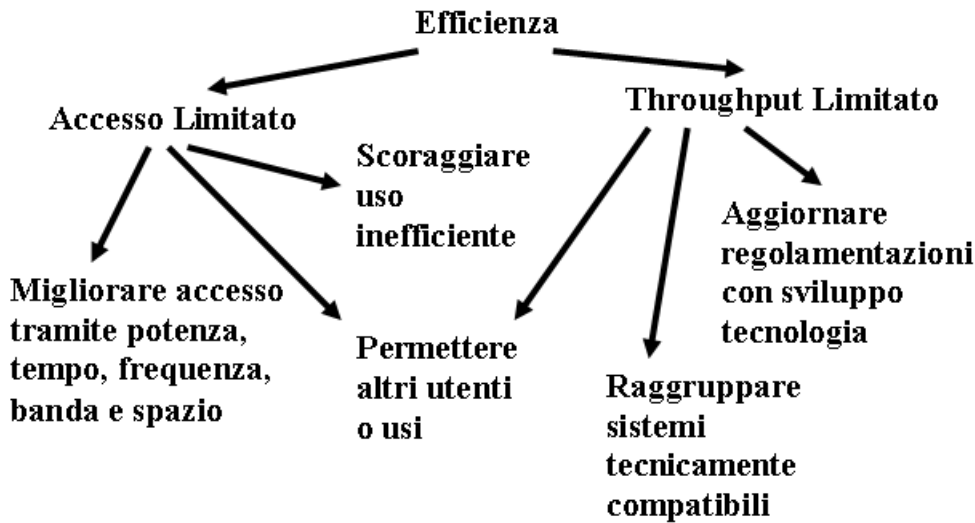


Figura 2.3: Schema adattato. Fonte [4].

sia relativi al mondo politico-istituzionale dei singoli paesi o unioni internazionali, ma anche alle industrie che fabbricano i dispositivi e alle comunità internazionali che creano standard, come IEEE e l'European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

Gli aspetti quali migliorare l'accesso agli utenti modificando la potenza del segnale, il tempo, la frequenza, la banda utilizzata, lo spazio, e quello del permettere di avere altri utenti o altri usi si possono ricondurre invece al mondo delle radio cognitive o radio intelligenti.

Infatti secondo la FCC le radio cognitive potrebbero essere usate in molti contesti per migliorare appunto lo sfruttamento dello spettro: ad esempio una radio cognitiva potrebbe negoziare cooperativamente con gli altri utenti e migliorare così la condivisione dello spettro, o identificare e occupare i denominati *white space* o *spectrum hole*, i buchi nello spettro, evitando di interferire con le altre trasmissioni permettendo così di poter creare anche un "mercato secondario" di utenti che hanno meno priorità nell'utilizzo dell'etere. Inoltre potrebbe facilitare l'interoperabilità tra sistemi di comunicazioni che operano a frequenze diverse o con formati di trasmissione diversi.

Per comprendere meglio questi buchi nello spettro è molto utile far riferimento alla Figura 2.4 in cui sui tre assi vengono considerati il tempo, la potenza del segnale e la frequenza. Si nota infatti che gli *spectrum hole* sono considerati come assenza totale o parziale di potenza nel piano tempo-frequenza, e che un loro utilizzo dinamico nel tempo, saltando da un intervallo di frequenze ad un altro, corrisponde ad un accesso dinamico dello spettro che ne migliora l'utilizzo

e che sarà approfondito nei prossimi capitoli.

Una motivazione confermata recentemente da un rapporto dell'ETSI [7] è quella della necessità di sviluppare prodotti intelligenti per poter affrontare la sempre più complessa gestione di reti radio. Infatti secondo una stima del Wireless World Research Forum¹, nel 2017 saranno in funzione 7000 miliardi di dispositivi radiomobili per 7 miliardi di utilizzatori: con queste previsioni sembra inevitabile mobilitarsi per arrivare ad una diversa gestione dello spettro e all'utilizzo di radio che sappiano adattarsi autonomamente.

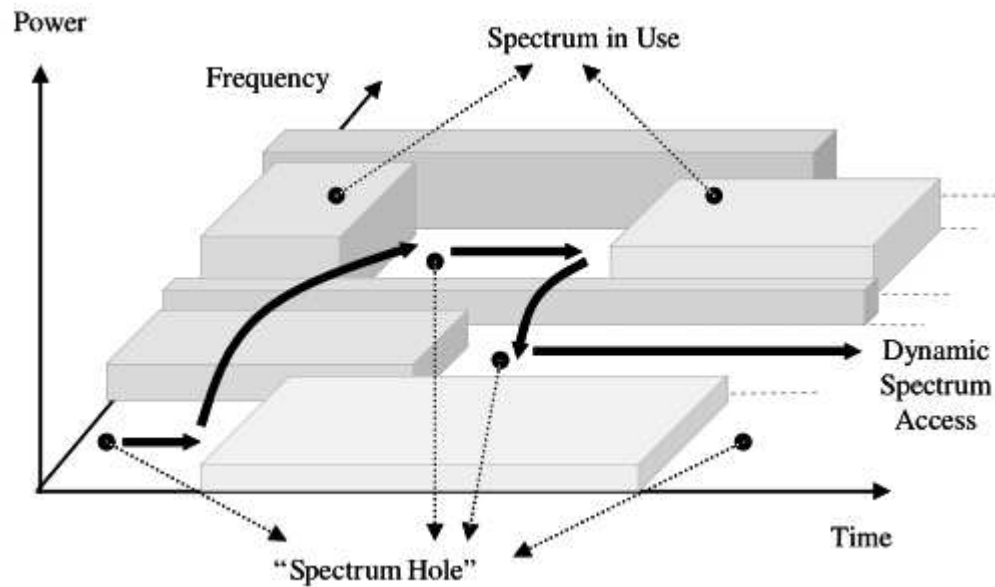


Figura 2.4: Concetto di spectrum hole. Fonte [28].

¹Articolo online: <http://www.wireless-world-research.org/fileadmin/sites/default/files/publications/Outlook/Outlook4.pdf>.

Capitolo 3

Caratteristiche e Definizioni

In tutti i settori della scienza in cui la ricerca è in pieno sviluppo, è facile che diversi ricercatori e/o enti internazionali del settore diano definizioni diverse o una loro interpretazione al problema che stanno studiando. Il campo delle radio cognitive in questo senso non fa eccezione e, come vedremo soprattutto nel prossimo capitolo, si possono trovare in letteratura almeno dieci definizioni che hanno sempre qualche particolare che le differenzia l'una dalla altre [8].

Prima però è bene considerare tutte le caratteristiche che sono state attribuite a queste radio, per poter fare più chiarezza nel confronto tra le definizioni svolto nel prossimo capitolo.

3.1 Caratteristiche richieste

Per poter rendere una radio cognitiva adatta ai contesti citati nel capitolo precedente, questa deve avere gran parte di queste caratteristiche che le sono state attribuite anche dalla FCC [9]:

- frequency agility
- adaptive modulation
- transmit power control
- geographic location monitoring
- spectrum sharing
- spectrum sensing
- security
- intelligence

3.1.1 Frequency Agility

È la capacità di una radio di cambiare la frequenza di lavoro combinata con il meccanismo di *selezione dinamica della frequenza* (DFS) che sceglie la nuova e più appropriata frequenza di lavoro evitando di utilizzare lo stesso canale trasmissivo di un altro sistema radio. Tutto questo basandosi sull'ispezione parziale dello spettro o attraverso altri meccanismi: infatti il termine DFS è stato introdotto nel contesto dei dispositivi senza licenza riferendosi a tecniche che usano lo *spectrum sensing* e la selezione di frequenza per evitare di interferire con i sistemi radar.

3.1.2 Adaptive Modulation

Le tecniche di *adaptive modulation* possono modificare le caratteristiche della trasmissione e le sue forme d'onda per fornire delle possibilità di miglioramento nell'accesso allo spettro e intensificarne l'uso in un ambiente già fitto di altri segnali e trasmissioni.

Attraverso l'adaptive modulation una radio cognitiva potrebbe permettere l'interoperabilità fra sistemi diversi scegliendo di volta in volta la modulazione appropriata e anche decidere dinamicamente la larghezza di banda da utilizzare in base alla disponibilità dello spettro o secondo un desiderato *data rate*.

Le radio cognitive inoltre aprono la possibilità a nuovi tipi di modulazioni, ad esempio dividendo il segnale in modo che occupi bande non contigue contemporaneamente.

3.1.3 Transmit Power Control

Il *transmit power control* (TPC) è la caratteristica che permette ad un dispositivo di cambiare dinamicamente la potenza trasmessa tra i vari livelli possibili durante il processo di trasmissione.

Il termine TPC è largamente usato per indicare il meccanismo di adattamento della potenza in uscita da un dispositivo in base a specifiche condizioni quali, ad esempio, la vicinanza di altri dispositivi, regolamentazioni locali e/o nazionali o in base a una richiesta operativa di abbassare la potenza al minimo necessario a realizzare una comunicazione affidabile.

In un certo senso il TPC non è una novità: infatti è da molto incorporato in vari sistemi compresi quelli cellulari e regolamentato anche nello standard IEEE 802.11h [10] che sfrutta inoltre il DFS.

3.1.4 Geographic Location Monitoring

La possibilità per una radio cognitiva di riuscire a determinare la sua posizione e quella di altre radio, cioè il *geographic location monitoring*, e di eventualmente

poterne monitorare l'operato, è sicuramente un aspetto utile per poter adattare al meglio la trasmissione con adeguata potenza e determinata frequenza di lavoro. Questa caratteristica potrebbe essere svolta tramite un oculato spectrum sensing, o utilizzando tecniche di geolocalizzazione come il Global Positioning System (GPS), o anche accedendo ad un database contenuto in un dispositivo presente nell'ambiente circostante o disponibile in rete.

3.1.5 Spectrum Sharing

Il meccanismo di condivisione dello spettro che dovrebbero avere le radio cognitive è fondamentale in quanto permetterebbe a) la gestione dello spettro in modo nuovo (si veda sezione 3.2.1), b) la coesistenza di utenti primari, che hanno il diritto di utilizzare le frequenze che hanno in licenza, e utenti secondari che vogliono sfruttare i buchi nello spettro nel dominio sia del tempo che delle frequenze.

Questo meccanismo infatti potrebbe farsi carico della negoziazione tra le due tipologie di utenti e inoltre gestire in modo efficiente la condivisione della porzione di spettro appena negoziata con gli altri utenti secondari che ne avessero bisogno. Questo tramite una comunicazione effettuata in bande dedicate agli utenti secondari, come la fascia ISM (Industrial, Scientific and Medical) che è liberalizzata, o anche direttamente attraverso la banda negoziata.

Inoltre dovrebbe fornire il rapido accesso alla banda all'utente primario quando questo la richiede, interrompendo tutte le comunicazioni degli utenti secondari in quella porzione di banda richiesta, nel minor tempo possibile: questo processo in [11] è chiamato *spectrum mobility*.

Proprio per la complessità del problema si possono fare quattro classificazioni [11]:

- sull'architettura, che può essere *centralizzata*, in cui l'allocazione dinamica dello spettro è gestita da un'unità centrale, o *distribuita*, in cui ogni radio comunica con le altre per arrivare ad una decisione ottimale singolarmente in base alle eventuali restrizioni locali.
- sul comportamento nell'allocazione dello spettro che può essere *cooperativo* o no: lo è quando vengono sfruttate le misurazioni sull'interferenza fatte da ogni dispositivo, venendo così a creare una rete di radio cognitive (si veda sezione 3.2.4).
- sulla strategia di accesso allo spettro che può essere *overlay* o *underlay*, descritta più precisamente nella sezione 3.2.1.
- in base al tipo di utilizzo, cioè *intranetwork spectrum sharing* se lo consideriamo all'interno di una rete di radio cognitive, o *internetwork spectrum sharing* se consideriamo la coesistenza di reti cognitive e non.

3.1.6 Spectrum Sensing

La caratteristica forse più importante, ma sicuramente cruciale nello sviluppo delle radio cognitive, è quella dello *spectrum sensing* che permette di conoscere l'utilizzo dello spettro e l'esistenza di utenti primari in una certa area geografica. Sebbene comunemente lo spectrum sensing sia considerato come la misurazione del contenuto dello spettro o la misura della densità spettrale di potenza, quando si trattano le radio cognitive diventa un termine più generale che comporta la determinazione di caratteristiche ulteriori rispetto alle informazioni riguardanti il dominio temporale, spettrale e spaziale. Infatti include anche la modulazione, la forma d'onda, la banda, la frequenza portante di tutte le trasmissioni che la radio riesce a captare, in modo da avere un chiaro panorama dell'ambiente circostante. Purtroppo l'accuratezza con cui si vogliono condurre queste misurazioni è legata a molti fattori: infatti nel misurare la potenza spettrale si deve considerare la *frequency resolution*¹, la distorsione e la varianza della potenza stimata. Maggiore è la precisione richiesta, maggiore sarà anche il tempo di calcolo, con una conseguente diminuzione della velocità con cui si arriva ad un'informazione sufficiente per identificare la presenza di spectrum hole da sfruttare. Le soluzioni a questo problema riportate nel Capitolo 5 differiscono soprattutto per la maggiore o minore precisione e nella velocità di analisi dei dati.

L'analisi dell'ambiente circostante da parte di una radio cognitiva può essere fatto attivamente, passivamente o cooperando [12]. Nell'osservazione passiva dello spettro la radio capta silenziosamente i segnali provenienti dall'ambiente circostante, mentre in quella attiva trasmette speciali messaggi o segnali e studia le eventuali risposte. Nell'approccio cooperativo la singola radio opera la propria analisi in modo attivo o passivo e poi condivide le proprie informazioni con le altre radio attraverso un canale di controllo dedicato o comunque con segnali di comunicazione contenenti queste misurazioni. In questo modo la singola radio può trarre una propria conclusione sullo stato dello spettro e prendere una decisione: così si ha un notevole decremento della probabilità di errore e falsi allarmi; inoltre si riesce a risolvere il problema degli *hidden primary users*, gli utenti primari "nascosti", che non vengono rilevati dalla radio vicina magari per la presenza di molti edifici o di elevata interferenza.

¹Quando un segnale di durata T è campionato in N campioni con un intervallo D_T la frequency resolution o risoluzione di frequenza, sarà $\frac{1}{N} \cdot D_T$. Ne consegue che più breve è la durata del segnale minore è la risoluzione di frequenza. Questo risulta un problema quando si fa l'analisi spettrale tramite Fast Fourier Transform che utilizza delle finestre temporali rettangolari per delimitare il segnale nel tempo: infatti in questo caso la serie dei dati inizia e finisce bruscamente e tutte le onde sinusoidali presenti nel segnale temporale che occupano parzialmente la finestra sono perdute. Ciò implica una riduzione dell'energia di una qualsiasi componente presente nello spettro. L'utilizzo di finestre di dati strette riduce questo fenomeno ma comporta una dilatazione della forma dello spettro.

Anche la scelta del tipo di cooperazione nello spectrum sensing, come per la condivisione dello spettro, influisce sui risultati finali come studiato in [12]. Infatti può essere centralizzata, distribuita o esterna. In quella centralizzata c'è un'unità centrale che raccoglie tutte le informazioni dalle altre radio e poi, analizzatele completamente, informa tutti i dispositivi sui risultati ottenuti. In quella distribuita ogni radio condivide le informazioni con tutti gli altri, ma prende da sola una decisione su quale parte dello spettro usare. L'ultima possibilità è quella dell'*external sensing* in cui un agente esterno realizza l'analisi dell'ambiente e fornisce a tutte le radio le informazioni sull'occupazione dello spettro.

In aiuto a questo problema la FCC in [4, 9] ha introdotto un nuovo modello per misurare l'interferenza: l'*interference temperature*. L'idea è di limitare l'interferenza misurata dal ricevitore ad un valore massimo calcolato a partire dalla potenza del rumore di fondo. In questo modo, come si vede in Figura 3.1, ci potranno essere delle trasmissioni di utenti secondari, le cui potenze sommate alla potenza del rumore di fondo rimarranno sotto la soglia della temperatura di interferenza. Così facendo questi segnali avranno un impatto ridotto sui ricevitori che intendono captare solo i segnali primari, visto che li vedono come un rumore di fondo aggiuntivo. Le radio cognitive invece, sapendo che ci possono essere delle comunicazioni di questo tipo potranno captarle. Il problema, come si può immaginare, sta nel fatto che è difficile quantificare precisamente il limite da rispettare, e non si conosce a priori la posizione dei ricevitori e dei trasmettitori primari, che potrebbe essere utile in queste misurazioni.

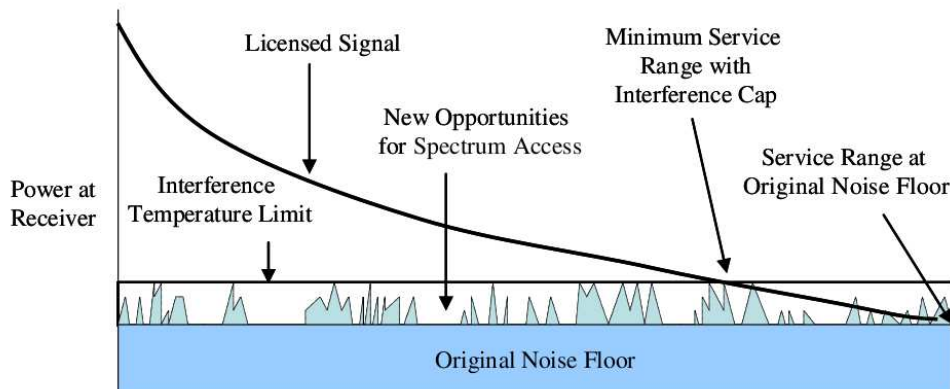


Figura 3.1: Modello dell'interference temperature. Fonte [28].

3.1.7 Security

La sicurezza nelle radio cognitive è un aspetto nuovo in quanto si trova di fronte ad una gestione diversa dello spettro, che comporta vari problemi. In [13] vengono

classificati i pericoli possibili in due classi: quella relativa all'accesso allo spettro e quella relativa al software installato nelle radio.

Nella prima classe si trova uno dei maggiori problemi nella coesistenza fra utenti con priorità diverse: il *primary user emulation* (PUE) in cui un utente secondario cerca di acquisire priorità nell'accesso allo spettro emulando le caratteristiche del segnale trasmesso da un utente primario. Il potenziale impatto di un attacco PUE dipende dall'abilità degli utenti secondari nel distinguere il segnale emulato da quello vero: in pratica risulta fondamentale un'ottima tecnica di spectrum sensing o un valido sistema di autenticazione. Un altro problema potrebbe nascere durante la condivisione dello spettro: siccome una comunicazione diretta tra unità non è sempre possibile, queste raccolgono le informazioni sull'ambiente circostante dai dispositivi vicini tramite segnali di controllo che non sono protetti da meccanismi di autenticazione. Questo implica che un terminale maligno potrebbe falsificare i messaggi di controllo alterando o addirittura bloccando il processo di condivisione dello spettro.

Per quanto riguarda la sicurezza software, oltre ai problemi di *spoofing*² nel processo di download, o di clonazione illegale di software, il problema più rilevante in questa classe di problemi è quello della manomissione non autorizzata, *tampering*, del software di controllo: infatti se non fossero prese contromisure in tal senso un malintenzionato potrebbe modificare la sua radio cognitiva per avere dei vantaggi rispetto agli altri utenti secondari, magari superando i limiti imposti sulla potenza del segnale, lanciando attacchi PUE o verso gli utenti primari, o andando ad interferire nelle bande dedicate alla sicurezza pubblica. Purtroppo tutti questi potenziali problemi appaiono come il maggior ostacolo all'accettazione delle radio cognitive da parte degli enti normativi.

3.1.8 Intelligence

È questa la caratteristica che distingue sia per definizione che per capacità le altre tipologie di radio: l'intelligenza. Infatti si vuole cercare di fornire un "cervello" alle radio, in modo che possano ricordare, apprendere e decidere autonomamente, in modo da non svolgere sempre e solo sequenze di istruzioni preimpostate dai programmatori, ma saper affrontare in modo positivo le difficoltà non previste. Nel Capitolo 4 verrà descritta in modo più esteso la difficoltà di una definizione univoca di intelligenza e per l'apprendimento, che costituisce una parte fondamentale dell'intelligenza, verrà proposto il *ciclo cognitivo* (sezione 4.2).

²Spoofing è un tipo di attacco informatico dove viene impiegata in qualche maniera la falsificazione dell'identità (spoof). Lo spoofing può avvenire in qualunque livello della pila ISO/OSI e oltre: può riguardare anche la falsificazione delle informazioni applicative. Fonte Wikipedia.

3.2 Definizioni

Dopo una panoramica delle caratteristiche attribuite alle radio cognitive, si possono finalmente definire queste entità, non prima però di aver espresso alcuni concetti utili alla definizione.

3.2.1 Dynamic Spectrum Access

In questi anni il termine *dynamic spectrum access* (DSA) ha assunto molte connotazioni che comprendono vari approcci alla nuova gestione dello spettro che si vorrebbe avere per migliorarne l'efficienza. Le diverse idee presentate al primo IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) del 2005, hanno suggerito un'estensione di questo termine. Come illustrato in Figura 3.2 le strategie DSA possono essere catalogate in tre modelli [14].

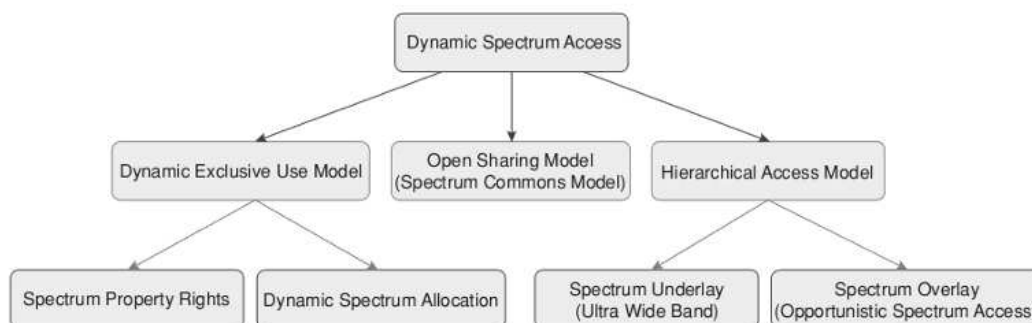


Figura 3.2: Modelli di accesso dinamico allo spettro. Fonte [14].

Dynamic Exclusive Use Model

Questo modello mantiene la struttura base dell'attuale normativa: le bande sono concesse in licenza ai vari enti per un uso esclusivo. L'idea principale è quella di introdurre della flessibilità per migliorare l'efficienza spettrale attraverso uno dei due approcci proposti: *spectrum property rights* e *dynamic spectrum allocation*. Il primo approccio consente ai titolari delle licenze di vendere e contrattare lo spettro loro assegnato e di scegliere la tecnologia desiderata. L'economia e il libero mercato giocheranno così un ruolo importante per arrivare al più proficuo uso di questa risorsa limitata. Da notare che, sebbene i titolari abbiano diritto di affittare o condividere lo spettro per trarne guadagno, tale condivisione non è autorizzata dalle normative vigenti.

Il secondo approccio, dynamic spectrum allocation, è stato portato avanti dal progetto europeo DRiVE (Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments) che si è focalizzato sul cercare di portare servizi multimediali nei veicoli, facendo cooperare tecnologie come UMTS e DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial). Grazie alle statistiche del traffico dati nel tempo e nello spazio, il modello aiuta a migliorare l'efficienza spettrale attraverso un'assegnazione dinamica esclusiva dello spettro. Esclusiva nel senso che questa strategia alloca, per un dato periodo e in un dato luogo, una porzione dello spettro ad un altro servizio per un uso esclusivo. Tuttavia questo approccio non elimina gli spectrum hole causati dalla natura discontinua del traffico wireless, proprio perché rimane l'esclusività nell'accesso.

Open Sharing Model

Questo modello è anche chiamato *spectrum commons* e utilizza una condivisione aperta dello spettro tra utenti paritari. I sostenitori di questo modello prendono come esempio il grande successo dei servizi wireless che operano nella banda libera ISM, come ad esempio il Wifi e Bluetooth. Vitali per questo modello sono le strategie di spectrum sharing che, come visto nel paragrafo dedicato, possono essere centralizzate o distribuite.

Hierarchical Access Model

Questo modello adotta una struttura di accesso gerarchica con la presenza di *utenti primari*, i titolari della licenza, e *utenti secondari*. L'idea di base è di aprire agli utenti secondari l'utilizzo dello spettro con un limite sull'interferenza percepita dagli utenti primari. Due approcci di condivisione dello spettro possono essere considerati: *spectrum underlay* e *spectrum overlay*.

L'approccio underlay impone severi limiti sulla potenza trasmessa da parte degli utenti secondari, in modo che operino sotto il livello di rumore di fondo percepito dagli utenti primari. Attraverso la trasmissione dei segnali su una larga banda di frequenze attraverso le tecniche del *ultra-wide band* (UWB), gli utenti secondari possono potenzialmente raggiungere sulla breve distanza una elevata velocità di trasmissione dati con una potenza trasmessa estremamente bassa. Da notare che, se si considera il caso peggiore in cui gli utenti primari trasmettano in continuazione, questo approccio non dipende dalla ricerca e lo sfruttamento degli spectrum hole, per cui si potrebbe usare in contemporanea con l'approccio overlay per migliorare ancora di più l'efficienza spettrale.

La strategia overlay è stata considerata inizialmente da J. Mitola, precursore delle radio cognitive, che la chiamava *spectrum pooling* [15]; al momento viene

portata avanti anche dal progetto Next Generation³ (XG) sponsorizzato dal Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) con il termine *opportunistic spectrum access* (OSA). La differenza con la strategia underlay è che non ci sono necessariamente dei vincoli per gli utenti secondari sulla potenza trasmessa, ma piuttosto sul quando e dove trasmettere. Infatti è concesso agli utenti secondari di identificare, attraverso lo spectrum sensing, e sfruttare localmente e istantaneamente gli spectrum hole in maniera non intrusiva.

Al momento la definizione di DSA della commissione IEEE 1900.1, istituita appositamente per definire degli standard nell'area delle radio intelligenti (si veda anche sezione 4.3) e facente parte della Commissione di Coordinamento Standard 41⁴ (SCC41) [16], non è stata ancora approvata, ma la sua versione draft è la seguente [17]:

“The near-real-time adjustment of spectrum utilization in response to changing circumstances and objectives”.

NOTE - Changing circumstances and objectives include (and are not limited to) energy-conservation, changes of the radio's state (operational mode, battery life, location, etc.), interference-avoidance (either suffered or inflicted), changes in environmental/external constraints (spectrum, propagation, operational policies, etc.), spectrum-usage efficiency targets, quality of service (QoS), graceful degradation guidelines, and maximization of radio lifetime.

In altre parole la sola definizione di DSA risulta: “un adattamento quasi in tempo reale dell'utilizzo dello spettro in risposta a cambiamenti negli obiettivi e nelle circostanze.”, mentre la nota aggiunge delle informazione spiegando che “i cambiamenti nelle circostanze e obiettivi includono (e non sono limitati) alla conservazione dell'energia, cambi di stato della radio (modo operativo, durata della batteria, luogo, etc.), annullamento dell'interferenza sia subita che creata, cambiamenti nelle restrizioni esterne o dell'ambiente (spettro, propagazione, politiche operative, etc.), obiettivi nell'efficienza spettrale, qualità del servizio, direttive sulla degradazione, e massimizzazione del ciclo di vita della radio.”.

3.2.2 Software Defined Radio

Le prime definizioni di *Software Defined Radio* (SDR) e di radio cognitiva furono di J. Mitola rispettivamente nel 1991 e nel 1998. In seguito il SDR Forum, che

³Progetto DARPA XG online: <http://www.darpa.mil/sto/smallunitops/xg.html>.

⁴IEEE 1900 online: <http://grouper.ieee.org/groups/scc41/>.

nacque per promuovere le radio di nuova generazione, nel 2005 [18] ha dato questa definizione:

“Radios that provide software control of a variety of modulation techniques, wide-band or narrow-band operation, communications security functions (such as hopping), and waveform requirements of current and evolving standards over a broad frequency range. The frequency bands covered may still be constrained at the front-end, however, requiring a switch in the antenna system.”

Traducendo una SDR è “una radio che fornisce un software di controllo su una varietà di tecniche di modulazione, operazioni a banda larga o stretta, funzioni di sicurezza, e forme d’onda dei correnti standard su un ampio intervallo di frequenze. La bande di frequenza occupate possono essere ancora limitate al ricevitore, richiedendo uno switch nel sistema antenna”.

Successivamente grazie alla collaborazione tra la commissione IEEE 1900.1 e il SDR Forum si giunge alla definizione più concisa [17]:

“Radio in which some or all of the physical layer functions are Software Defined.”

dove per *Software Defined* si intende l’uso di programmi software, all’interno di sistemi radio o dispositivi, per implementare le funzioni richieste, ma senza controllarle. In pratica è “una radio in cui alcune o tutte le funzioni del livello fisico⁵ sono definite tramite software”.

3.2.3 Cognitive Radio

La prima definizione di radio cognitiva è quella coniata dal già citato Mitola nella sua tesi, riportata anche in [15], che è la seguente:

“A radio that employs model based reasoning to achieve a specified level of competence in radio-related domains.”

In italiano la definizione diventa: “una radio che utilizza modelli basati sul ragionamento per raggiungere uno specifico livello di competenza nell’ambito delle radio”.

In uno dei suoi numerosi studi sulle radio cognitive, Mitola ha dato anche questa definizione [19]:

⁵Il livello fisico è il livello 1 del modello ISO/OSI. In trasmissione questo livello riceve dal livello datalink i frame da trasmettere, li converte in una sequenza di bit e li trasmette sul canale o mezzo fisico in maniera sequenziale. In ricezione il flusso di informazione (sequenza di pacchetti) procede dal livello fisico verso l’alto passando al livello superiore di datalink, detto anche MAC. Fonte Wikipedia.

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

Traducendo il testo diventa: “il termine radio cognitiva identifica il momento in cui dei dispositivi PDA⁶ e la loro rete sono computazionalmente intelligenti a sufficienza riguardo le risorse radio e le comunicazioni tra loro, per individuare i bisogni dell’utente come funzione del contesto, e di fornire le risorse e i servizi più appropriati per soddisfare quei bisogni.”

Questa seconda definizione sembra incentrata sui PDA, ma è derivata dallo sviluppo di un prototipo di PDA wireless cognitivo, il *CR1* (si veda sezione 5.3 sui prototipi), che usa modelli computazionali per i servizi ed *etichette radio*⁷ per controllare la distribuzione dei servizi di nuova generazione in ambiente simulato.

Il commento e il confronto di queste e altre definizioni verrà svolto nel prossimo capitolo; intanto è qui riportata oltre alla prima definizione anche quella recente, non ancora approvata, data dall’IEEE 1900.1 [17]:

“Cognitive Radio is:

- a) *radio in which communication systems are aware of their environment and internal state and can make decisions about their radio operating behavior based on that information and predefined objectives.*

NOTE - The environmental information may or may not include location information related to communication systems.

- b) *Cognitive radio, as defined in item a), that uses software-defined radio, adaptive radio, and other technologies to adjust automatically its behavior or operations to achieve desired objectives.”*

In questa definizione prima si descrive cos’è una radio cognitiva dicendo che è “una radio in cui i sistemi di comunicazione sono consci del loro ambiente, dello stato interno e possono prendere decisioni riguardo il loro comportamento operativo in base a queste informazioni e agli obiettivi predefiniti.”; poi si identifica in maniera meno generale assumendo “che alla base delle radio cognitive ci siano le SDR o altre tecnologie in grado di adattare automaticamente il comportamento

⁶PDA: sono più conosciuti col nome di computer palmari o solo palmari.

⁷In [15] le etichette radio sono studiate e definite come un’insieme di regole di interazione, protocolli e interfacce che permettono lo spectrum pooling.

per realizzare gli obiettivi desiderati”. Inoltre la nota precisa che le informazioni sull’ambiente possono includere o meno informazioni sulla locazione del sistema di comunicazione.

3.2.4 Cognitive Network

Il termine *cognitive network* o rete cognitiva sembra nascere come ovvia conseguenza di un insieme di radio cognitive che collaborano. Ma in [20] è proposta una suddivisione in due categorie: *cognitive radio network* (CRN), cioè “rete di radio cognitive”, e *cognitive network* (CN), “rete cognitiva”. Nella prima categoria è incluso il lavoro di Mitola [19] in cui viene descritto un modo in cui le radio cognitive potrebbero interagire per favorire l’obiettivo finale di una rete cognitiva. Neel continua in questa linea di pensiero in [21] dove studia modelli di cognitive radio network come un grande *multyplayer game* per determinare le condizioni di convergenza; anche in [13] vi è un’analisi basata sulla teoria dei giochi (si veda anche sezione 5.1).

Gli studi sulle CRN, come quelli per le singole radio cognitive, sono focalizzati anche sulla questione del design del livello fisico e del livello datalink o MAC (Media Access Control), come vedremo nel Capitolo 5, ma ultimamente anche negli obiettivi *end-to-end*. In una di queste reti di radio cognitive, le singole radio prendono ancora la maggior parte delle decisioni che richiedono un ragionamento, sebbene agiscano in maniera cooperativa.

Forse la prima menzione di CN rispetto a quella di CRN è di Clark [22] che propone una rete che:

“Assemble itself given high level instructions, reassemble itself as requirements change, automatically discover when something goes wrong, and automatically fix a detected problem or explain why it cannot do so.”

In italiano la definizione diventa: “una rete che si assembla dandosi istruzioni di alto livello, si riassume al cambiare delle richieste, automaticamente scopre quando qualcosa non funziona, e risolve automaticamente il problema trovato o spiega perché non può farlo.”

Le cognitive radio network differiscono dalle cognitive network in quanto il piano di azione di quest’ultime va al di là dei livelli fisico e MAC e la rete non è costituita solo da dispositivi wireless. Inoltre i nodi della cognitive network possono essere meno autonomi dei nodi dell’altra, con gli elementi della rete che cooperano per realizzare uno scopo, un processo cognitivo centralizzato o uno distribuito che viene elaborato su diversi dispositivi della rete.

Di seguito la prima definizione di CN in letteratura che è stata data alla conferenza IEEE DySPAN del 2005 [23]:

“A cognitive network is a network with a cognitive process that can perceive current network conditions, and then plan, decide and act on those conditions. The network can learn from these adaptations and use them to make future decisions, all while taking into account end-to-end goals.”

Traducendo la definizione diventa: “Una rete cognitiva è una rete con un processo cognitivo che percepisce le condizioni attuali della rete, e pianifica, decide e agisce su quelle condizioni. La rete può imparare da questi adattamenti e usarli in decisioni future, tutte tenendo conto degli obiettivi end-to-end.”.

In questa tesi in cui ci si concentra molto di più sulle radio cognitive: le differenze con le cognitive network sono soprattutto sulla differente visione degli obiettivi finali e sul grado di eterogeneità che è supportato. Infatti nelle reti cognitive l’obiettivo finale è basato sul miglioramento delle performance della rete, mentre nelle radio cognitive l’obiettivo è focalizzato solo sull’utente radio. Questi obiettivi possono derivare dall’utente, dalle applicazioni e/o dal bisogno di risorse. Questa differenza nello scopo finale da locale a esteso permette alle reti cognitive di operare più facilmente attraverso tutti i livelli dello stack dei protocolli: questa strategia è anche chiamata *cross layer* in quanto un livello può ricevere informazioni dai livelli non adiacenti ad esso, andando così contro la classica struttura per cui un livello può comunicare solo con quello inferiore e superiore.

Per quanto riguarda l’eterogeneità supportata le reti cognitive possono essere applicate sia a reti cablate che senza fili, mentre le radio cognitive solo nelle seconde.

Capitolo 4

Standard di Cognitive Radio

In questo capitolo si confronteranno varie definizioni di radio cognitiva e si cercheranno gli elementi comuni e le differenze che le contraddistinguono, cercando di capire se sono proprio così diverse. Inoltre verrà presentato il “ciclo cognitivo” e quello OODA e si cercherà di capire cosa c’è di realmente innovativo nelle radio cognitive rispetto ad alcuni standard già presenti; infine verranno presentati gli standard in sviluppo.

4.1 Confronto tra definizioni

Volendo accantonare per un momento il contesto scientifico, la definizione letterale di Radio Cognitiva è “radio che ha cognizione” o “radio che ha intelligenza”. Ritornando nel contesto principale, si capisce come la caratteristica di intelligenza sia molto generale e possa essere interpretata in maniera diversa dai vari autori: infatti per taluni una certa abilità può essere considerata frutto dell’intelligenza, mentre per altri no.

Ad esempio Mitola considera ben 9 livelli di intelligenza crescente [19] ognuno dei quali fornisce certe funzionalità, come riportato nella Tabella 4.1. Si parte dal livello 0 in cui si considera una radio pre-programmata senza capacità di ragionamento, passando per il livello 4 in cui viene realizzata la capacità di pianificare, cioè valutare gli obiettivi come funzioni del tempo, dello spazio e del contesto, oltre alle capacità acquisite dai livelli inferiori. Fino al livello 8 in cui la radio è capace di proporre e negoziare autonomamente nuovi protocolli di comunicazione.

Proprio per questa arbitrarietà nella definizione di intelligenza in letteratura e non, si trovano molte definizioni di radio cognitiva. Neel in [8] ne ha trovate ben dieci e altre ve ne sono nel documento approvato nel 2008 dal SDR Forum sulle definizioni in questo ambito [24]: qui vengono riportate alcune tra le più importanti, oltre a quelle di Mitola e dell’IEEE 1900.1.

Haykin nel suo articolo [25] in cui tratta anche l’interference temperature,

Level	Capability	Task Characteristics
0	Pre-programmed	The radio has no model-based reasoning capability
1	Goal-driven	Goal-driven choice of RF band, air interface, and protocol
2	Context Awareness	Infers external communications context (minimum user involvement)
3	Radio Aware	Flexible reasoning about internal and network architectures
4	Capable of Planning	Reasons over goals as a function of time, space, and context
5	Conducts Negotiations	Expresses arguments for plans/ alternatives to user, peers, networks
6	Learns Fluents	Autonomously determines the structure of the environment
7	Adapts Plans	Autonomously modifies plans as learned fluents change
8	Adapts Protocols	Autonomously proposes and negotiates new protocols

Tabella 4.1: Tabella dei livelli di intelligenza. Tratta da [19].

il controllo della potenza in trasmissione e l'accesso allo spettro, dà la seguente definizione:

“An intelligent wireless communication system that is aware of its surrounding environment (i.e., outside world), and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and adapt its internal states to statistical variations in the incoming RF stimuli by making corresponding changes in certain operating parameters (e.g., transmit-power, carrier frequency, and modulation strategy) in real-time, with two primary objectives in mind:

- *highly reliable communications whenever and wherever needed;*
- *efficient utilization of the radio spectrum.”*

Come per le altre definizioni viene riportata una traduzione: “Un sistema di comunicazione wireless intelligente che è a conoscenza dell'ambiente che lo circonda (cioè il mondo esterno), e utilizza metodi costruttivi di comprensione per apprendere dall'ambiente e adattare i suoi stati interni alle variazioni statistiche provenienti dagli stimoli della frequenza radio (RF) per apportare i corrispondenti cambiamenti in tempo reale su alcuni parametri operativi (p. es. potenza trasmessa, frequenza della portante, modulazione), con due obiettivi primari: comunicazioni altamente affidabili in qualunque momento e ovunque sia necessario, e un uso efficiente dello spettro radio.”.

La definizione della FCC in [9] è più concisa:

“A radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which it operates.”

In italiano: “una radio che può cambiare i parametri del suo trasmettitore basandosi sull’interazione con l’ambiente in cui opera”.

L’altro ente normativo americano, la National Telecommunication and Information Administration (NTIA) [26], adotta le seguente definizione che è focalizzata su certe applicazioni delle radio:

“A radio or system that senses its operational electromagnetic environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters to modify system operation, such as maximize throughput, mitigate interference, facilitate interoperability, and access secondary markets.”

Traducendo: “una radio o sistema che percepisce lo spettro elettromagnetico circostante e può dinamicamente e autonomamente regolare i suoi parametri operativi per modificare le operazioni di sistema, come massimizzare il throughput, attenuare l’interferenza, facilitare l’interoperabilità, e accedere a mercati secondari.”.

L’Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU) in un congresso del 2004 ha offerto la propria versione [27]:

“A radio or system that senses and is aware of its operational environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters accordingly.”

Traducendo: “una radio o sistema che percepisce ed è a conoscenza del suo ambiente operativo e può dinamicamente e autonomamente regolare di conseguenza i suoi parametri operativi.”.

Prima di collaborare con la commissione IEEE 1900, il SDR Forum aveva dato questa definizione in versione draft:

“A radio that has, in some sense, (1) awareness of changes in its environment and (2) in response to these changes adapts its operating characteristics in some way to improve its performance or to minimize a loss in performance.”

In italiano diventa: “una radio che ha consapevolezza dei cambiamenti nel suo ambiente e in risposta a questi, adatta in qualche modo le sue caratteristiche operative per migliorare le sue prestazioni o minimizzare una perdita prestazionale.”.

Kolodzy nella conferenza del Wireless Network Security Center (WiNSeC) svolta nello Stevens Institute of Technology nel 2004, ha presentato una succinta ma completa definizione:

“A Cognitive Radio has the ability to become aware of its environment and forms an “opinion” based upon that information ... and can act on it.”

la cui traduzione risulta: “una radio cognitiva ha l’abilità di accorgersi del suo ambiente e di formare un’opinione basandosi su questa informazione, e agire su di essa.”.

Visto questo lungo elenco pare evidente una difficoltà nell’armonizzare queste definizioni in tempi brevi, nonostante la necessità di averne una standard a cui riferirsi. Questo anche per conciliare tutte le altre definizioni legate direttamente o indirettamente all’ambito delle radio cognitive: infatti per poter avere un grande sviluppo di queste applicazioni, una nomenclatura generale degli elementi è importante. Non a caso il gruppo IEEE 1900.1 ha ridefinito molti concetti in [17] come ad esempio quello di frequency agility, adaptive modulation, transmit power control, dynamic spectrum access, ecc..

Ovviamente tramite un esame delle funzionalità descritte dalle definizioni, si possono trovare degli aspetti comuni, riassunti e adattati da [8] nella Tabella 4.2, in cui per la definizione di Mitola è considerata la prima delle due.

In primis tutte le definizioni assumono che l’aspetto cognitivo sarà realizzato attraverso un processo di controllo, che come accennato nella definizione IEEE e supposto dalla FCC in [9], potrebbe essere parte di una SDR. Secondo, anche se non sempre espresso esplicitamente, tutte le definizioni implicano una capacità di eseguire delle operazioni in completa autonomia. Infine le seguenti sono alcune capacità generali riscontrate in tutte le definizioni:

- Osservazione: che sia diretta o indiretta, la radio è capace di acquisire informazioni sull’ambiente circostante.
- Adattabilità: la radio ha l’abilità di cambiare il suo stato e/o modo operativo.
- Intelligenza: la radio è capace di utilizzare le informazioni ottenute tramite l’osservazione per prendere decisioni riguardanti un obiettivo.

Come visto prima, la definizione di intelligenza può essere discriminante tra le definizioni se, ad esempio, la si suddivide come fatto da Mitola. Questa suddivisione per livelli crea ancora più confusione, alla quale solo una nomenclatura standard può porre rimedio. Infatti accanto al termine cognitive radio, si sono

Definer	Adapts (Intelligently)	Autonomous	Can sense Environment	Transmitter	Receiver	Aware Environment	Goal Driven	Learn the Environment	Aware Capabilities
FCC	•	•	•	•					
Haykin	•	•	•	•	•	•	•	•	
IEEE 1900.1	•	•	•	•	•	•	•		
ITU	•	•	•	•	•	•			
Mitola	•	•	•	•	•	•	•	•	•
NTIA	•	•	•	•	•	•	•		
SDR Forum	•	•	•	•	•		•		
Kolodzy	•	•	•	•	•	•	•		•

Tabella 4.2: Matrici delle definizioni di radio cognitiva. Riadattata da [8].

affiancati molti altri termini: *adaptive radio*, *intelligent radio*, *policy-based radio*, *reconfigurable radio*, *software-controlled radio*, *software-defined radio* oltre a *hardware radio*.

Per alcuni autori una adaptive radio e reconfigurable radio sono la stessa cosa, mentre per altri intelligent radio e cognitive radio coincidono; inoltre si confonde spesso una software-controlled radio con una software-defined radio. Il SDR Forum e il gruppo IEEE in [17], ad esempio, considerano il termine adaptive radio il più generale rispetto a cognitive radio che ne è un sottoinsieme, e intelligent radio è un sottoinsieme di cognitive radio: uno schema riassuntivo è rappresentato in Figura 4.1. Inoltre per una maggiore chiarezza, la tabella di Figura 4.2 spiega in sintesi le differenze nella piattaforma, adattabilità e intelligenza che hanno le varie tipologie di radio definite sempre nello stesso documento.

4.2 Ciclo cognitivo

Per capire come una radio cognitiva riesca a raggiungere i vari livelli di funzionalità legati ai corrispondenti livelli di intelligenza, bisogna considerare la serie di operazioni che vengono eseguite, cioè il *ciclo cognitivo*. Il ciclo descritto da Mitola [19] è rappresentato in Figura 4.3: la radio trae informazioni sul suo ambiente operativo (Outside World) attraverso la diretta osservazione o attraverso segnali di ispezione, in pratica con le tecniche di spectrum sensing (Observe). Queste

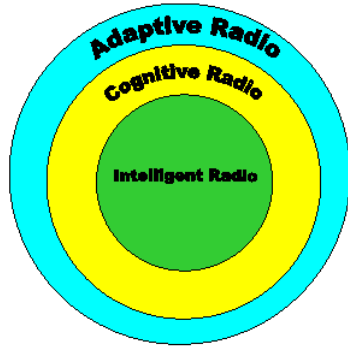


Figura 4.1: Diagramma di Venn che illustra la relazione tra le diverse tecnologie. Fonte sito internet SDR Forum.

Type of radio	Platform	Reconfiguration and adaptability	Intelligence
Hardware	Hardware	Minimal	None
Software	Hardware/software	Automatic	Minimal
Adaptive	Hardware/software	Automatic/predefined	Minimal/none
Reconfigurable	Hardware/software	Manual/predefined	Minimal/none
Policy-based	Hardware/software	Manual (database)/automatic	Minimal/none
Cognitive	Hardware/software	Full	Artificial/machine learning
Intelligent	Hardware/software	Full	Machine learning/use of prediction for decision

Figura 4.2: Confronto tra i vari tipi di dispositivi radio. Fonte [16].

informazioni vengono poi pre-processate e valutate (Orient) per determinarne la priorità. Basandosi su queste valutazioni, la radio considera delle alternative (Plan) e ne sceglie una allocando nel giusto modo le risorse necessarie (Decide). Se la priorità è normale, dalla fase di Orient si passa a quella di Plan, Decide e poi Act, altrimenti se la richiesta è urgente (ha priorità massima) viene messa in atto una scelta passando subito alla fase Act che ha questo compito. Assumendo, per esempio, che sia ritenuto necessario un cambio della forma d'onda, la radio realizza la scelta regolando le risorse a disposizione e generando il segnale appropriato. Questi cambiamenti poi si rifletteranno sulla quantità di interferenza creata dalla radio nell'ambiente esterno. Come parte di questo processo, la radio utilizza queste osservazioni e decisioni per migliorare le future operazioni che dovrà svolgere (Learn) creando un nuovo tipo di stato operativo, generando nuove alternative o creando nuovi sistemi di valutazioni delle situazioni. Alla fine, poi, il ciclo ricomincia alternandolo a periodi di riposo, detti di *sleep*, in cui la radio

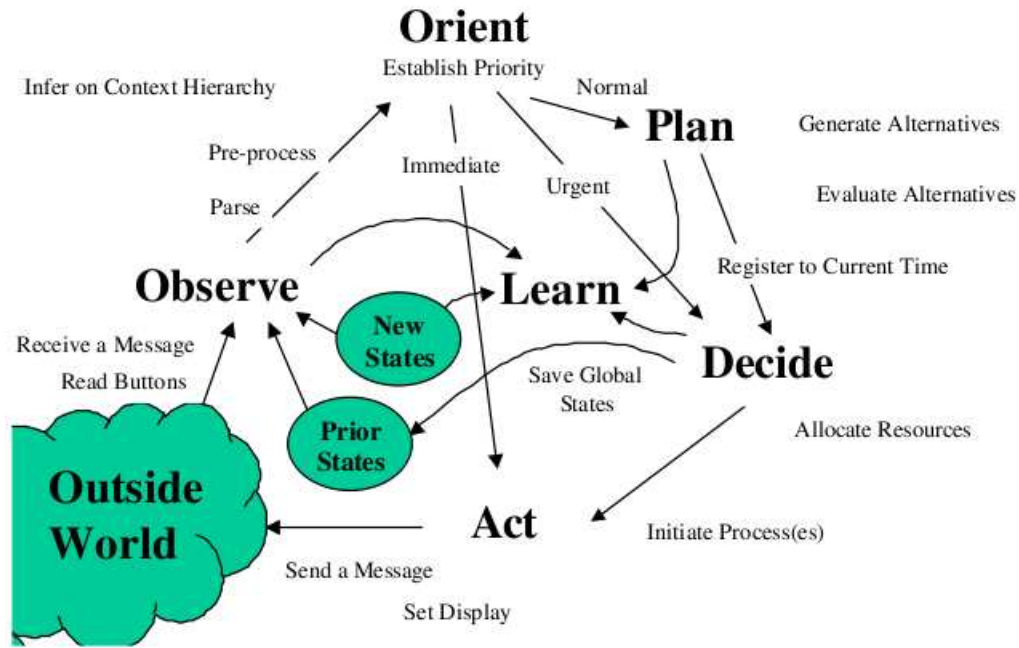


Figura 4.3: Ciclo cognitivo secondo Mitola. Fonte [19].

è in standby, o come suggerisce Mitola, potrebbe utilizzare una potenza elettrica sufficiente per risolvere algoritmi di apprendimento della fase Learn. Infatti, in media, questi periodi di sleep, seppur aleatori, durano abbastanza per poter essere sfruttati in questo modo, permettendo così di non rallentare gli altri processi del ciclo o quelli dell'utente, quando la radio è tornata operativa nello stato attivo o di *wake*.

Poiché il processo di apprendimento può essere lungo e in certe applicazioni non necessario, ed essendo anche l'intelligenza artificiale non ancora matura, molti ricercatori hanno assunto delle funzionalità di livello inferiore per le loro radio cognitive. Ad esempio B. Fette, membro fondatore del SDR Forum, in una conferenza del 2005 osserva che un processo cognitivo già usato è il *loop OODA*, cioè Observe, Orient, Dedice and Act, che enfatizza solo questi quattro aspetti e ne considera un ciclo chiuso, come si vede dalla rappresentazione grafica in Figura 4.4. Questo ciclo è effettivamente usato già in molti contesti anche economici e manageriali, ma soprattutto militari in cui è nato per capire i processi di pensiero degli avversari e per cercare di agire di conseguenza. Sebbene meno evoluto dell'altro, questo ciclo funziona perché anche se l'ambiente in cui vengono prese le decisioni è estremamente complesso, non è totalmente casuale. Infatti spesso c'è una struttura del sistema che potrebbe non essere evidente con un'analisi esterna, ma che può essere approssimata tramite cicli iterativi di questo tipo.

Le differenze sostanziali col ciclo cognitivo di Mitola sono evidenti: manca

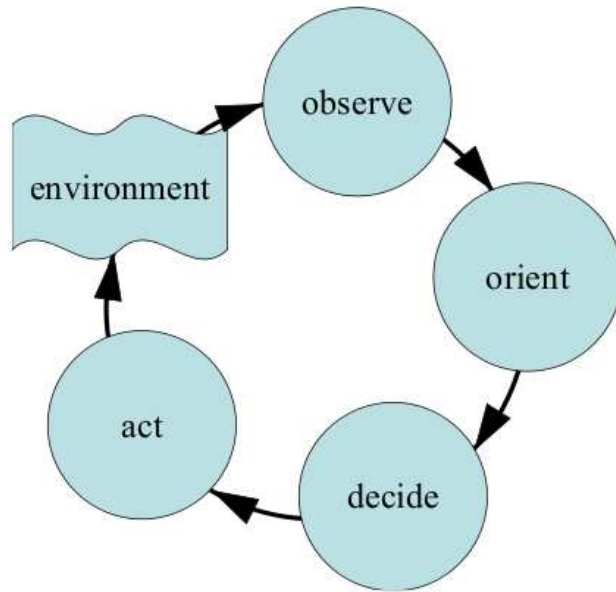


Figura 4.4: Ciclo OODA. Tratto da [20].

un obiettivo globale che dovrebbe indirizzare verso una certa serie di decisioni attraverso la fase di pianificazione, e soprattutto manca la componente d'apprendimento e memorizzazione dei casi che potrebbe prevenire errori e cicli inutili nei momenti in cui si riscontrano situazioni già affrontate. Volendo fondere i due cicli e vedendo che in qualche modo il ciclo cognitivo delle radio cognitive è un'evoluzione di quello OODA, si potrebbe assumere che, durante le fasi di wake, il ciclo di Mitola è identico al ciclo OODA, mentre nella fase di sleep la radio sviluppa l'apprendimento che la caratterizza come radio intelligente.

In letteratura, non si trovano altre tipologie di cicli cognitivi, se non delle versioni adattate dai vari autori all'interno di articoli non principalmente incentrati su questo argomento: ad esempio in [28] gli autori, focalizzati sul progetto DARPA XG, suddividono il ciclo in solo tre fasi denominandole Spectrum Sensing, in cui vengono raccolte le informazioni, Spectrum Analysis, in cui vengono analizzate, e Spectrum Decision in cui viene presa una decisione, assumendo che poi questa venga realizzata. Haykin in [25] considera praticamente le stesse fasi, solo denominandole in modo diverso. Gli studi al Virginia Polytechnic Institute and State University, meglio nota come Virginia Tech [13], utilizzano una versione del ciclo cognitivo applicata al livello fisico e al suo adattamento nelle forme d'onda. Inoltre hanno sviluppato il concetto di *cognitive engine*: cioè invece di cercare di dotare una specifica radio di intelligenza, stanno cercando di realizzare un pacchetto software che possa controllare intelligentemente qualsiasi dispositivo radio.

Al lato pratico, Mitola suggerisce di gestire la conoscenza con un linguaggio chiamato *Radio Knowledge Representation Language* (RKRL) costituito da: una sintassi che definisce le istruzioni del linguaggio; una mappa tra il mondo reale e i vari modelli creati dalle radio cognitive; modelli del tempo, spazio, enti e comunicazioni tra le diverse entità quali persone, posti e cose; un insieme iniziale di conoscenze che comprende la rappresentazione iniziale dello stato della radio, definizioni e modelli concettuali, e per finire dei meccanismi per modificare ed estendere il linguaggio. Ad esempio nella versione RKRL 0.3 sono descritti quaranta microambienti in linguaggio XML; per un approfondimento si veda [19].

4.3 Standard in sviluppo

Il lettore attento avrà sicuramente notato che alcune caratteristiche richieste alle radio cognitive sono già presenti in altri dispositivi odierni, senza che questi siano definiti intelligenti. Un esempio è la coesistenza tra radio cognitive, che è alla base anche dello spectrum sharing: infatti l'abilità di coesistere con altre radio nella stessa banda utilizzando protocolli differenti è stata studiata per diversi anni ed è stata già applicata a molti standard quali IEEE 802.15.2, 802.16.2 [29]. Il primo infatti fornisce delle regole per la coesistenza delle wireless personal area network (WPAN), definite in IEEE 802.15, con gli altri dispositivi wireless che operano nelle bande senza licenza, come le wireless local area network (WLAN) dello standard IEEE 802.11. Il secondo standard invece fornisce delle linee guida generali per minimizzare l'interferenza nella coesistenza di sistemi fissi a banda larga ad accesso wireless.

Inoltre altre caratteristiche quali la dynamic frequency selection e il transmit power control sono stati sviluppati e standardizzati in accordo con il problema della coesistenza negli standard IEEE 802.11h, 802.15.4, 802.16a. Il primo infatti è la versione per l'Europa di 802.11a che permette l'uso di queste tecniche nella banda dei 5 GHz, già occupata dai radar di radiolocalizzazione. Il secondo standard su cui si basa ZigBee, specifica invece il livello fisico e MAC per sviluppare WPAN a basso rate di trasmissione, dal basso costo e consumo di potenza. Infine 802.16a aggiunge la selezione dinamica di frequenza e il controllo di potenza all'interfaccia radio per le wireless metropolitan area network (WMAN) per l'intervallo di frequenze 2–11 GHz. In un certo senso queste tecniche applicate alle radio cognitive ne sono una loro evoluzione: infatti i primi standard sulla coesistenza fornivano metodi di misura dell'interferenza e metodi per mitigarla tramite una coordinazione tra dispositivi che però era gestita manualmente. Poi con l'utilizzo del DFS e TPC queste sono state implementate in modo che potessero essere automatiche.

Ora però gestire il problema di avere utenti secondari che non devono inter-

ferire con quelli primari in certe bande, richiede alla radio delle caratteristiche di intelligenza avanzate non descritte negli standard già approvati. Per questo motivo sono nati a partire dal 2004 dei progetti per creare degli standard che utilizzino espressamente tecniche cognitive, di accesso dinamico allo spettro e di coesistenza avanzata [30]:

- IEEE 802.22: questo standard è in sviluppo per le wireless regional area network (WRAN) per fornire l'accessibilità ad internet tramite una connessione a banda larga nelle aree rurali e remote. Questo standard lavorerà nelle bande VHF e UHF (per la precisione tra 54 MHz e 862 MHz) date in licenza alle televisioni, dato che i canali tv in queste frequenze sono sottoutilizzate in molte regioni, utilizzando ampiamente tecniche cognitive per non interferire con i segnali televisivi.
- IEEE 802.16h: questo emendamento per gli standard 802.16 specificherà dei meccanismi migliorati (come politiche di controllo per l'accesso al mezzo) per consentire la coesistenza tra sistemi senza licenza basati sullo standard IEEE 802.16 e per facilitare la coesistenza di tali sistemi con gli utenti primari.
- IEEE 802.16m: questo emendamento allo standard 802.16 fornirà un'interfaccia radio per le operazioni nelle bande assegnate con licenza. Sarà conforme ai protocolli dei cellulari di nuova generazione, continuando il supporto con le infrastrutture preesistenti.
- IEEE 802.11y: questa rettifica allo standard 802.11 consentirà l'utilizzo a sistemi basati sulle specifiche 802.11 di poter lavorare nella banda di frequenze 3650-3700 MHz negli Stati Uniti. Standardizzerà i meccanismi necessari per consentire le operazioni di condivisione tra utenti basati su 802.11. Le probabili operazioni sono: specificazione di nuove classi di regolamentazioni (estensione di 802.11j), rivelazione di altri trasmettitori (estendendo 802.11a), transmit power control e dynamic frequency selection (estensioni dell'802.11h).

Per quanto riguarda il contributo del gruppo IEEE SCC41, si sono creati i seguenti sei sottogruppi di lavoro con differenti obiettivi¹:

- IEEE 1900.1: questo standard fornirà delle definizioni tecnicamente precise riguardo i concetti chiave nel campo della gestione dello spettro, delle software defined radio e tecnologie relative. Il lavoro andrà oltre la semplice e breve definizione, ma fornirà un ampio testo che spiegherà queste tecnologie da diverse prospettive. Inoltre descriverà come queste tecnologie

¹IEEE SCC41 online: <http://groups.ieee.org/groups/scc41/index.html>.

sono correlate e possano essere usate in molti servizi di comunicazione per consentire nuove capacità, mentre allo stesso tempo, forniscano meccanismi di supporto per i nuovi modelli di gestione e accesso allo spettro.

- IEEE 1900.2: questo standard fornirà le linee guida per analizzare la potenzialità della coesistenza rispetto all'interferenza tra sistemi radio operanti nella stessa banda o in bande differenti.
- IEEE 1900.3: questo lavoro fornirà dei riferimenti tecnici da seguire per l'analisi del software scritto per le software defined radio, per garantire la conformità con le normative e i requisiti applicativi.
- IEEE 1900.4: questo standard definirà i blocchi costitutivi che comprendono i gestori di risorse di rete, i gestori di risorse periferiche e le informazioni che vengono scambiate tra questi blocchi, permettendo un processo di decisione coordinato tra le periferiche della rete che sarà di aiuto all'ottimizzazione nell'utilizzo delle risorse della radio, incluso il controllo di accesso allo spettro, all'interno di reti wireless eterogenee. Lo standard si limiterà alle definizioni funzionali e architettoniche nella prima fase. La definizione del protocollo relativo sarà sviluppata in seguito.
- IEEE 1900.5: il lavoro di questo gruppo definirà un insieme di linguaggi procedurali e le loro relazioni con le architetture per gestire le caratteristiche delle radio cognitive nelle applicazioni ad accesso dinamico dello spettro. Il lavoro sarà inizialmente incentrato sulla standardizzazione delle specifiche necessarie per un linguaggio procedurale che sia limitato a una o più architetture che definiscono e gestiscono le funzionalità e il comportamento delle radio cognitive. Il lavoro seguente sarà quello di standardizzare in maggior dettaglio cosa è stato fatto, facendo attenzione a quanto concerne l'interoperabilità.
- IEEE 1900.6: lo scopo di questo standard è di definire le informazioni scambiate tra i sensori dello spettro e i clienti in un sistema di comunicazione. L'interfaccia logica e la struttura di supporto dei dati usata per lo scambio di informazioni saranno definite in modo astratto evitando di vincolare la tecnologia di rilevamento, la tipologia del cliente o il collegamento dati tra il sensore e il cliente.

Capitolo 5

Approcci e Soluzioni

In questo capitolo verranno elencate le principali tecniche di analisi applicate alle radio cognitive e alcune soluzioni proposte, riguardanti soprattutto lo spectrum sensing. Inoltre verranno presentati i prototipi di radio sviluppati in questi anni.

5.1 Approcci di analisi

Per poter realizzare in modo efficace il ciclo cognitivo presentato precedentemente, la radio cognitiva necessita di metodi e tecniche per realizzare le varie fasi del ciclo, e strumenti di analisi per poter confrontare le prestazioni delle diverse soluzioni trovate dai vari autori, anche per quanto riguarda le reti cognitive.

Gli strumenti di analisi maggiormente usati sono i seguenti [31]:

- Game Theory
- Evolutionary Computation
- Fuzzy Logic
- Markov Decision Process
- Pricing Theory
- Theory of Social Science
- Reinforcement Learning

Game Theory

La teoria dei giochi è uno strumento matematico sviluppato per analizzare le situazioni di conflitto e ne ricerca soluzioni competitive e cooperative tramite modelli, ovvero studiando le decisioni individuali prese dai partecipanti in situazioni di interazione. Queste decisioni possono appunto influire su quelle degli altri

partecipanti che hanno come scopo quello di raggiungere un obiettivo prefissato. Il concetto base è la razionalità con cui i giocatori scelgono le loro azioni basandosi solo sui loro interessi. Infatti nella definizione di un gioco bisogna definire chi siano i giocatori, i *player*, definire le azioni che possono compiere e come calcolare i risultati da esse prodotti, definire gli obiettivi tramite delle funzioni obiettivo ed infine specificare un insieme di regole che gestiscono il sistema e le interazioni. Ad esempio Neel [8, 21] utilizza la teoria dei giochi applicandola al ciclo cognitivo, impostando come player le radio cognitive e analizzando le prestazioni in base ai vari modelli di gioco.

La soluzione del gioco è data dall'insieme delle azioni attraverso le quali tutti i giocatori sono soddisfatti del *payoff* ricevuto, cioè del compenso. Ad esempio una delle classiche applicazioni nei giochi di tipo non cooperativo, in cui i giocatori non possono stipulare accordi vincolanti, è quella di trovare, se esiste, la soluzione di equilibrio di Nash, in cui ogni giocatore non può migliorare la propria funzione obiettivo senza creare degli accordi, andando perciò contro le regole imposte. Oltre a Neel, anche in [13] sono riportati delle analisi sulle cognitive network.

Evolutionary Computation

Il calcolo evolutivo è un metodo di soluzione del problema basato sull'evoluzione della vita biologica nel mondo reale. Questo potrebbe essere realizzato simulando il comportamento evolutivo delle singole strutture, che include la selezione naturale e i processi di riproduzione. La tecnica più comune nel calcolo evolutivo è quella del *genetic algorithm*, algoritmo genetico, che è stata applicata alla radio cognitive. In [32] è stato utilizzato un algoritmo genetico multiobiettivo per ottimizzare le prestazioni dei protocolli nei diversi livelli di un sistema di comunicazione. Una radio è stata definita con un insieme di geni di un cromosoma composti dai parametri di trasmissione, quali ad esempio trasmissione di potenza, frequenza, forma d'onda e modulazione. L'obiettivo finale, che in letteratura viene definito dalla funzione di *fitness*, è stato definito in termini di prestazioni di rete, quali ad esempio, rate di errore dei bit o data rate.

Nelle ricerche del Virginia Tech [13] vi è uno studio su questi algoritmi, in particolare volendo attribuire a questi la capacità di apprendere, in modo da poterli sfruttare per il loro cognitive engine. Infatti viene usata una tecnica di decisione che considera i casi già affrontati, in modo da poter avere una popolazione iniziale sufficiente per poter far convergere prima possibile l'algoritmo genetico ad una popolazione ottimale, visto che normalmente sono richieste centinaia di generazioni e in ambiente real-time il calcolo risulta troppo lento. A queste tecniche poi si possono aggiungere quelle di *simulated annealing* e *tabu search* per la progettazione di radio cognitive, anche se sono normalmente usate per trovare

il minimo globale in presenza di più minimi locali di una funzione reale definita sullo spazio delle soluzioni del problema.

Fuzzy Logic

La logica Fuzzy fornisce un modo semplice per ottenere la soluzione ad un problema sulla base di informazioni di ingresso imprecise, incomplete e rumorose. Invece di utilizzare complicate formule matematiche, la logica fuzzy usa un insieme di funzioni di appartenenza e regole di deduzione per ottenere le soluzioni che soddisfano gli obiettivi desiderati. In generale sono tre le componenti principali di un sistema di controllo fuzzy: il *fuzzifier*, il processore logico fuzzy, e il *defuzzifier*. Mentre il fuzzifier è usato per mappare gli input reali nell'insieme fuzzy, il processore logico sviluppa un motore di deduzione per ottenere la soluzione sulla base di un'insieme di regole predefinite. Alla fine il defuzzifier è applicato per trasformare la soluzione, appartenente ad un insieme fuzzy, in un'uscita reale.

Per poter acquisire il comportamento dinamico del sistema, le regole fuzzy e le funzioni di appartenenza devono essere adattate ai cambiamenti dell'ambiente in modo che la soluzione desiderata possa essere realizzata. La logica fuzzy è di solito utilizzata assieme agli algoritmi di apprendimento, come ad esempio i neuro-fuzzy, che sono capaci di adattarsi con i mutamenti dell'ambiente dei sistemi di radio cognitive. Uno studio sulla logica fuzzy e le reti neurali come rappresentazione della conoscenza e del ragionamento nelle radio e reti cognitive è sviluppato in [33].

Markov Decision Process

I processi di decisione di Markov forniscono una struttura matematica per la modellazione dei processi decisionali nelle situazioni in cui i risultati sono in parte casuali e in parte sotto il controllo di un *decision maker*, o decisore. Nelle radio cognitive, si ricorda che il processo di decisione è richiesto per poter scegliere intelligentemente la miglior azione da compiere in risposta agli stimoli dell'ambiente. Un processo di decisione Markov parzialmente osservabile (POMDP) è stato utilizzato per l'accesso dinamico allo spettro in una rete ad hoc [34]. In questo studio è sviluppato un metodo di tipo opportunistic, permettendo l'utilizzo dello spettro agli utenti secondari usando un protocollo MAC decentralizzato intelligente. L'azione del trasmettitore è stata definita come quella di captare e accedere al canale di comunicazione se accessibile, e il premio è stato definito come la quantità di dati trasmessi.

Pricing Theory

La pricing theory si riferisce alle regole e ai meccanismi che regolano il prezzo di un prodotto in economia. Applicato alle radio e in particolare alla gestione dell'allocazione delle risorse nelle reti wireless, si ha che da un lato i fornitori dei servizi vogliono massimizzare le loro entrate, mentre dall'altro gli utenti vogliono minimizzare i costi per le prestazioni sulla qualità del servizio. Ad esempio in [35] vengono analizzati tre modelli di prezzo denominati modello con equilibrio di mercato, modello competitivo e modello cooperativo nel commercio dello spettro. In questi modelli i fornitori dell'accesso allo spettro hanno atteggiamenti diversi nel raggiungere obiettivi commerciali diversi. Nello specifico, nel modello con equilibrio di mercato, l'obiettivo è quello di soddisfare le richieste di spettro da parte degli utenti secondari, gli utenti paganti nel mercato secondario, e non vi è concorrenza nè cooperazione tra i fornitori del servizio. Nel modello competitivo l'obiettivo è quello di massimizzare il proprio profitto, e vi è competizione tra i fornitori. Nel modello cooperativo invece, l'obiettivo è di massimizzare il profitto totale tramite la cooperazione tra i fornitori dell'accesso allo spettro.

Theory of Social Science

Per teoria delle scienze sociali si intendono l'insieme dei metodi di indagine, finalizzati alla comprensione dei fenomeni e degli aspetti meta-biologici presenti nel comportamento umano, nelle relazioni interpersonali, nella costruzione dei legami affettivi nello sviluppo della sessualità, nella produzione di codici culturali e nella formazione di usi, costumi e tradizioni.¹

Normalmente queste tecniche vengono applicate in ambiti tutt'altro che ingegneristici, però in [36] vengono usati per permettere una certa flessibilità agli utenti secondari nell'accesso agli spectrum hole. In questa analisi viene studiata la condivisione dello spettro tra diversi sistemi radio, modellando il problema come una società in cui le persone, cioè le radio, prendono decisioni in modo indipendente, e le loro azioni coinvolgono, direttamente o meno, anche le altre. Inoltre vengono considerate delle regole per evitare casi di monopolio, e applicate delle classificazioni sulle azioni sociali che possono essere prese dalle radio, per poter definire al meglio le regole di strategia del sistema.

Reinforcement Learning

Il *reinforcement learning*, o apprendimento per rinforzo, appartiene ad una sotto categoria dell'apprendimento automatico e si interessa di come un agente dovrebbe prendere delle decisioni in un certo ambiente in modo da massimizzare la sua ricompensa in una visione a lungo termine. Si basa sul presupposto di potere

¹Definizione tratta da Wikipedia.

ricevere degli stimoli dall'esterno a seconda delle azioni svolte: quindi una scelta corretta comporterà un premio, mentre una scelta scorretta porterà ad una penalizzazione del sistema. Gli algoritmi di reinforcement learning cercano quindi delle regole che mappino gli stati dell'ambiente esterno in azioni che l'agente dovrebbe prendere per migliorare la sua ricompensa. Tipicamente l'ambiente è formulato come un processo decisionale di Markov (MDP) a stati finiti, e gli algoritmi di rinforzo in questo contesto sono collegati strettamente con le tecniche di programmazione dinamica.

Un algoritmo di rinforzo utilizzato è ad esempio il Q-learning, che lavora considerando una funzione che fornisce l'utilità attesa di compiere un'azione in un certo stato e successivamente segue le norme di comportamento previste. Il punto di forza di questa tecnica è che è possibile confrontare le utilità attese delle possibili azioni anche senza conoscere il modello matematico che definisce l'ambiente. Nello specifico questo algoritmo in [37] è usato per l'assegnazione dinamica dei canali di trasmissione in una rete di cellulari: mentre il traffico totale varia in ogni cella in cui è suddiviso un territorio, l'algoritmo impara e adatta il numero di canali assegnati ad ogni cella in modo da minimizzare la *call blocking probability*, cioè la probabilità di dover rifiutare un cliente che vuole accedere al servizio telefonico.

5.2 Soluzioni proposte

Lo sviluppo delle radio cognitive richiede che siano implementate tutte le caratteristiche richieste (si veda Capitolo 3) e che venga modificato l'esistente approccio usato nell'accesso dello spettro, dato che così conformato non permette l'utilizzo lecito delle radio cognitive. Al momento non è stato definito uno standard, ma anche le istituzioni stanno iniziando ad interessarsi alle potenzialità soprattutto economiche dello sviluppo di questa tecnologia. Infatti l'occasione per creare nuove norme è il passaggio dalla televisione analogica a quella digitale, che negli Stati Uniti si è concluso nell'estate del 2009, mentre in Europa si punta ad un passaggio totale in tutti gli stati comunitari entro il 2012². Questo consentirà di utilizzare per nuovi usi il *digital dividend*, cioè l'intervallo di frequenze 420–862 MHz in Europa e 54–698 MHz negli USA, che in gran parte risulterà libero. In Europa l'Unione Europea (UE) si sta muovendo su questo terreno cercando una coordinazione tra gli stati membri, in modo da ottenere la miglior efficienza spettrale e la massima possibilità di sviluppo per un rilancio dell'economia: infatti si stima una crescita economica di 50 miliardi di euro per tutta l'Europa³. Purtroppo questa stima è calcolata sui potenziali usi considerati dalla UE, che secondo

²Articolo online: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/09/1595>.

³Notizia online: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/09/1112>.

alcuni analisti⁴ non comprenderebbero in primis le tecnologie cognitive: si punta infatti sul miglioramento delle TV digitali anche per i dispositivi mobili e servizi wireless a banda larga per uso sia privato che di pubblica sicurezza. Negli USA invece si sono considerate di più le radio cognitive⁵, grazie al lavoro di FCC [4, 9, 43] e NTIA [26].

La ricerca intanto continua il suo lavoro, anche perché i problemi non sono stati ancora risolti completamente, anzi: qui vengono riportate alcune tecniche usate per lo spectrum sensing e alcuni protocolli MAC proposti per gestire lo sfruttamento intelligente e non invasivo degli spectrum hole.

Spectrum Sensing

Il letteratura sono proposti molti metodi per l'identificazione dei segnali nello spettro: ecco i più comuni [12, 38, 39].

Energy detector based sensing: L'identificazione del segnale in base alla misura della sua energia è il metodo più comune sia per la sua bassa complessità implementativa che computazionale. Inoltre è il metodo più generico perché non richiede nessuna conoscenza sul segnale dell'utente primario: infatti il segnale è individuato tramite confronto tra l'output dell'*energy detector* e una soglia che dipende dal rumore di fondo. I problemi di questa tecnica stanno nella difficoltà di scegliere una soglia adatta, l'incapacità di distinguere l'interferenza dagli utenti primari e il rumore, e le basse prestazioni con bassi valori del rapporto segnale rumore (signal-to-noise ratio, SNR).

Cyclostationarity based sensing: Normalmente i segnali che devono essere trasmessi non sono ciclostazionari, ma quando vengono modulati con portanti sinusoidali, lo diventano in certi parametri: di solito in media o in correlazione. Gli algoritmi che usano questa caratteristica riescono a distinguere il segnale dell'utente primario dal rumore. Questo perché il rumore è stazionario in senso lato con autocorrelazione impulsiva, mentre il segnale modulato è ciclostazionario in correlazione a causa della ridondanza della periodicità del segnale.

Waveform based sensing: La conoscenza delle forma d'onda e della struttura, *pattern*, di un segnale è utilizzata nei sistemi wireless per aiutare la sincronizzazione: infatti molti pattern includono un preambolo o altre sequenze note al suo interno. Se c'è questa conoscenza, allora il segnale può essere riconosciuto considerando la sua autocorrelazione: purtroppo questo metodo risulta di difficile applicazione nelle radio cognitive, se non tramite un incremento delle strutture

⁴Analisti sul digital dividend: http://www.analysysmason.com/EC_digital_dividend_study.

⁵Si veda parte conclusiva della sezione Prototipi di questo capitolo.

dei segnali note alla radio, visto l'ampio raggio di segnali che una radio cognitiva potrebbe incontrare analizzando l'intero spettro.

Radio Identification based sensing: Una completa conoscenza delle caratteristiche spettrali può essere ottenuta con l'identificazione della tecnologia di trasmissione usata dagli utenti primari. Ad esempio se assumiamo che la tecnologia riconosciuta è quella del Bluetooth, una radio cognitiva può usare questa informazione per estrarne delle altre, visto che è noto che la distanza del Bluetooth è al massimo di dieci metri. Inoltre saprebbe già che tipi di segnali trasmettere per effettuare un'eventuale comunicazione. In generale tutte le caratteristiche che si possono estrarre dal segnale ricevuto vengono usate per scegliere la tecnologia usata dall'utente primario più probabile.

Matched filtering: La tecnica del *matched filtering* è la migliore (per l'identificazione dell'utente primario) in presenza di rumore, se però si ha una conoscenza a priori delle caratteristiche del segnale: questo perché viene richiesta una demodulazione che richiede certe informazioni quali, ad esempio, il tipo di modulazione del segnale ricevuto, la frequenza della portante e il formato del pacchetto. Il vantaggio principale di questa tecnica è che impiega poco tempo per raggiungere una determinata probabilità di falso allarme proprio perché il numero di campioni richiesti nell'analisi cresce con l'inverso del rapporto segnale-disturbo. Tuttavia il problema principale è che una radio cognitiva necessiterebbe di un ricevitore dedicato per ogni tipo di segnale che volesse identificare, il che risulta implementativamente oneroso in termini sia di consumo che di realizzazione, visto il contesto fitto di tipologie di segnali in cui verrà inserita.

Multitaper spectral estimation: nella stima della potenza viene normalmente considerato il segnale durante una finestra temporale sufficiente allo sviluppo poi della sua trasformata di Fourier: l'inconveniente è che si ha un'incremento della varianza stimata. La tecnica multitaper va incontro a questo e consiste nel dividere il segnale in sottoinsiemi sovrapposti che sono poi singolarmente filtrati, riducendo il più possibile le perdite, e poi ne viene fatta la trasformata di Fourier. Dei singoli coefficienti dello spettro di ogni sottoinsieme viene calcolata la media per ridurre appunto la varianza [25]. Questa tecnica è molto buona perché è un'approssimazione della stima di massima verosimiglianza della densità spettrale di potenza (*maximum likelihood power spectral density estimation*), che per segnali a banda larga è quasi ottima. Inoltre rispetto alla stima di massima verosimiglianza, la tecnica multitaper ha una richiesta computazionale inferiore e spesso accettabile.

Wavelet transform based estimation: Le wavelet sono forme d'onda oscillanti di lunghezza finita che si decompongono velocemente, cioè tendono a zero in breve tempo. Tramite una base completa ortonormale di funzioni wavelet, è possibile creare una trasformata wavelet di un qualsiasi segnale, cioè lo si può rappresentare come serie di funzioni wavelet opportunamente scalate e traslate. Questa trasformata rispetto a quella di Fourier permette di rappresentare funzioni che hanno discontinuità e picchi appuntiti, e ricostruire segnali finiti non periodici e/o non stazionari. In [40] viene proposto un approccio per il riconoscimento di segnali con banda larga: il segnale viene decomposto in funzioni elementari in sottobande non sovrapposte che sono ben caratterizzabili dalle loro irregolarità in frequenza. Successivamente l'intera banda è modellata come sequenza di queste sottobande in cui la caratteristica della potenza spettrale è che è "liscia" all'interno della sottobanda, mentre presenta delle discontinuità nel passaggio tra una sottobanda e l'altra. Informazioni sulla locazione e l'intensità degli spectrum hole e delle bande occupate è derivata considerando le irregolarità nella densità spettrale di potenza: infatti una delle principali funzionalità dei wavelet in queste applicazioni è che permette di trovare in modo sufficientemente preciso i bordi del segnale, potendo focalizzare così l'analisi in intervalli di frequenze più definiti.

In [12] viene fatto un confronto tra alcuni di questi metodi sulla base della complessità e della precisione con cui possono arrivare ad un riconoscimento esatto, e lo schema riassuntivo è riportato in Figura 5.1. Come già accennato nella descrizione di questa caratteristica nella sezione 3.1.6 sono state studiate tecniche di sensing cooperativo [12, 39].

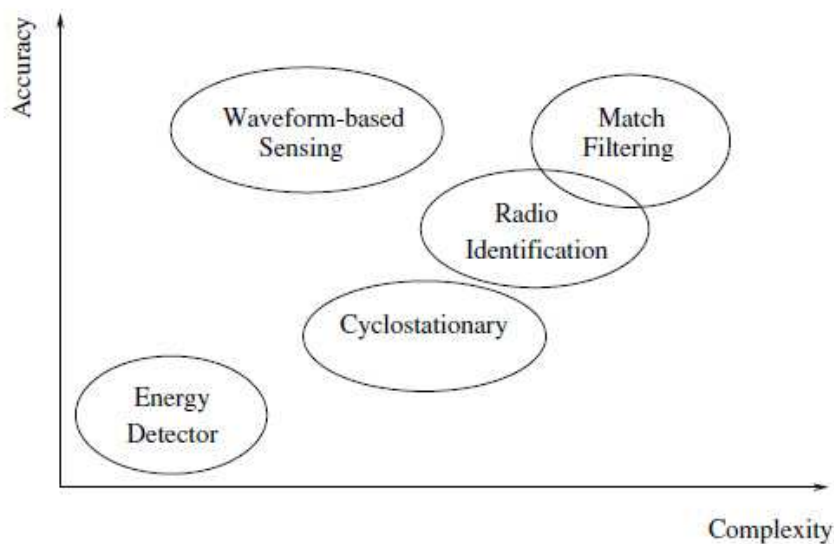


Figura 5.1: Confronto tra alcuni metodi di spectrum sensing. Fonte [12].

Protocol Design

La necessità di modificare il protocollo MAC nasce dal fatto che quelli attuali sono basati sull’allocazione statica dello spettro, e perciò non adatti per una gestione opportunistica dello spettro che varia continuamente nel tempo. In [41] vengono analizzati e confrontati ben sette proposte di protocolli MAC per le reti cognitive basati sull’approccio OSA, e ne vengono citati anche altri quattro.

La difficoltà nello sviluppare questo tipo di protocolli è che ad esso sono richieste le seguenti funzionalità:

- i nodi devono decidere in real time se captare lo spettro e dove, e determinare quale porzione è disponibile;
- i nodi devono scegliere il miglior canale e decidere se accedervi basandosi sui risultati del spectrum sensing;
- i nodi devono coordinarsi e condividere lo spettro tra utenti primari e secondari;
- buona coordinazione tra gli utenti secondari;
- gli utenti senza licenza devono lasciare il canale trasmissivo appena l’utente primario lo richiama, o venga captato.

Al momento i protocolli studiati fanno delle assunzioni iniziali che permettono la realizzazione del protocollo stesso, ma sono una limitazione di ciò che poi sarà il vero contesto in cui dovranno lavorare: ad esempio *OSA-MAC* suppone che ogni utente secondario abbia un solo trasmettitore, gli utenti si scambino informazioni di controllo in un canale dedicato, il tempo sia diviso in intervalli suddivisi da segnali impulsivi della stessa frequenza e gli utenti secondari siano sincronizzati da questa trasmissione periodica. Inoltre l’intervallo è diviso in tre fasi: selezione canale, sensing, e trasmissione dati.

HC-MAC invece assume che ci siano N canali adiacenti e gli utenti primari usino N canali per le loro trasmissioni, un canale di controllo comune è sempre disponibile per gli utenti secondari, e questi sono equipaggiati con un singola radio cognitiva. In più gli utenti secondari devono analizzare lo spettro prima di trasmettere e lo possono fare solo per un tempo fissato; anche qui il tempo è diviso in intervalli composti dalle stesse tre fasi di *OSA-MAC*.

Un’idea un pò diversa è usata nel protocollo MAC di *Noun Choi et al.*: oltre ad avere almeno due ricetrasmittitori per ogni nodo della rete, uno per trasmettere e uno per ricevere, ogni nodo sceglie un canale disponibile come canale “proprio”, nel senso che il trasmettitore rimane su quella banda finché non decide di cambiarlo, così quando un nodo j vuole trasmettere ad un nodo i , j trasmette sul canale di i . Un nodo poi cambierà il “proprio” canale nel caso sia presente un

utente primario, i nodi vicini non concordino con la sua scelta, o il canale soffra di troppo rumore.

Le altre varianti di protocolli sono ben riassunte in [41] che in conclusione evidenzia come la maggior parte dei protocolli analizzati richieda un canale per le comunicazioni di controllo: questo potrebbe essere facilmente ricoperto dalle bande ISM, anche se proprio un canale per il controllo potrebbe diventare il collo di bottiglia nelle comunicazioni. Inoltre molte proposte richiedono una sincronizzazione temporale tra utenti secondari che al momento risulta ancora di difficile realizzazione.

5.3 Prototipi

Attualmente, visti i problemi non ancora completamente risolti, non sono disponibili in commercio delle radio cognitive vere e proprie, ma vi sono dei prototipi in sviluppo spesso contenenti tecnologie proprietarie o radio che pretendono di essere cognitive solo perché possiedono alcune caratteristiche di esse: ecco alcuni esempi.

CR1: Il prototipo “Cognitive Radio 1” è stato sviluppato da Mitola per la sua tesi, per poter sviluppare le sue ricerche in un ambiente simulato, raffinando la struttura iniziale che aveva pensato per la radio cognitiva. L’architettura radio, il processo di apprendimento e il linguaggio RKRL sono stati realizzati in Java: il tutto, secondo Mitola, risultava un PDA che si sarebbe potuto realizzare con la tecnologia dei seguenti 5-10 anni [19].

XG: Questo progetto DARPA ha lo scopo di realizzare delle tecnologie innovative per l’utilizzo dinamico dello spettro in modo opportunistico puntando ad un incremento nell’accesso dello spettro di dieci volte quello attuale. Durante questi studi sono stati sviluppati dei prototipi che hanno sostenuto vari test: quello descritto in [42], alla fine del 2007, consisteva nel valutare le trasmissioni nelle frequenze 225-600 MHz disturbate appositamente, tra sei radio installate rispettivamente in auto diverse che percorrevano un circuito che si estendeva per ben cinque chilometri. Nonostante l’intervallo di frequenze non fosse enorme per poter valutare effettivamente la non interferenza con molti altri dispositivi, i risultati sono incoraggianti poiché si è riusciti ad avere più del 60 % di occupazione dello spettro con tutte e sei le radio attive.

CoRTekS: Il Cognitive Radio Tektronix System⁶ è un prototipo di radio cognitiva sviluppato alla Virginia Tech, sponsorizzata soprattutto da Tektronix che fornisce la strumentazione per i test. Il trasmettitore utilizzato è costituito da

⁶CoRTekS online: <http://ossie.wireless.vt.edu/trac/wiki/CORTEKS>.

generatori di forme d'onda, filtri e un amplificatore. Il ricevitore invece è una analizzatore istantaneo dello spettro collegato ad un calcolatore su cui viene eseguito *OSSIE*, il software open source di una SDR sviluppato dalla stessa università, che utilizza una rete neurale nel processo di decisione dei parametri e rilevazione di utenti primari. Come si vede nel filmato dimostrativo⁷ la radio può cambiare modulazione, potenza, frequenza di lavoro e banda per annullare l'interferenza, soddisfare determinati bit error rate, massimizzare il throughput o minimizzare la potenza trasmessa.

XG1 e *XG2plus*: Questi due non sono prototipi ma veri e propri prodotti realizzati da Adapt4⁸ che lavorano in bande inferiori ai 900 MHz e possono operare da utenti secondari. Il primo dei due è il più performante poiché riesce a fornire un throughput da 30 a 180 kbps e utilizzare fino a 45 canali simultaneamente gestendone autonomamente l'eventuale interferenza grazie alla tecnologia proprietaria ASAP (Automatic Spectral Adaptation Protocol); il secondo invece fornisce al massimo 20 kbps e gestisce fino a 10 canali. Entrambi comunque fanno uso di tecniche di dynamic frequency selection, transmission power control e *frequency hopping*, tecnica che consiste nel variare la frequenza di trasmissione a intervalli regolari in modo pseudocasuale, peraltro già utilizzata nel protocollo IEEE 802.11.

WiNC2R: È il prototipo realizzato da WINLAB⁹ ed è acronimo di “Winlab Network Centric Cognitive Radio”, completato nel novembre 2007, ma ulteriormente migliorato e testato negli anni successivi. Gli obiettivi del progetto iniziale erano quelli di sviluppare una piattaforma radio cognitiva che, tra le tante capacità, permettesse operazioni su più bande, facesse un'analisi veloce dello spettro, possedesse agilità in frequenza e un processore per gestire gli algoritmi di spectrum sharing. Il tutto cercando di contenere i costi di realizzazione e permettere un'utilizzo in vari scenari.

A seguito della delibera FCC 08-260 del 2008 [43] che ha deciso di rendere disponibili a utenti radio senza licenza le frequenze lasciate libere dal passaggio definitivo al digitale terrestre, hanno iniziato a svilupparsi prodotti che lavorano a tali frequenze come ad esempio la piattaforma radio *InCognito*¹⁰ sviluppata da Cambridge Consultants, che permette di identificare i segnali televisivi e quelli dei microfoni wireless. Tali infatti sono le principali tipologie di segnale riscontrabili

⁷Filmato dimostrativo: http://computing.ece.vt.edu/~jgaeddert/vid/CORTEKS_demo_sm.mov.

⁸Sito internet: <http://www.adapt4.com>.

⁹Specifiche progetto online: <http://www.winlab.rutgers.edu/docs/focus/WiNC2R.html>.

¹⁰Notizia: http://www.cambridgeconsultants.com/news_pr255.html.

in queste frequenze che devono essere considerate durante lo spectrum sensing, come da delibera FCC [43], che impone anche a tali radio di possedere capacità di geolocalizzazione e di accesso ad internet per poter connettersi ad un database contenente le informazioni sui servizi primari che hanno la licenza di trasmettere.

Un altro dispositivo disponibile da pochi mesi è il *Cognitive Radio Multiplexer*¹¹ (CRMX) realizzato da LumenRadio, prodotto sviluppato per la distribuzione senza fili dei segnali di controllo di apparecchiature illuminanti per lo spettacolo. Viene qui elencato per la sua capacità di analizzare lo spettro e adattarsi, anche se si può considerare solo un parziale prototipo di radio cognitiva, in quanto lavora solo alle frequenze ISM.

¹¹Sito internet: <http://www.crmxnova.com>.

Capitolo 6

Conclusioni

Nell'ultima parte del precedente capitolo si è visto che i prototipi attualmente disponibili iniziano ad avere la maggior parte delle caratteristiche di una radio cognitiva, anche se non completamente. Infatti, come è stato detto, il lavoro in questo campo è ancora molto. Ecco alcuni degli ambiti di ricerca che dovranno essere sviluppati e perfezionati [11, 13].

Spectrum Sensing: analisi efficiente dello spettro in termini di risorse usate e tempo richiesto per un riconoscimento accurato degli altri segnali e soprattutto degli spectrum hole e degli utenti primari; misurazione precisa della interferenza temperature; sviluppare capacità di coordinazione e cooperazione per l'analisi spettrale.

Spectrum Decision: sviluppare algoritmi efficaci che permettano alla radio di scegliere sempre la miglior alternativa, e che sappiano affrontare autonomamente e intelligentemente le situazioni con poche informazioni utili; sviluppo di una struttura o piattaforma che gestisca e migliori l'intelligenza della radio.

Spectrum Sharing: valutare la necessità di una canale speciale, magari dinamico, in cui le radio possano comunicarsi segnali di controllo, verificando che non comporti un collo di bottiglia; gestire un sistema di geolocalizzazione delle radio che permetta di realizzare una miglior mappatura dell'ambiente circostante; protocolli di comunicazione e negoziazione spettro sicuri e affidabili.

Spectrum Mobility: lasciare la banda all'utente primario quando si riconosce che questo torna a trasmettere, nel minor tempo possibile e con la minor interferenza, verificando che non sia un attacco PUE, e allo stesso tempo garantendo sempre una certa qualità del servizio all'utente secondario.

Un fattore comune a tutte le categorie precedenti è la necessità di un insieme di definizioni dei vari aspetti della radio, che porti alla realizzazione di un linguaggio di comunicazione tra i vari dispositivi, possibilmente universale, e in particolare a dei veri e propri protocolli che rispecchino l'adattabilità e l'intelligenza di questi dispositivi.

Infine per quanto riguarda la diffusione futura delle radio cognitive sotto forma di prodotto commerciale sarà fondamentale l'ulteriore aiuto degli enti normativi nazionali e internazionali che formalizzeranno l'uso di tali radio nei vari stati e ne consentiranno uno sviluppo nel libero mercato.

Bibliografia

- [1] S. Haykin, "Cognitive Radio: Research Challenges," VTC, Calgary, Sept. 2008. Online: http://soma.mcmaster.ca/papers/SLIDES_VTC.pdf.
- [2] N. Benvenuto, R. Corvaja, T. Erseghe, N. Laurenti, "Communication Systems: Fundamentals and Design Methods", Wiley 2007, p. 159.
- [3] IEEE 802 Commento al punto 20. Online: http://www.ieee802.org/18/Meeting_documents/2002_July/18-02-013r0f_Cmts_FCC_Spect_Pol_TF.pdf.
- [4] FCC Spectrum Policy Task Force, "Report of the Spectrum Efficiency Working Group," Nov. 2002. Online: <http://www.fcc.gov/sptf/reports.html>.
- [5] M. A. McHenry and McCloskey, "Multi-band, multi-location spectrum occupancy measurements," in *Proc. Int. Symp. Adv. Radio Technol.*, Boulder, CO, Mar. 2006.
- [6] S. W. Ellingson, "Spectral occupancy at VHF: Implications for frequency-agile cognitive radios," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, pp. 1379 - 1382, Sept. 2005.
- [7] ETSI, "ETSI TR 102 838 V1.1.1: Reconfigurable Radio Systems (RRS); Summary of feasibility studies and potential standardization topics", Nov. 2009. Online: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102800_102899/102838/01.01.01_60/tr_102838v010101p.pdf.
- [8] J. O. Neel, "Analysis and design of cognitive radio networks and distributed radio resource management algorithms," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Sept. 2006.
- [9] FCC, ET Docket No 03-322 Notice of Proposed Rule Making and Order, Dec. 2003.
- [10] Standard IEEE 802.11h. Online: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11h-2003.pdf>

- [11] Akyildiz, I.F.; Won-Yeol Lee; Vuran, M.C.; Mohanty, S., "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, issue 4, pp. 40 - 48, Apr. 2008.
- [12] Yücek, T.; Arslan, H., "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, issue 1, pp. 116 - 130, First Quarter 2009.
- [13] MacKenzie, A.B.; Reed, J.H.; Athanas, P.; Bostian, C.W.; Buehrer, R.M.; DaSilva, L.A.; Ellingson, S.W.; Hou, Y.T.; Hsiao, M.; Jung-Min Park; Patterson, C.; Raman, S.; da Silva, C.; "Cognitive Radio and Networking Research at Virginia Tech," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, issue 4, pp. 660 - 688, Apr. 2009.
- [14] Qing Zhao; Sadler, B.M., "A Survey of Dynamic Spectrum Access" *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, issue 3, pp. 79 - 89, May 2007.
- [15] J. Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications", Mobile Multimedia Communications (MoMuC '99), IEEE International Workshop on, pp. 3 - 10, San Diego, CA, USA, 15-17 Nov. 1999.
- [16] R.V. Prasad, P. Pawelczak, J.A. Hoffmeyer, H.S. Berger, "Cognitive Functionality in Next Generation Wireless Networks: Standardization Efforts," *IEEE Communication Magazine*, vol.46, issue 4, pp. 72 - 78, Apr. 2008.
- [17] IEEE, "IEEE Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access: Terminology Relating to Emerging Wireless Networks, System Functionality, and Spectrum Management," IEEE Std 1900.1, 26 Sep. 2008.
- [18] "SDR Forum Yearbook 2005," SDR Forum Technical Conference 2005, Orange County, CA, USA, 14-17 Nov. 2005.
- [19] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," PhD Dissertation Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, May 2000.
- [20] R. W. Thomas, "Cognitive Networks," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, VA, June 15, 2007.
- [21] J. O. Neel, J. H. Reed, R. P. Gilles, "Convergence of cognitive radio networks," in *Proc. of IEEE WCNC 2004*, vol. 4, pp. 2250 - 2255, 21-25 Mar. 2004.

- [22] D. D. Clark, C. Partridge, J. C. Ramming, J. T. Wroclawski, "A knowledge plane for the Internet," in *Proc. of SIGCOMM '03*, ACM Press, pp. 3 - 10, 2003.
- [23] R. W. Thomas, L. A. DaSilva, A. B. Mackenzie, "Cognitive networks," in *Proc. of IEEE DySPAN 2005*, pp. 352 - 360, 8-11 Nov. 2005.
- [24] SDR Forum, "Cognitive Radio Definitions and Nomenclature" Approved Document SDRF-06-P-0009-V1.0.0, 10 Sept. 2008.
- [25] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, issue 2, pp. 201 - 220, Feb. 2005.
- [26] Comments of the National Telecommunications and Information Administration on FCC ET Docket No. 03-108: "Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, And Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies," , 15 Feb. 2005.
- [27] Radiocommunication Study Groups, Working Document towards a preliminary draft new report: Software Defined Radio in land mobile services (Question 230-1/8), International Telecommunications Union Document 8A/121-E, 15 Sept. 2004.
- [28] I.F. Akyildiz, W. Lee, M.C. Vuran, S. Mohanty, "NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey," *Computer Networks Journal*, vol. 50, pp. 2127 - 2159, Sept. 2006.
- [29] Mody, A.N.; Sherman, M.J.; Martinez, R.; Reddy, R.; Kiernan, T., "A Survey of IEEE standards supporting cognitive radio and dynamic spectrum access," *IEEE Military Communications Conference MILCOM 2008*, pp. 1 - 7, 16-19 Nov. 2008.
- [30] M. Sherman, A. Mody, R. Martinez, C. Rodriguez, R. Reddy, "IEEE Standards Supporting Cognitive Radio and Networks, Dynamic Spectrum Access, and Coexistence," *IEEE Communication Magazine*, July 2008.
- [31] D. Niyato, E. Hossain, "Cognitive radio for next-generation wireless networks: an approach to opportunistic channel selection in ieee 802.11-based wireless mesh" *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, issue 1, pp. 46 - 54, Feb. 2009.
- [32] T. W. Rondeau, B. Le, C.J. Rieser, C.W. Bostian, "Cognitive Radios with Genetic Algorithms: Intelligent Control of Software Defines Radios," *Proc. SDR Forum Tech. Conf.*, pp. C-3—C-8, 2004.

- [33] N. Baldo, "Cognitive Radios and Networks," Ph.D. dissertation, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova, Jan. 2009.
- [34] Q.Zhao, L.Tong, A. Swami, "Decentralized Cognitive MAC for Dynamic Spectrum Access," *Proc. IEEE DySPAN 2005*, pp. 224 - 232, 8-11 Nov. 2005.
- [35] D. Niyato, E. Hossain, "Market-Equilibrium, Competitive, and Cooperative Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Analysis and Comparison," *IEEE Wireless Communications*, vol. 7, issue 11, pp. 4273 - 4283, Nov. 2008.
- [36] S. Mangold, S. Shankar, L. Berlemann, "Spectrum Agile Radio: A Society of Machines with Value-Oriented," *Proc. Euro. Wireless Conf.*, vol. 2, pp. 539 - 546, Nicosia, Cyprus, Apr. 2005.
- [37] J. Nie, S. Haykin, "A Q-Learning-based Dynamic Channel Assignment Technique for Mobile Communication Systems," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 48, issue 5, pp. 1676 - 1687, Sept. 1999.
- [38] Ariananda, D.D.; Lakshmanan, M.K.; Nikoo, H., "A survey on spectrum sensing techniques for Cognitive Radio," *Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*, CogART 2009, Second International Workshop on, pp. 74 - 79, 18-20 May 2009.
- [39] IEEE 1900.6 White Paper, edit by Dominique Noguét, 15 Apr. 2009. Online: http://grouper.ieee.org/groups/scc41/6/documents/white_papers/P1900.6_WhitePaper_Sensing_final.pdf
- [40] Z. Tian, G. B. Giannakis, "A Wavelet Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radio", *Proc. 1st Int. Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Mykonos Island, Greece, June 2006.
- [41] Hui Wang; Hang Qin; Li Zhu, "A Survey on MAC Protocols for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks," *Int. Conf. on Computer Science and Software Engineering*, vol. 1, pp. 214 - 218, 12-14 Dec. 2008.
- [42] P. Marshall, T. Martin, "XG Communications Program: Overview", WAND Industry Day, 27 Feb. 2007. Online: http://www.darpa.mil/sto/solicitations/WAND/pdf/XG_overview_for_WAND.pdf.
- [43] FCC, "FCC 08-260", 14 Nov. 2008. Online: <http://www.wispa.org/wp-content/uploads/2008/11/FCC-08-260A1%282ndR0-111408%29.pdf>.