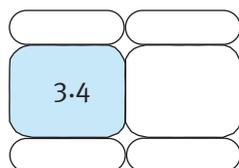




NUOVI SERVIZI A LARGA BANDA E TECNOLOGIE PER LA MOBILITÀ

Franco Mazzenga
Cristiano Monti
Francesco Vatalaro



La situazione nel campo delle telecomunicazioni appare oggi molto promettente in termini di tecnologie emergenti e di nuovi sistemi, specialmente wireless, che si affacciano sul mercato. L'articolo esamina il quadro complesso che evolve verso la cosiddetta "Next Generation Network" e la futura generazione radiomobile. L'obiettivo è concentrarsi sugli snodi tecnologici attualmente più accreditati, esaminando le caratteristiche di alcune delle tecnologie wireless che stanno affermandosi e che potrebbero fornire la struttura portante delle reti d'accesso degli anni 2010.

1. L'EVOLUZIONE DELLO SCENARIO DEI SERVIZI

In molti oggi ci chiediamo quali saranno i prossimi passi significativi dello sviluppo della Società dell'Informazione e, più in particolare, quale "futuro tecnologico" attenda il settore strategico dell'ICT (*Information and Communication Technologies*) negli ormai imminenti anni 2010. Sebbene la complessità degli scenari non ci consenta di fornire un quadro dettagliato, al contempo sembrerebbe ormai delinearsi una serie di snodi tecnologici nello sviluppo delle telecomunicazioni le cui direttrici essenziali appaiono identificabili sulla base delle innumerevoli linee di ricerca in corso negli Stati Uniti, in Europa e nell'Estremo Oriente. L'articolo cerca di rispondere al "perché" e al "come" la banda larga potrà presto incontrare la mobilità, senza le odierne limitazioni, completando negli anni 2010 un lungo percorso avviato negli anni '90 con la seconda generazione radiomobile (2G) del fortunatissimo GSM e poi proseguito negli anni 2000 con la più controversa terza generazione (3G).

L'abbondanza di banda è sempre più percepita come un fondamentale fattore abilitante del progresso economico-sociale da rendere disponibile in via generalizzata. La globalizzazione dei mercati, infatti, rende indispensabile operare efficientemente attraverso Internet e ciò vale per la quasi totalità delle imprese: la penetrazione degli accessi a banda larga (sia fissi che mobili) è destinata perciò a essere sempre più motore di crescita e di benessere.

D'altra parte sta avvenendo rapidamente la transizione dal binomio telefono portatile/personal computer all'unicità logica del computer d'individuo dotato di funzionalità multimediali, terminale personale indossabile che si articola in dispositivi con molteplici capacità sensoriali, oltre che dotati di funzioni di calcolo e comunicazione. È alle porte, cioè, la rete d'area fisica o BAN (*Body Area Network*) di dispositivi che, grazie all'abbondanza di indirizzi che sarà disponibile con l'avvento di IPv6, potranno essere presenti in rete e indirizzabili sia singolarmente che cumulativamente. La BAN sarà



parte di una rete virtuale globale sempre a disposizione dell'individuo che è always on e che, in virtù della tecnologia "IP mobile", si sposta in libertà mantenendo sempre lo stesso indirizzo senza mai abbandonare la rete virtuale globale.

Se questo scenario solo pochi anni fa poteva apparire vagamente fantascientifico e al più oggetto di studi e ricerche (per esempio, [1]), oggi costituisce ormai una parte della strategia della grande industria manifatturiera per la promozione di sistemi e servizi degli anni 2010 [2]. Anzi, se si allarga l'orizzonte ad accogliere ogni genere di oggetti, in particolare quelli dotati di mobilità, si osserva uno scenario ancora più ricco di attori: è stato stimato, ad esempio, che in Giappone nel 2010 si avrà un numero doppio di oggetti mobili rispetto alla popolazione [3]. Gli individui, quindi, non saranno i soli nodi mobili della rete virtuale globale: alle BAN si aggiungeranno reti d'area veicolare o VAN (*Vehicular Area Network*) che potranno così interagire in tempo reale con l'ambiente reale e virtuale: già oggi sono allo studio (e in parte implementate) reti *ad-hoc* di autoveicoli [4].

D'altra parte, per consentire l'efficiente interazione di BAN e VAN con Internet, gli ambienti del futuro presenteranno intelligenza immersa negli oggetti del mondo fisico, dotati di capacità sensoriali e interconnessi con la rete virtuale globale; l'ambiente intelligente sarà in grado di accrescere le facoltà degli individui presenti fino al punto di assistere in tempo reale gli stessi processi decisionali. Ciò richiede di immergere nell'ambiente fisico sistemi automatici per l'estrazione, l'elaborazione e il trasferimento delle informazioni, che dovranno anche essere autonomi (ossia in grado di configurarsi e mantenersi senza l'intervento umano) e consapevoli del contesto (in modo da adattare le condizioni del servizio al mutare delle condizioni operative).

Il mondo fisico e il mondo cibernetico tendono dunque a compenetrarsi in un "unicum informativo": l'informazione tende a divenire sempre più un bene condiviso attraverso le reti di sensori globali, e queste miriadi di sensori, prevalentemente connesse via rete wireless con tecnologie radio già in parte esistenti (per esempio, RFID, ZigBee ecc.), saranno in grado di prelevare e pre-elaborare

enormi quantità di dati, oltre a gestire autonomamente il proprio stato e le connessioni con il mondo esterno.

Esaminiamo ora brevemente alcuni degli ambiti applicativi in cui questi trend tecnologici potranno farsi sentire attraverso la generazione di nuovi servizi potenzialmente dirompenti.

1.1. Creazione e fruizione in tempo reale di contenuti personali

Nel nuovo scenario tecnologico, i clienti del servizio divengono anche fornitori di contenuti: in altre parole, il ben noto paradigma non-gerarchico di comunicazione proprio di Internet si espande nel mondo fisico quotidiano e tutti i "nodi" della rete virtuale globale si comportano al contempo da produttori e fruitori di contenuti multimediali. Questa rete, potenzialmente a maglia completa, causerà la crescita rapida di traffico a banda larga in piena mobilità. I sintomi di questo "paradigm shift" sono oggi già presenti: si pensi per esempio ai casi di videoclip raccolti sulla scena con il telefono cellulare da passanti che si trovano casualmente in luoghi ove avvengono eventi critici (atti di terrorismo, gesti criminali, eventi calamitosi ecc.) e che li rendono disponibili in tempo reale ai mezzi di informazione e alle autorità.

Tutto ciò che oggi si fa con un computer, a casa o in ufficio, e anche molto di più, potrà essere effettuato in strada per mezzo della BAN. Se l'interazione individuo-BAN-ambiente avverrà secondo modalità naturali (ossia con gli strumenti del corpo e senza o con minima mediazione tecnologica), sarà spontaneo sia acquisire che trasferire nel mondo virtuale ogni tipo di informazione e chiedere assistenza remota per le più diverse attività umane: ciò determinerà l'esplosione del trasferimento dati nelle reti mobili.

Un'ulteriore spinta verso il processo di personalizzazione dell'erogazione dei contenuti, non più necessariamente in tempo reale, potrà avvenire con il progressivo cambiamento di paradigma del Web ordinario in "Web semantico" [5]. Possiamo prevedere a breve l'avvento di contenuti personalizzati, perfino assemblati dalla stessa "Rete" secondo un profilo dinamico dell'utente (le preferenze, il contesto, ma anche lo stato d'animo del momento, rilevati automaticamente dall'ambiente intelligente): per fare

un esempio semplice, si può pensare alla possibilità di erogare il “libro personalizzato”, con un contenuto assemblato al momento e con una lunghezza adatta alle circostanze della fruizione (se sembra strano, si pensi all’odierno servizio offerto da <http://www.dailylit.com/>).

1.2. Streaming dei dati a tempo differito e contenuti personalizzati

Se a fianco della banda larga si tiene conto dell’abbondanza di memoria locale nella BAN, si può prevedere, in aggiunta alle modalità personali di creazione e fruizione dei contenuti in tempo reale di cui si è detto, anche l’avvento del nuovo paradigma del “più veloce del tempo reale”, previsto da A. Odlyzko nel 2001, inteso come rapidissima, quasi istantanea, acquisizione di contenuti sull’unità periferica che li rende disponibili per l’utente finale in qualunque momento e su qualsiasi supporto, secondo necessità [6]. Ciò si connette anche agli studi in corso sulle architetture di comunicazione, dette “info-stazioni”, in cui l’acquisizione del contenuto avviene in modo intermittente, se e quando la copertura del servizio è disponibile.

La modalità tradizionale di consumo dei contenuti audio-video sta infatti evolvendo da un’attitudine meramente passiva, tipica del paradigma della diffusione in tempo reale, verso un modello attivo, come dimostrato dal successo del “peer-to-peer” specialmente tra le giovani generazioni: d’altra parte già oggi circa l’85% dei contenuti video distribuiti dalle stesse reti commerciali radio-televisive è costituito da materiale registrato [7]. Ciò determina una forte spinta verso il modello dello streaming a banda larga e alla costruzione di palinsesti personalizzati da fruire in tempo differito.

1.3. Virtualizzazione del mondo fisico

Le reti informative pervasive offrono anche nuove possibilità di gestione dei processi su scala planetaria: viste come enorme calcolatore distribuito, potranno essere usate per supportare i processi decisionali umani di qualunque tipo. Si può prevedere allora l’avvento della virtualizzazione, ossia della creazione di modelli virtuali del mondo reale [8]: grazie all’accumulo di informazioni, il mondo virtuale può generare modelli del mondo rea-

le. Sarà così possibile, attraverso questi modelli, fare predizioni di trend futuri con lo strumento simulativo, estrarre informazione di valore mediante l’analisi comparata dei dati e derivare capacità di “problem solving” attraverso l’esame delle modalità operative dei modelli. L’esercizio della predizione a breve-medio termine attraverso l’evoluzione di modelli virtuali del reale che generano e simulano scenari alternativi in parallelo diverrà una modalità comune di supporto alle decisioni in ogni circostanza della vita quotidiana. Il controllo remoto di processi e sistemi complessi e distribuiti potrà perciò avvenire efficacemente e in tempo reale proprio in virtù della diffusione della banda larga ubiqua, oltre che della disponibilità di potenti risorse di calcolo distribuite.

Nel seguito dell’articolo si esaminano le tecnologie di accesso wireless abilitanti la banda larga necessaria all’avvento di questi nuovi servizi e di altri ancora non concepiti, nella prospettiva dei sistemi degli anni 2010.

2. ARCHITETTURE DI RETE D’ACCESSO

Per le reti di accesso wireless a banda larga sembra oggi generalmente condivisa oggi l’esigenza di sviluppare e standardizzare alcune architetture chiave, in grado di rispondere almeno ai seguenti requisiti:

- assicurare abbondante disponibilità di banda potenzialmente simmetrica sulla linea d’utente, ossia con capacità di traffico quanto più possibile eguale nei due sensi del collegamento;
- garantire l’interoperabilità tra tecnologie eterogenee per consentire, oltre al consueto handover orizzontale anche quello verticale tra standard diversi e la piena mobilità in tutti i tipi di ambiente (aperti, semiaperti, chiusi);
- consentire l’erogazione di servizi con logica di fornitura integrata, ben oltre le possibilità offerte dalla presente generazione tecnologica (per esempio connettività e accesso ai contenuti indipendenti dal tipo di terminale e dalla collocazione geografica), con configurabilità semplificata (di tipo *plug & play*), senza le consuete limitazioni dovute alla mobilità.

2.1. Le reti a banda larga di prossima generazione

I maggiori operatori mondiali di telecomunicazioni stanno preparando le prospettive di servizio citate prima attraverso giganteschi piani di innovazione tecnologica della rete che, a partire dal 2008 e per tutti gli anni 2010, dovrebbe acquisire la fisionomia completamente nuova della cosiddetta NGN (*Next Generation Network*), caratterizzata dalla piena migrazione in tecnologia IP non solo della rete di trasporto ma anche della rete di accesso (All IP). Secondo questi piani, la NGN è la rete completamente a pacchetto, in grado di fornire i servizi di telecomunicazione per mezzo di un gran numero di tecnologie a banda larga (paradigma della "rete agnostica"), assicurando i livelli richiesti di qualità di servizio (QoS) e in cui le funzioni connesse a ciascun servizio vengono ad essere indipendenti dalla specifica struttura tecnologica sottostante. Una NGN abilita l'accesso indistinto da parte degli utenti alle reti e ai fornitori di servizio e supporta la mobilità con indistinguibilità, nella percezione del grado di servizio, tra l'ambito operativo fisso e quello mobile. È evidente che la definitiva migrazione tecnologica (dal circuito al pacchetto) che sarà compiuta con la NGN è la logica conseguenza della forte progressione già da tempo in atto nel trasferimento dei servizi su piattaforma IP, accelerata dall'avvento del servizio VoIP (*Voice over IP*) ma che ben presto interesserà anche gli altri servizi svolti in tempo reale (per esempio la videotelefonata e la videoconferenza).

In aree metropolitane a forte e media densità di traffico si può prevedere il dispiegamento di una struttura ottica ad alta velocità, detta GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), almeno fino all'armadio di strada che serve un numero limitato di condomini (tipicamente alcune centinaia di utenze residenziali), mentre la rete di accesso, nella sua componente wireless, quantomeno a livello di coperture urbane in aree aperte e semiaperte, potrà basarsi sull'impiego di soluzioni *Radio over Fibre* (RoF) già introdotte da tempo ma che solo negli ultimi anni stanno venendo a maturazione tecnologica e applicativa [9]. La radio su fibra è una tecnologia adatta ad irradiare e a captare segnali a radiofrequenza (RF) per mezzo di *Re-*

mote Access Unit (RAU) collocate negli armadi di strada. Ne consegue che tutte le funzioni di elaborazione di segnale (codifica/decodifica, moltiplicazione/demoltiplicazione, generazione dei segnali a RF, cancellazione dell'interferenza ecc.) sono eseguite nella cosiddetta *Central Station* (CS) collocata entro la rete di trasporto ottica, di norma ben lontano dalle RAU, e non più, come oggi è consueto, nella stazione base tipica dei sistemi cellulari. Molte stazioni centrali possono perciò essere concentrate in pochi siti (che prendono la denominazione significativa di "Hotel di stazioni base"), riducendo fortemente i costi di manutenzione e di approvvigionamento delle scorte.

Pertanto, il segnale che transita fra la CS e la RAU ha natura ottica e, nel caso più semplice, la RAU include soltanto i convertitori ottico/elettrico e viceversa, gli amplificatori a RF (quello di potenza e quello a basso rumore, rispettivamente in emissione e in ricezione), un diplexer e l'antenna. Centralizzando nella CS tutte le complesse funzioni di elaborazione di segnale, le piccole RAU sono semplici e poco costose. Poiché, inoltre, il trasporto ottico è trasparente e la banda disponibile è amplissima, un vantaggio ulteriore di questa architettura è rappresentato dalla possibilità di trasportare assieme segnali che rispondono a molteplici standard. La tecnologia RoF si presta dunque a facilitare la convergenza tecnologica tra sistemi cablati e wireless e, per gli operatori che forniscono un'offerta integrata fisso/mobile, agevola l'evoluzione graduale dalla 3G alla prossima generazione radiomobile. Soluzioni RoF con trasporto da/verso l'armadio di strada in tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplex*) sono considerate le estensioni naturali della rete di trasporto per integrare in modo ottimale l'accesso a banda larga con le infrastrutture metropolitane basate sugli anelli ottici esistenti (Figura 1).

Nel contempo è prevista anche l'evoluzione delle reti cellulari, la cosiddetta LTE (*Long Term Evolution*), con lo sviluppo delle prime reti a partire dal 2009, basata su una nuova interfaccia radio OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) con velocità di trasmissione di molte decine di Mbit/s con terminali in mobilità veicolare. Anche per la LTE, che dovrà interlavorare con le attuali reti mobili a standard 3GPP (*3rd Generation Part-*

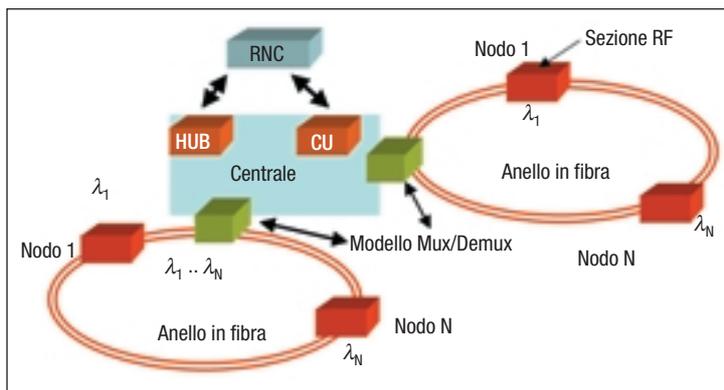


FIGURA 1
Esempio
di architettura
d'accesso in area
metropolitana

nership Program), l'architettura di rete è a pacchetti del tipo All IP.

2.2. Le reti rurali wireless

È improbabile che una o poche architetture d'accesso possano risultare adatte alle condizioni che si presenteranno nei diversi ambienti operativi. Sono, perciò, in fase di messa a punto piani per l'allestimento di reti rurali, volte soprattutto a contrastare il fenomeno del digital divide infrastrutturale, ossia il ritardo che si sperimenta in vaste aree geografiche nella realizzazione degli accessi a banda larga, che rischia di divenire persino crescente con l'avvento della NGN (e della LTE) nelle aree metropolitane. In Italia la banda larga è indisponibile in quasi tutti i Comuni inferiori a diecimila abitanti. Da un punto di vista logico, le architetture per le reti rurali distinguono tre elementi principali:

- dorsale di trasporto (o *backbone*);
- connessione locale (o "ultimo miglio");
- distribuzione negli ambienti interni degli edifici.

La dorsale ha il compito di veicolare il traffico da/verso i Comuni non raggiunti dal servizio a banda larga. Essa realizza la connessione nelle località che dispongono di POP (*Point Of Presence*), ossia punti di accesso a banda larga ad Internet, pubblici o privati, per poi renderla disponibile nei Comuni dove essa non è presente. La dorsale può essere realizzata con mezzi cablati (fibra ottica) o in ponte radio (ad esempio attraverso gli standard HiperLan, WiMAX, ecc.) o con soluzioni ibride.

All'interno di ciascun Comune, il *backbone* si può attestare per esempio in corrispondenza di un edificio pubblico (per esempio, il Muni-

cipio); sul territorio comunale la connessione è resa disponibile in modalità wireless con l'utilizzo di apparecchiature che impiegano soluzioni Wi-Fi, HiperLan2 o WiMAX.

Affinché si possa utilizzare il servizio, il soggetto gestore della rete deve dotare l'utente dell'hardware di trasmissione occorrente, detto CPE (*Customer Premises Equipment*), e del kit di configurazione software. A seconda della tecnologia radio scelta per l'ultimo miglio e delle condizioni di ricezione nel sito di utente, si possono avere configurazioni differenti nella distribuzione locale: la CPE può essere in esterno (outdoor) e in tal caso la distribuzione interna avviene via cavo; alternativamente, in taluni casi è possibile ricevere il segnale all'interno dell'edificio con CPE collocata in indoor, in prossimità del personal computer dell'utente. Nel caso di ricezione comunitaria, infine, l'apparecchiatura ricevente è opportunamente collocata sul tetto della sede dell'utente (per esempio, sede della Pubblica Amministrazione, impresa o condominio in caso di utenza residenziale) e la connettività individuale all'interno dell'edificio viene assicurata comunque via cavo (con possibile riconversione in wireless anche a copertura parziale Wi-Fi).

Una possibile architettura implementativa è riportata nella figura 2: in essa si distingue un *backbone* di trasporto realizzato tramite anello ottico in tecnologia Giga o MPLS seguito da una sezione Ethernet in ponte radio (HiperLan, ponti radio SDH ecc.). Segue la connessione periferica, in rete wireless attuabile per mezzo di qualsiasi tecnologia disponibile, tra cui HiperLan2, Wi-Fi, WiMax, e, infine, la rete di distribuzione indoor di cui si è detto.

2.3. Alternative nelle architetture di rete wireless

Per ottimizzare il trasporto e la distribuzione nelle reti extraurbane a banda larga, sono anche all'esame nuove architetture wireless che rappresentano un'evoluzione delle infrastrutture di accesso tipiche dei sistemi cellulari. Basate sulla trasmissione *Punto-MultiPunto* (PMP), come è noto, le architetture cellulari prevedono che una stazione base serva una molteplicità di terminali nell'area di copertura

Una rete WR pertanto consente di estendere la copertura soprattutto in aree geografiche ampie, migliorare il throughput e la qualità di servizio (QoS) anche per utenti che in una convenzionale rete PMP sono collocati al bordo della cella, aumentare la capacità di sistema, salvaguardare la durata delle batterie dei terminali e, infine, ridurre complessità e costi del sistema soprattutto in fase di avvio della rete.

A fronte dei vantaggi, per questo tipo di reti esistono anche limitazioni, principalmente legate alla struttura topologica ad albero. In primo luogo, nell'ipotesi in cui tutti i collegamenti abbiano la stessa capacità di trasmissione e supponendo di allocare le risorse in modo equo tra i nodi, si ha un frazionamento della banda disponibile nel transito attraverso il singolo nodo dell'albero: di conseguenza la banda offerta agli utenti serviti dalla generica RS dipende dalla profondità dell'albero e quindi dal numero di salti che il pacchetto inviato da un utente verso la stazione base deve compiere (di regola, alberi con profondità superiore a tre sono considerati impraticabili). In secondo luogo, se un collegamento lungo l'albero va fuori servizio, parte dell'area di copertura che fa riferimento alla stazione base potrebbe risultare non coperta e non è possibile reinstradare i pacchetti verso altri nodi per la ritrasmissione.

Per ovviare, almeno in parte, a questi due inconvenienti si può considerare un'architettura di rete a maglia (mesh), in cui i nodi RS realizzano a loro volta funzioni di instradamento dei pacchetti. Di conseguenza l'architettura evolve in quella di figura 3 B, rappresentativa di un caso particolare di una Rete Wireless Mesh (WM).

Con riferimento alla figura 3 si osserva che le funzionalità di tutti o parte dei nodi relay che realizzano la sottorete, devono essere estese dalla semplice operazione di rilancio (bridging) all'operazione di instradamento (routing) con conseguente aumento della complessità realizzativa e dei costi. Per gestire al meglio la complessità di questa rete solitamente si richiede che i router che la compongono siano in grado di:

□ autoriconfigurarsi, soprattutto quando un nuovo apparato viene inserito all'interno della rete già operante (caratteristica plug & play);

□ reinstradare in modo ottimale i pacchetti degli utenti tenendo conto dello stato di occupazione dei singoli collegamenti al fine di garantire agli utenti la desiderata qualità del servizio, QoS (scheduling ottimo delle risorse);

□ reinstradare i pacchetti anche in caso di guasto di uno o più nodi della rete (il cosiddetto self-healing).

In una rete Wireless Mesh come quella riportata nella figura 3 B i terminali di utente accedono soltanto attraverso i nodi fissi della rete; tuttavia, in alcune architetture di rete può essere previsto che i terminali siano in grado di realizzare in modo spontaneo una rete tra di loro sulla base di esigenze specifiche del momento. Tale rete può essere autonoma da quella dell'operatore e, siccome in generale non ha un'architettura predefinita, viene anche detta rete *ad-hoc*. Le reti *ad-hoc* con nodi mobili sono allo studio da tempo in virtù della loro naturale adattabilità a operare in ambienti fortemente dinamici, in cui non è prevista la presenza di un'infrastruttura pre-esistente, come ad esempio in caso di catastrofi naturali o in altre situazioni d'emergenza, ma per servizi che richiedono coperture wireless a banda larga permanenti presentano per lo più interesse secondario.

3. TECNOLOGIE PER L'INTERFACCIA RADIO

Nei sistemi futuri la necessità di permettere un trasporto con alti valori di ritmo binario richiede l'impiego di tecniche di trasmissione adatte a operare correttamente anche in presenza di severe condizioni del canale. Uno degli aspetti principali riguarda, perciò, la scelta dell'interfaccia radio che deve rispondere a vari requisiti, tra cui:

□ supportare alti valori di ritmo binario (in movimento almeno 100 Mbit/s nel downlink e 50 Mbit/s nel uplink; almeno 1 Gbit/s in condizioni stazionarie), garantendo al contempo un'alta efficienza nell'uso dello spettro;

□ fornire un livello fine di granularità del ritmo binario nell'accesso al mezzo, per facilitare un adattamento efficiente tra i canali sull'interfaccia radio e i canali di trasporto sovrastanti;

□ consentire scalabilità di traffico, anche realizzando combinazioni di traffico a burst e continuo;

- essere flessibile per adattarsi a differenti scenari (ambienti indoor e outdoor, configurazioni con microcelle e con macrocelle ecc.);
 - consentire di operare con terminali aventi caratteristiche eterogenee;
 - supportare collegamenti wireless a corto raggio realizzati con varie tecnologie;
 - interoperare con sistemi a standard differenti;
 - presentare bassa complessità ed essere robusta per operare in condizioni severe della propagazione e dell'interferenza.
- Pur senza addentrarsi nelle molteplici soluzioni tecnologiche proposte per lo strato fisico delle reti wireless del prossimo futuro, sembra opportuno concentrarsi su alcune tra le principali soluzioni che potrebbero garantire il rispetto dei necessari requisiti.

3.1. Radio cognitiva

Per soddisfare alle esigenze dei servizi futuri occorre disporre di risorsa spettrale in abbondanza e a basso costo, specialmente nella banda 1-3 GHz che è oggi quella più contesa e, in prospettiva, anche al di sotto di 1 GHz, per avvantaggiarsi del cosiddetto "dividendo digitale" che presumibilmente potrebbe essere ricavato dalla prevista maggiore efficienza spettrale connessa alla numerizzazione della televisione commerciale.

Come è noto l'approccio attuale nella regolamentazione dell'uso dello spettro è tale per cui ai radiosistemi sono assegnate bande di frequenza fisse, con limiti prefissati nelle potenze di emissione che hanno lo scopo di ridurre la portata radio. Così facendo, il fattore di utilizzo medio di alcune bande è basso a causa dell'allocazione inefficiente su vaste aree geografiche a servizi che le sottoutilizzano, oltre che per il ricorso a ampie bande di guardia, che può risultare ormai eccessivo in virtù del progresso tecnologico. Risale al lontano 1994 l'intuizione di P. Baran della necessità di un ripensamento radicale della politica di allocazione dello spettro [10]: da allora si sono fatti molti passi avanti in questa direzione e oggi negli Usa alcuni movimenti d'opinione sostengono molto energicamente la cosiddetta politica dell'open spectrum [11]. Anche la Commissione europea da tempo esamina il problema di tecniche innovative per un uso più efficiente dello spettro [12].

Se l'attuale meccanismo regolamentare ancora si basa sul principio di garantire protezione contro le interferenze in modo statico ipotizzando l'impiego di ricevitori privi di intelligenza, la tecnologia tra breve renderà disponibili soluzioni adattative, sia per il contenimento che per la cancellazione delle interferenze, che aprono la porta a modalità nuove di impiego partecipato dello spettro: una soluzione pratica interessante, su cui si sta lavorando in Europa, è lo spectrum leasing, ossia l'affitto di porzioni spettrali da parte del legittimo assegnatario sotto condizioni di non interferenza [13].

Un uso più flessibile della risorsa spettrale implica che gli apparati radio debbano essere dotati di funzioni di monitoraggio dello spettro e che siano in grado di adattarsi immediatamente alle condizioni della trasmissione su una banda anche molto larga (adaptive radio). Se al concetto di radio adattativa si affianca quello legato all'analisi dell'ambiente radio e alla capacità di apprendimento si parla di cognitive radio. Alcune delle caratteristiche di una radio cognitiva includono la determinazione della posizione, il monitoraggio dell'uso dello spettro anche con l'ausilio di dispositivi vicini, il cambio di frequenza, il controllo di potenza e, infine, l'alterazione dei parametri e delle caratteristiche della trasmissione; tutto questo dovrebbe determinare le condizioni per un uso adattativo dello spettro cui potrà corrispondere un significativo incremento di efficienza spettrale. Infatti, scegliendo di trasmettere in accordo con un insieme di regole atte ad evitare le interferenze e a garantire una preassegnata qualità di servizio, una radio cognitiva attua l'uso dinamico delle bande di frequenza, identificando e impiegando in modo opportunistico le regioni spettrali non utilizzate o sottoutilizzate.

L'approccio della cognitive radio potrebbe incidere fortemente sulle regole future di impiego dello spettro. Per esempio in Nord America è attiva l'iniziativa IEEE 802.22 tesa a definire una nuova interfaccia radio WRAN (*Wireless Regional Area Network*) per l'accesso a banda larga (Internet, trasporto di dati, fonia e streaming video) in aree rurali e remote con tecniche radio cognitive nelle bande di guardia televisive non utilizzate (il cosiddetto "white space"), avvantaggiandosi

delle caratteristiche particolarmente favorevoli della propagazione in VHF e nella parte bassa della UHF.

3.2. Antenne adattative

L'adattatività è un concetto che si sta affermando ai vari livelli di progetto dei sistemi radio; storicamente, forse il primo ambito applicativo è quello delle antenne. Per migliorare la qualità del collegamento radio fisso o mobile in presenza di fading già gli attuali sistemi 3G consentono l'impiego di tecniche di trasmissione che sfruttano la disponibilità di schiere di antenne per la formazione del fascio (o beam-forming), ovvero sistemi di antenne con caratteristiche di irradiazione adattative che ne consentono l'orientamento del fascio in una specifica o in un insieme specifico di direzioni. In questo modo oltre a dirigersi in modo da catturare i segnali desiderati e, reciprocamente, da irradiare nella direzione richiesta, le antenne adattative possono sopprimere l'interferenza che proviene da altri siti trasmettenti. Le antenne adattative rappresentano una tecnica molto efficace per migliorare il riuso di frequenza e quindi la capacità di traffico delle reti a banda larga.

3.3. Comunicazioni opportunistiche

I vantaggi dell'impiego compartecipato delle risorse radio, già esaminati con riferimento all'uso cognitivo dello spettro, si considerano oggi anche sotto altri punti di vista, attraverso i nuovi concetti di "comunicazioni opportuni-

stiche". Il mezzo radio è soggetto al fenomeno del fading dovuto all'interferenza, per lo più distruttiva, tra raggi elettromagnetici che percorrono cammini diversi e che si compongono vettorialmente (scattering): questo fenomeno, che genera fluttuazione del livello di segnale nel tempo (ma anche in spazio e in frequenza), secondo l'approccio classico, viene considerato un difetto della trasmissione a cui porre rimedio. Mentre nei sistemi a banda stretta occorre ricorrere all'imposizione di un margine di potenza fisso, talvolta anche grande, e/o al controllo automatico di potenza (o di guadagno), i sistemi a banda larga possono adoperare tecniche di equalizzazione adattativa basate sulla stima del canale.

Tuttavia, se si è in grado di trasmettere solo quando l'interferenza dei raggi elettromagnetici risulta costruttiva, il fading può addirittura conferire un guadagno e non determinare una perdita¹. Se, poi, il canale è usato in compartecipazione tra molti utenti e il fading agisce indipendentemente sui diversi collegamenti, si può pensare di adoperarlo sistematicamente a vantaggio di quel collegamento che risulti istantaneamente nelle condizioni più favorevoli, ottenendo così un guadagno che viene detto da "diversità multiutente" senza che ne discenda la riduzione del tempo di utilizzo, e quindi della capacità di sistema. Pertanto, in un collegamento tra stazione base e molti terminali mobili, la stazione base può "opportunisticamente" trasmettere in ogni intervallo di tempo disponibile verso quel terminale che vede in condizioni più favorevoli (Figura 4).

La riduzione della potenza media di trasmissione che ne consegue, determina minore interferenza e quindi un maggiore aggregato di dati trasmessi per unità di tempo (più alto va-

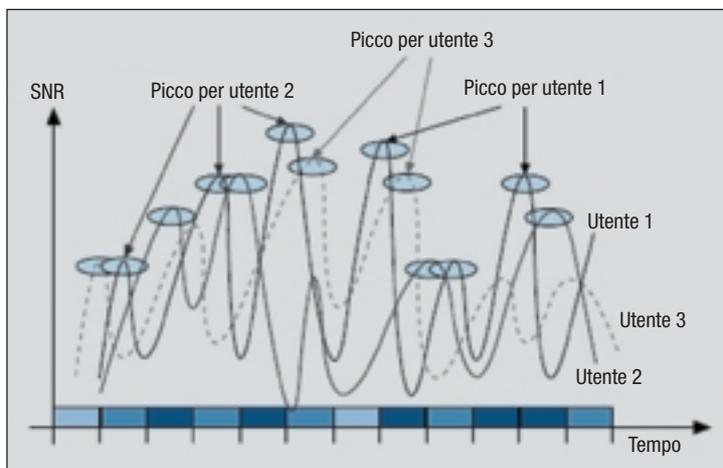


FIGURA 4

Concetto di guadagno per diversità multiutente

¹ Ciò richiede naturalmente interventi rapidi basati sulla stima a breve termine del comportamento del sistema di trasmissione, diversamente dalle tecniche che eseguono medie sul fading, come per i sistemi MIMO di cui si dirà più avanti. Si può osservare, di passaggio, un'interessante e curiosa analogia con il caso della compravendita di azioni che può farsi nel lungo periodo (filtrando così le fluttuazioni veloci del mercato) oppure con il sistema del trading online quasi istantaneo che sfrutta proprio correlazione a breve termine e dinamica limitata delle fluttuazioni dei titoli delle aziende quotate in Borsa.



lore del throughput di sistema). Più ampia è la dinamica delle fluttuazioni, più pronunciati saranno i picchi e maggiore può risultare il guadagno di diversità multiutente: inoltre, qualora l'ambiente presenti scattering modesto oppure le fluttuazioni siano tanto lente da non consentire al sistema di attendere che si raggiunga il picco, è anche possibile indurre di proposito le fluttuazioni alla stazione base.

3.4. Modulazione e codifica adattative

Un'altra tecnica dinamica usata è la modulazione adattativa, in virtù della quale il trasmettitore può cambiare il formato di modulazione del segnale in relazione alle condizioni del canale: quando la qualità del collegamento è buona si possono usare schemi di modulazione come la 64-QAM (64-quadrature amplitude modulation), che presenta efficienza spettrale di 6 bit/s/Hz; se durante la trasmissione le condizioni del canale peggiorano, si può cercare di mantenere inalterata la qualità di trasmissione cambiando la legge di modulazione, per esempio passando al QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), con efficienza spettrale di 2 bit/s/Hz. Infatti, al cambiamento di formato di modulazione è associata la variazione di valore del rapporto tra la potenza utile e la potenza disturbante (*SNR*) necessario per conseguire il richiesto valore di tasso di errore (*BER*). A parità di specifica, modulazioni con più bassa efficienza spettrale richiedono *SNR* relativamente basso (per esempio si hanno 9 dB nel caso del QPSK per *BER* pari a 10^{-6}); modulazioni più efficienti a parità di *BER* richiedono valori di *SNR* considerevolmente più elevati (circa 22 dB nel caso del 64-QAM).

A questa tecnica può agevolmente associarsi anche la codifica di canale nelle sue due varianti della correzione d'errore o FEC (*Forward Error Correction*) e della richiesta di ritrasmissione o ARQ (*Automatic Retransmission Request*). La codifica adattativa, ad esempio può realizzarsi in modalità FEC con codici convoluzionali in cui viene modificato il ritmo di codifica, oppure, nei casi in cui la trasmissione non sia sensibile al ritardo, sostituendo al codice convoluzionale classico un codice turbo che prevede l'uso di un canale di retroazione.

Come conseguenza, l'impiego della modula-

zione e codifica adattativa determina la variabilità del raggio di copertura, come mostra la figura 5: giacché la potenza ricevuta decresce con la distanza, se la potenza trasmessa è costante a parità di potenza di disturbo, utenti più vicini alla stazione base misurano valori elevati di *SNR* e possono quindi utilizzare formati di modulazione con efficienza spettrale più elevata (16-QAM o 64-QAM); d'altra parte gli utenti più lontani sono generalmente soggetti a valori più bassi di *SNR* e quindi possono essere raggiunti con modulazioni meno efficienti (BPSK o QPSK). Discende come conseguenza la dipendenza del ritmo binario dalla distanza, causa principale della riduzione di velocità di download da Internet che si sperimenta nell'allontanarsi dalla porta d'accesso al servizio.

3.5. Modulazioni multiportante

Un canale radiomobile a banda larga, B , è caratterizzato sia da un comportamento non stazionario, dovuto alla mobilità di uno o entrambi i terminali, che dal *fading* causato dalla multipropagazione dovuta agli ostacoli; perciò la funzione di trasferimento tempo-variante $H(f, t)$ è rappresentata per mezzo di un modello di canale *fading* selettivo in tempo e in frequenza. Idealmente, $H(f, t)$ dovrebbe apparire quasi costante al segnale in transito, sia in tempo che in frequenza: ciò significa che il massimo sparpagliamento dei ritardi (o delay spread) risulterebbe molto minore del tempo di simbolo, $T_s \approx 1/B$, e rispettiva-

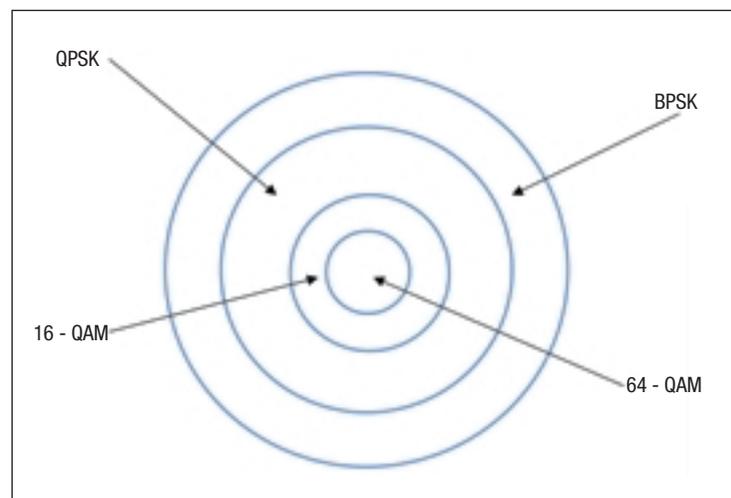


FIGURA 5

Modulazione adattativa e copertura

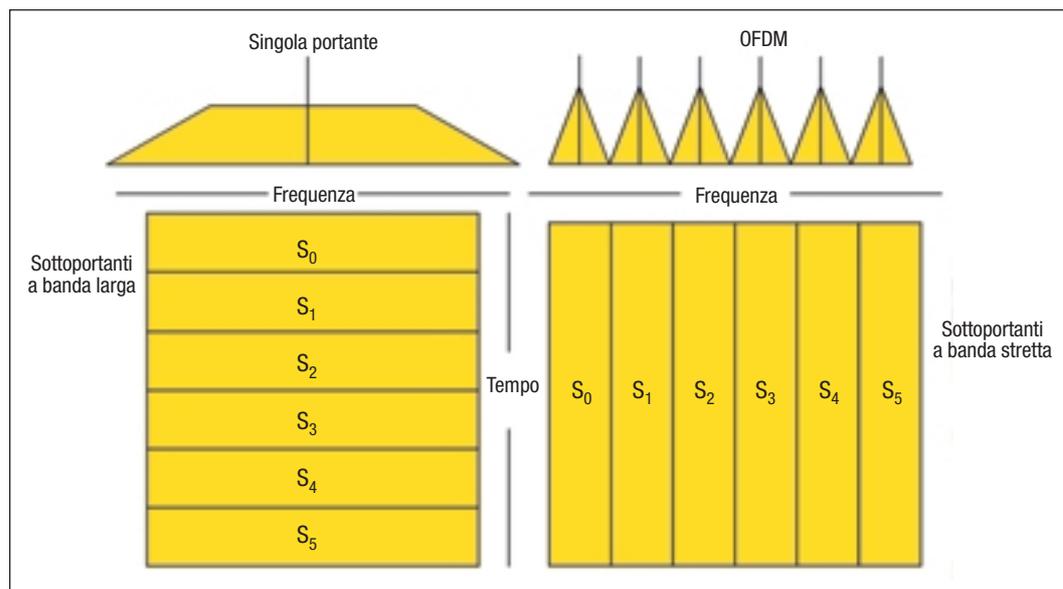


FIGURA 6
Trasmissioni
a portante singola
e multipla

mente il tempo di coerenza (inverso dello sparpagliamento Doppler) sarebbe molto più grande di T_S .

Ciò non si verifica nella trasmissione a banda larga, e quindi se si usa un sistema di trasmissione convenzionale a singola portante l'equalizzazione di canale può anche risultare assai complessa; inoltre nel canale tempo-variante anche la stima del canale deve essere eseguita più frequentemente e quindi cresce l'overhead relativo. Le potenzialità che presenta un sistema multiportante, flessibile e adattativo come l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), si mostrano particolarmente utili in canali radio tempo-varianti e selettivi in frequenza.

Come è noto, il principio dell'OFDM consiste nel dividere la banda B in N parti, in modo da ottenere canali a banda stretta, non selettivi in frequenza, di larghezza B/N ; in ciascuna sottobanda sono trasmessi dati a ritmo binario ridotto (di N volte) che sono modulati su portanti ortogonali (i segnali modulati perciò si sovrappongono dando luogo a efficienza spettrale ottima). La figura 6 confronta i due casi di trasmissione sequenziale di segnali su singola portante e di trasmissione multiportante OFDM su canali in parallelo.

In virtù dell'ortogonalità tra le sottoportanti, idealmente non si ha interferenza tra i canali in parallelo; inoltre, grazie all'uso di un opportuno tempo di guardia, T_G , associato ad ogni simbolo (detto "prefisso ciclico"), si eli-

mina anche l'interferenza intersimbolo (ISI). In pratica, ciò si mantiene vero purché T_G sia stato scelto maggiore del massimo valore di delay spread previsto e il tempo di simbolo nel canale a banda stretta $T_S' = N T_S$ risulti minore del tempo di coerenza.

Sotto queste condizioni l'equalizzazione di ciascun canale a banda stretta si riduce a stimare un solo coefficiente complesso del canale per ciascuna sottoportante. La stima si può eseguire inserendo un simbolo pilota noto nel formato dati in trasmissione: sulla base dei simboli pilota il ricevitore può stimare la funzione di trasferimento di ogni canale in ogni istante per interpolazione e ogni segnale di sottoportante può essere demodulato coerentemente. Alternativamente, può adottarsi la demodulazione differenziale che evita l'uso dei simboli pilota. Risultati sperimentali con valori di ritmo binario di oltre 100 Mbit/s hanno riportato *BER* minori di 10^{-4} in canale affetto da *fading* veloce e *delay spread* di circa $2 \mu s$ nella banda dei 5 GHz, con terminali in movimento alla velocità di oltre 200 km/h. [14].

3.6. Sistemi multiantenna

Un approccio di diversità di spazio tramite antenne multiple, sia trasmettenti che riceventi, nel canale wireless è in grado di estrarre il segnale con caratteristiche variate e in condizioni quanto più possibile indipendenti su più vie in parallelo. In origine la diversità di spazio veniva applicata solo in ricezione

per ottenere repliche del segnale che, in virtù dell'indipendenza dei modi di trasmissione, con alta probabilità non sono soggette allo stesso trattamento da parte del mezzo trasmissivo e quindi, sempre con alta probabilità, non sono tutte soggette a condizioni di fading profondo.

Il modello di trasmissione multicanale MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) [15] attua la diversità di spazio con l'impiego di una molteplicità di elementi d'antenna, realizzando una schiera d'antenna composta di N elementi nel lato emittente e di altri M nel lato ricevente (Figura 7). Se si considera il segnale in uscita alla j -esima porta lato ricezione per effetto del segnale all'entrata dell' i -esima antenna lato emissione (assumendo inattive tutte le altre porte d'entrata $k \neq i$), si può definire il guadagno di segnale g_{ij} e, ripetendo la procedura per tutte le porte d'entrata e d'uscita, si costruisce la matrice dei guadagni di canale $[g_{ij}]$. In un sistema TDD (*Time Division Duplex*) con separazione temporale tra emissione e ricezione del terminale (il cosiddetto duplex time) minore del tempo di coerenza del canale questa informazione è posseduta dall'emittitore, in quanto il canale è reciproco. Nel caso FDD (*Frequency Division Duplex*), in cui la risorsa di trasmissione viene suddivisa tra emissione e ricezione nel dominio della frequenza, deve esistere un canale di ritorno dal ricevitore al trasmettitore per fornire esplicitamente a quest'ultimo l'informazione di stato del canale, detta CSI (*Channel State Information*).

Sono casi speciali di una configurazione MIMO le seguenti architetture:

- SIMO (*Single-Input Multiple-Output*), caratterizzato da $N = 1, M > 1$;
- MISO (*Multiple-Input Single-Output*), caratterizzato da $N > 1, M = 1$.

Nel SIMO si attua la diversità in ricezione attraverso tecniche di elaborazione di segnale nella schiera ricevente: la diversità in ricezione è il caso classico che si attua attraverso le ben note tecniche di selezione o di combinazione del segnale.

Nel MISO, viceversa, si attua la diversità soltanto in emissione. La diversità in emissione è realizzata attraverso varie tecniche molto studiate al giorno d'oggi. La MISO può attuarsi sia attraverso una tecnica ad anello

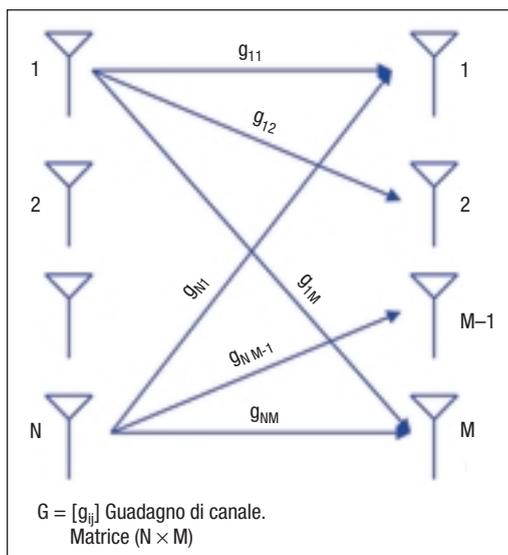


FIGURA 7
Configurazione MIMO e matrice dei guadagni di canale

chiuso che attraverso una tecnica ad anello aperto: la prima, che può considerarsi duale della diversità in ricezione, prende la forma di elaborazione di schiera in emissione; viceversa, la diversità in emissione ad anello aperto è un approccio relativamente nuovo che consente al progettista di spostare il carico di elaborazione dal terminale alla stazione base ove è collocata la schiera d'antenna.

In un sistema MISO si può avere completa o limitata CSI, ovvero si può operare in assenza di tale informazione: per completa CSI si intende la piena conoscenza, istante per istante, della matrice di canale MIMO $[g_{ij}]$. Il principale problema associato alla diversità di trasmissione ad anello aperto consiste nella mancanza di conoscenza della CSI. Pertanto si deve adottare una tecnica di codifica di canale robusta, in grado cioè di garantire buone prestazioni per un'ampia casistica di condizioni del canale. Nel caso dell'anello aperto sono possibili tre diverse implementazioni:

- trasmissione ripetuta, che prevede che ogni antenna trasmetta la stessa informazione accompagnandola con una univoca forma d'onda di firma;
- diversità di ritardo ove ogni antenna trasmette la stessa informazione in tempi differenti e non è necessaria alcuna forma d'onda di firma;
- codifica spazio-tempo o STC (*Space-Time Coding*) in cui, oltre all'impiego della diversità spaziale, i simboli vengono codificati senza alcuna informazione proveniente dal ricevitore. La STC combina i benefici della codifica FEC e

della diversità di spazio ma, a differenza delle consuete implementazioni del FEC, non implica allargamento di banda, in quanto la ridondanza è applicata nello spazio attraverso le diverse antenne e non in tempo o in frequenza. Un esempio di STC è fornito dal ben noto codice di Alamouti ($N=2, M=1$) [16].

Un tipo speciale di diversità, infine, consiste nella modulazione spaziale con antenne multiple (MIMO-SM) che attua la trasmissione di segnali differenti da ognuna delle antenne che compongono la schiera. In questo caso il ricevitore combina i segnali captati dalle varie antenne dopo averli pesati, e ricostruisce infine i segnali ricevuti, trattando gli altri segnali come interferenti.

4. TECNOLOGIE PER L'ACCESSO MULTIPLO

La flessibilità di impiego dell'OFDM si manifesta anche nelle possibilità che apre in relazione all'accesso multiplo al canale di trasmissione. Tra le varie possibilità si hanno le seguenti:

- OFDM -TDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Time Division Multiple Access*);
- OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).

4.1. Accesso multiplo a divisione di tempo

Nel sistema d'accesso OFDM-TDMA, tutte le sottoportanti sono attribuite ad un dato utente per un periodo di tempo solitamente multiplo intero del periodo di simbolo OFDM. Pertanto un utente può avere disponibilità dell'intera banda ciclicamente, ossia ogni tempo di trama, T_F (allocazione statica), oppure può ricevere un numero variabile di simboli OFDM per trama in base al requisito di

banda (allocazione dinamica). Secondo questo protocollo di accesso, le operazioni, da un lato, di modulazione e moltiplicazione dei flussi generati dal terminale (che sono oggetto dell'OFDM) e, dall'altro, quella di accesso multiplo, che avviene secondo la classica disciplina della divisione di tempo (TDMA), risultano di fatto disgiunte. Il vantaggio principale di questo metodo consiste nella riduzione del consumo delle batterie del terminale per effetto della intermittenza del funzionamento. Per una maggiore flessibilità di gestione della risorsa radio si è introdotta la disciplina OFDMA che si esamina nel seguito.

4.2. Accesso multiplo con sottocanalizzazione

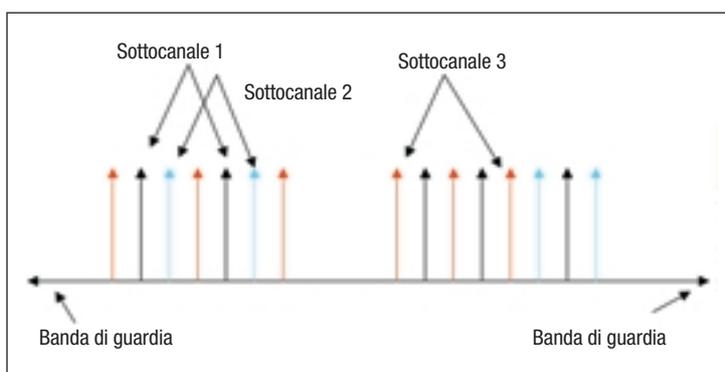
Nel caso dell'OFDMA le sottoportanti sono distribuite tra gli utenti che, in linea di principio possono trasmettere in qualsiasi istante. L'OFDMA può supportare un certo numero di flussi dati per utente di uguale ritmo binario, o anche differenti (per esempio assegnando a ciascuno un numero differente di sottoportanti). Tenuto conto delle differenti condizioni dello specifico canale di trasmissione si possono adottare diversi schemi di modulazione sulla singola sottoportante tra cui QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

Si può ricorrere a due diversi metodi di allocazione delle sottoportanti; si ha:

- l'allocazione statica, se le sottoportanti sono assegnate all'utente per tutta la durata della connessione; il metodo è semplice ma, quando una o più sottoportanti è soggetta a fading, la degradazione di prestazione che ne consegue può persistere anche per tempi relativamente lunghi;
- l'allocazione dinamica, se si dispone di informazione quasi istantanea delle condizioni del canale (CSI) per ciascun utente; questo metodo prende il nome di DSA (*Dynamic Subcarrier Allocation*) e si può attuare in svariati modi.

Nella DSA l'informazione di CSI è usata in tempo reale per assegnare le sottoportanti più adatte ad ogni collegamento (tecnica di sottocanalizzazione), in modalità contigua o interallacciata (Figura 8). In quest'ultimo caso, ossia nella sottocanalizzazione interallacciata, che è il più efficace in termini di guadagno di diversità, la sincronizzazione dell'intero segnale OFDMA diviene più difficile. Un'ul-

FIGURA 8
Sottocanalizzazione OFDMA



teriore penalizzazione della DSA consiste nella necessità di aggiuntivo carico di segnalazione (overhead) ogniqualvolta si debbano riassegnare le sottoportanti.

Grazie alla sottocanalizzazione la potenza trasmessa si concentra su un numero limitato di portanti, incrementando la potenza disponibile per singola portante e aumentando così la portata radio, ovvero contrastando le perdite di penetrazione attraverso le pareti degli edifici. Il numero e la posizione delle portanti che realizzano il sottocanale di trasmissione può cambiare su base burst o su base trama e ciò consente una gestione dinamica della risorsa di radiotrasmissione sia nel dominio del tempo che nella frequenza.

Una variante è rappresentata dal cosiddetto SOFDMA (*Scalable OFDMA*); nel SOFDMA si assume che la spaziatura tra le sottoportanti sia costante indipendentemente dal passo di canalizzazione, così se cambia la larghezza di banda del segnale da trasmettere ci si limita a modificare il numero di sottoportanti ospitate all'interno della banda.

Quando non sia possibile, oppure non sia conveniente, rendere disponibile in emissione l'informazione di CSI, un'alternativa alla DSA consiste nella tecnica di salto di sottoportante o SCH (*Sub-Carrier Hopping*) che rappresenta l'applicazione all'OFDMA del salto di frequenza. Pertanto, la tecnica SCH-OFDMA è un modo di combinare le caratteristiche dell'OFDMA con quelle dello spread-spectrum. Quando l'utente salta casualmente sulle sottoportanti disponibili si ha il cosiddetto RSCH-OFDMA (*Random Sub-Carrier Hopped OFDMA*): un esempio di questa tecnica è rappresentato dal cosiddetto FLASH-OFDM proposto per lo standard in itinere IEEE 802.20. Come di consueto per le tecniche di salto di frequenza, anche in questo si distingue tra FSCH-OFDMA (dove la prima lettera indica *Fast*) e SSCH-OFDMA (*Slow*), a seconda che il salto di frequenza possa, o non possa, rispettivamente avvenire tra simboli contigui.

5. CONCLUSIONI

L'articolo ha esaminato alcune tra le più promettenti tecnologie di interfaccia radio che si stanno affermando e che potrebbero caratterizzare le evoluzioni dei sistemi verso la Next

Generation Network delle reti fisse e la Quarta Generazione delle reti mobili.

Nell'ambito di un quadro di progressiva convergenza delle reti e dei servizi si possono prevedere notevoli sovrapposizioni tra gli standard e tra le funzionalità delle reti. Tuttavia, è anche evidente che qualsiasi tentativo di unificazione tecnologica sarà inevitabilmente destinato all'insuccesso. Non resta che prevedere un futuro complesso in termini di alternative in competizione nell'ambito di una struttura "All IP" per il resto largamente agnostica in relazione alle specifiche soluzioni tecnologiche a livello sia di strato fisico che di collegamento. Al contempo è prevedibile il successo di soluzioni a bassa complessità di interfaccia con l'utente o, come spesso si dice, di tipo "Plug & Play", con l'obiettivo ultimo dell'interazione naturale e priva di mediazione con l'utente finale.

Per questo motivo possiamo aspettarci l'avvento di soluzioni di integrazione verticale tra le alternative tecnologiche, sulla base di standard di interfaccia che ne agevolino l'implementazione. Questo modo di procedere dovrebbe determinare l'avvento di tecnologie cosiddette "a prova di futuro" che potranno evolvere in un continuum tecnologico in cui lo stesso concetto di "generazione" che si è affermato in passato finirà per perdere completamente di significato.

Bibliografia

- [1] Vatalaro F.: Il paradigma delle comunicazioni immersive virtuali. *Rivista AEIT*, Ottobre 2006, p. 28-31.
- [2] Ryhänen T., Huopaniemi J.: *Fusing the digital and the physical: future mobile experience*. Nokia Technology Media Briefing, Oct. 3, 2006.
- [3] Nakajima N.: Future Mobile Communications Systems in Japan. *Wireless Personal Comm.*, Vol. 17, 2001, p. 209-224.
- [4] Hull B., et al.: *CarTel: A Distributed Mobile Sensor Computing System*. MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory.
- [5] Berners-Lee T., et al.: *The Semantic Web*. *Scientific American*, May 2001 <http://www.sciam.com/article.cfm?articleID=00048144-10D2-1C70-84A9809EC588EF21>
- [6] Odlyzko A.: Content is not King. *First Monday*, Vol. 6, n. 2, February 2001, http://firstmonday.org/issues/issue6_2/odlyzko/index.html

- [7] Key4biz, Intervista a Vinton Cerf, 3.10.2005. http://www.key4biz.it/cgi-bin/key4biz/k4b.cgi?id_testo=51552652587338149006179246&area_tematica=&a_z=v_t&p_d
- [8] Nakamoto H., Komeichi M.: *IT Road Map toward 2010*. Nomura Research Institute, NRI papers, n. 102 March 1, 2006, <http://www.nri.co.jp/english/opinion/papers/2006/pdf/np2006102.pdf>
- [9] Cooper A.J.: Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network. *ELECTRON. LETT.*, Vol. 26, 1990, p. 2054-2056.
- [10] Baran P.: *Visions of the 21st Century Communications: Is the Shortage of Radio Spectrum for Broadband Networks of the Future a Self Made Problem?*. 8-th Annual Conf. on Next Generation Networks, Washington, DC, Nov. 9, 1994.
- [11] http://www.greaterdemocracy.org/framing_openspectrum.html
- [12] *Spettro radio: una politica strategica per l'Unione europea – seconda relazione annuale*. Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento europeo, 6.9.2005.
- [13] Weiss T.A., Jondral F.K.: *Spectrum Pooling: An Innovative Strategy for the Enhancement of Spectrum Efficiency*. *IEEE Radio Comm.*, March 2004, p. S8 -S14.
- [14] Yoshida M.: *OFDM Transmission for ISI Channels Using Variable-Length Pilot Symbols and pre-FFT Equalizer with Enhanced MRC Diversity Reception*. *GLOBECOM 2003*, p. 2290-2294.
- [15] Ajib W., Haccoun D.: *An Overview of Scheduling Algorithms in MIMO-Based Fourth-Generation Wireless Systems*. *IEEE Network*, Sept./Oct. 2005, p.43-48.
- [16] Alamouti S.M.: A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 16, n. 8, Oct. 1998, p. 1451-1458.

FRANCO MAZZENGA si è laureato in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Roma Tor Vergata ed è attualmente Professore associato di Telecomunicazioni presso il Dipartimento di Ingegneria Elettronica della stessa Università. Ha lavorato presso la Fondazione Ugo Bordoni e il Consorzio di Ricerca in Telecomunicazioni (CoRiTeL). È direttore tecnico del Consorzio Università Industria - Laboratori di Radiocomunicazioni (RADIOLABS), Roma. È autore di più di 70 pubblicazioni in atti di congressi e riviste internazionali. I suoi principali interessi scientifici riguardano i sistemi e le reti wireless, l'elaborazione numerica dei segnali e la teoria statistica dei segnali.
E-mail: mazzenga@ing.uniroma2.it

CRISTIANO MONTI si è laureato in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Roma Tor Vergata. Collabora con Telespazio nel settore relativo all'Innovazione Tecnologica. Ricercatore presso il consorzio Radiolabs, i suoi interessi di ricerca e le sue pubblicazioni si riferiscono ai sistemi di accesso radio, alla modellizzazione del canale a radiofrequenza e alle tecniche di localizzazione.
E-mail: cristiano.monti@uniroma2.it

FRANCESCO VATALARO Professore ordinario di Telecomunicazioni presso l'Università di Roma "Tor Vergata", ha oltre 25 anni di esperienza nell'industria e nell'università. È Presidente del Consorzio Università Industria - Laboratori di Radiocomunicazioni (RADIOLABS), Roma. È chairman del IEEE Vehicular Technology/Communications Society Italy Chapter e membro del Comitato direttivo della IEEE Italy Section. Membro di numerosi comitati scientifici e di redazione, è autore di oltre 150 pubblicazioni e i suoi principali interessi scientifici sono nelle comunicazioni e reti wireless.
E-mail: vatalaro@uniroma2.it