



# IL NUOVO SCENARIO DELL'ACCESSO RADIO

Andrea Calvi, Paolo Gianola, Michele Ludovico, Maurizio Marcelli

## Introduzione

Il nuovo standard 5G per reti radiomobili in corso di definizione rappresenta per TIM e per il Paese un'opportunità per lo sviluppo di nuovi segmenti di mercato abilitati da infrastrutture di rete tecnologicamente molto avanzate. Gli inve-

stimenti TIM dedicati all'evoluzione del 4G sono un fattore chiave per la guida di tale sviluppo tecnologico, dal momento che l'evoluzione del sistema LTE-Advanced sarà una componente fondamentale della futura rete 5G (per approfondimenti vedasi

l'articolo "A grandi passi verso il 5G" di questo stesso numero del Notiziario Tecnico).

La tecnologia 5G, inizialmente concepita come obiettivo per l'anno 2020, è attualmente al centro di un crescente interesse da parte dell'in-

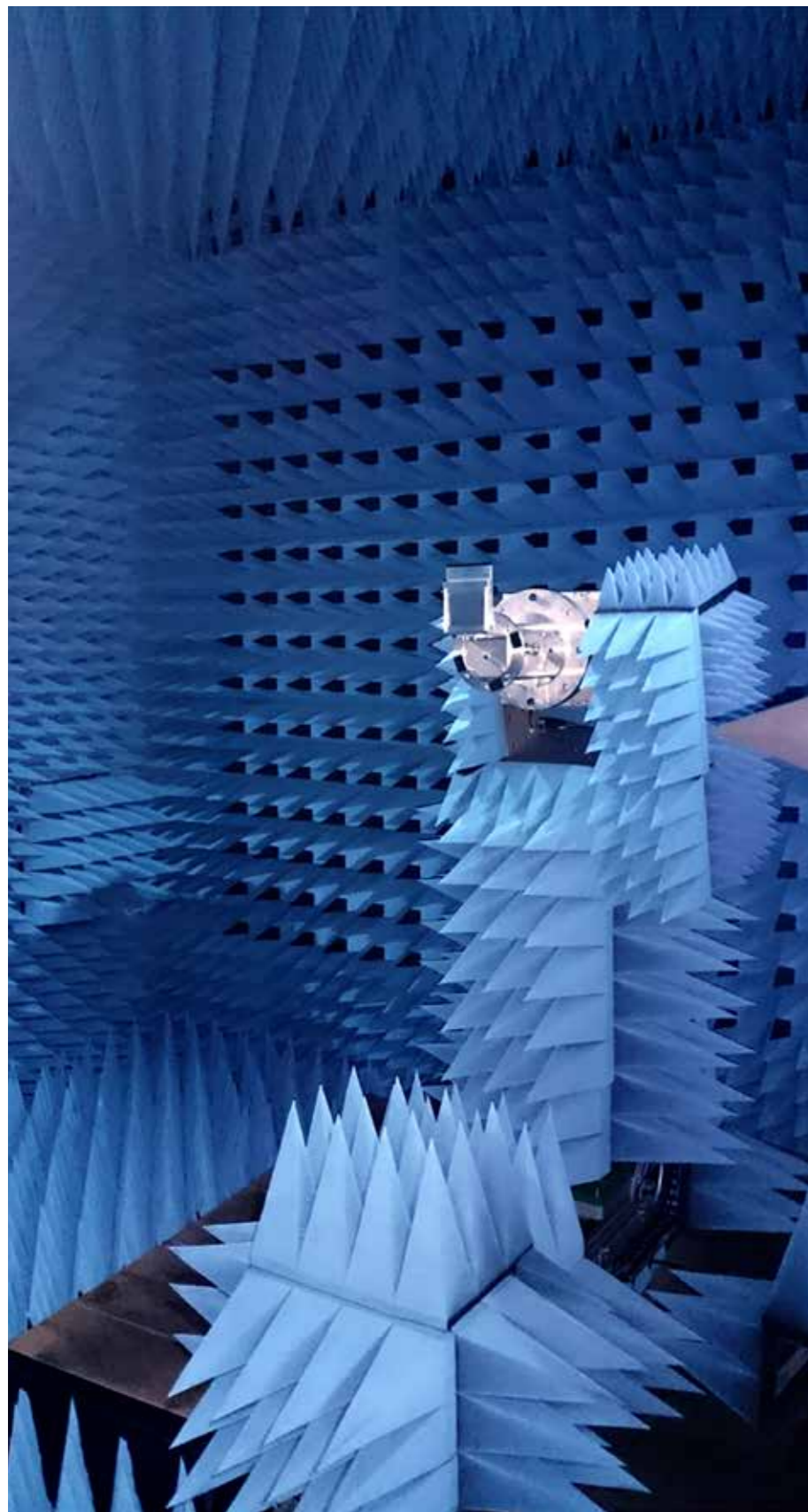
dustria internazionale, con Stati Uniti, Giappone e Corea del Sud che spingono per una disponibilità dei primi sistemi 5G già nel 2018.

In Italia, TIM ha l'obiettivo di rendere la tecnologia e l'ecosistema 5G una realtà nazionale non solo fornendo benefici alla clientela dei servizi a banda larga più tradizionali, con bit-rate wireless di picco fino a 20 Gbit/s, ma anche rendendo possibile l'introduzione di nuovi servizi nei settori di mercato "Vertical" (automotive, l'Internet of Things, robotica, industry 4.0...), superando la frammentazione di tecnologie e di sistemi "ad hoc" per ciascun settore e introducendo allo stesso tempo livelli di capillarità e affidabilità di ordini di grandezza superiori.

A tal fine, a livello internazionale, TIM partecipa con il presidio attivo nei principali organismi normativi e di standardizzazione e nei maggiori progetti di ricerca finanziati dalla Commissione Europea. In particolare ha contribuito al progetto internazionale METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society) e la sua prosecuzione METIS-II, con la stesura di deliverable tecnici ([1][2][3][4]). In Europa, lo sviluppo dell'eco-sistema per la definizione degli scenari e delle tecnologie abilitanti il 5G è avvenuta prevalentemente nel contesto dell'organizzazione 5GPPP, fondata dalla 5G Infrastructure Association di cui TIM ha fatto parte sin dalle prime fasi, attraverso un insieme di pro-

getti europei: oltre a METIS, TIM ha contribuito anche ai progetti Fantastic-5G, MiWaves e Flex5GWare nel settore dell'accesso per il 5G, con il ruolo di fissare gli obiettivi legati alla definizione del livello fisico secondo i requisiti di banda, spettro e capacità condivisi con i partner dei consorzi. La partecipazione a queste iniziative pone anche le basi per l'identificazione, secondo i requisiti identificabili nel 5G Manifesto, di possibili sperimentazioni europee transnazionali per la realizzazione delle prime reti 5G.

A livello nazionale, TIM ha firmato un protocollo d'intesa con l'amministrazione comunale di Torino, per rendere la città "prima città 5G in Italia" e nel contempo renderla laboratorio a cielo aperto, anch'esso primo in Italia, per la reale dimostrazione dell'efficacia e utilità per i cittadini dei servizi abilitati dal 5G. In questo contesto, TIM valuterà in laboratorio la maturità delle nuove tecnologie 5G (nuova interfaccia radio, sistemi di antenne intelligenti, ecc.) e contribuirà alla definizione delle soluzioni tecniche pre-commerciali in cooperazione con i principali fornitori. A questo scopo, per esempio, TIM ha recentemente inaugurato un innovativo laboratorio (Figura 1) per analizzare e verificare antenne e sistemi che utilizzano frequenze superiori a 6 GHz che costituiranno un fattore chiave per il raggiungimento delle prestazioni di picco previste per il 5G.

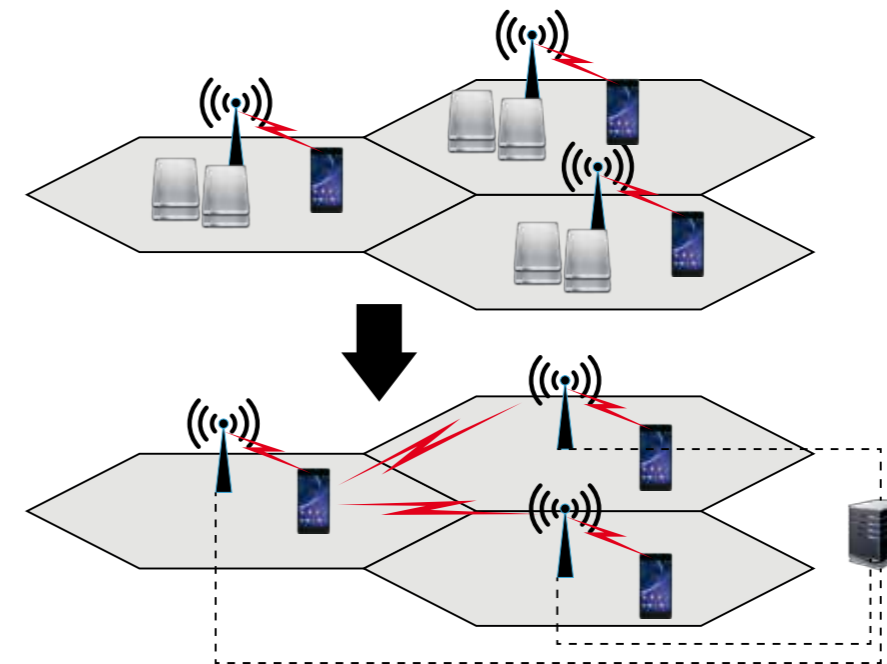


## 1 Il nuovo mmWave lab

### Evoluzione Virtual RAN in ottica 5G

La continua evoluzione della capacità elaborativa delle tecnologie al silicio, spinge gli Operatori a ripensare l'architettura della rete di accesso radio verso una soluzione virtualizzata dove porzioni sempre maggiori delle funzionalità di elaborazione dei protocolli radio vengono centralizzate e ospitate in data centre. La "virtualizzazione" di buona parte dei livelli protocollari e degli algoritmi di elaborazione del segnale su hardware "general purpose" consentirà un'estrema versatilità nelle operazioni di riconfigurazione e di implementazione di nuove funzionalità in modalità flessibile e sostenibile (Figura 2).

Dal punto di vista delle prestazioni, la centralizzazione dello stack protocollare aumenta i benefici di algoritmi di coordinamento quali il CoMP (*Coordinated Multi Point transmission/reception*) e della Carrier Aggregation. Nel primo caso i differenti punti in trasmissione o ricezione che utilizzano la stessa frequenza sono coordinati per ridurre l'interferenza e combinare il segnale ricevuto, mentre nel secondo caso il terminale può ricevere segnali trasmessi su differenti portanti, ottenendo un conseguente aumento



## 2 Architettura vRAN

del throughput percepito dall'utente. Grazie alla centralizzazione, gli algoritmi di coordinamento possono coinvolgere non solo le antenne di uno stesso sito, ma anche quelle di siti adiacenti, controllate appunto dagli algoritmi di banda base su piattaforma virtualizzata. In parallelo allo sviluppo di architetture di rete vRAN, le attività di ricerca hanno evidenziato l'importanza di muovere all'edge della rete alcune applicazioni al fine di migliorare le prestazioni e la qualità percepita dall'utente. Pensando ai sistemi 5G, questa scelta rappresenta una necessità nel caso di applicazioni che hanno requisiti di latenza molto

stringenti. Il Multiaccess Edge Computing (MEC), introdotto dal gruppo di standardizzazione ETSI IEG MEC, permette di estendere il cloud delle applicazioni all'edge della rete (ovvero all'accesso radio), grazie alla definizione di opportune API per la comunicazione tra le applicazioni e la rete; in tal modo si crea un ambiente caratterizzato da bassa latenza e banda elevata a disposizione per lo sviluppo di applicazioni che possono fare utilizzo di informazioni accessibili in real time e provenienti dalla rete dell'Operatore. La presenza di una piattaforma virtualizzata, realizzata per ospitare la vRAN permette poi di massimizzare le sinergie riutilizzando la stessa infrastruttura anche per la piattaforma MEC. L'evoluzione dell'architettura della rete radio verso il vRAN richiede an-

che un'evoluzione del fronthauling, ovvero dell'interfaccia di connessione tra la banda base virtualizzata e i moduli radio posti in prossimità delle antenne. Le tecnologie utilizzate a partire dal 3G, CPRI ed OBSAI, nate per collegamenti locali, non sono adeguate per una connessione geografica su larga scala: per un settore LTE 2x2 con larghezza di banda di 20 MHz, la banda richiesta sul fronthauling è pari a circa 2,5 Gbit/s, indipendentemente dal carico effettivo smaltito dal sistema, con requisiti di latenza molto stringenti (dell'ordine dei 150-200  $\mu$ s) [5]. Se si pensa ai sistemi 5G, caratterizzati da una larghezza di banda del singolo canale di 100 MHz e oltre, alla possibilità di avere differenti canali trasmessi da un singolo sito, i requisiti che ne derivano richiederebbero forti investimenti per adeguare il trasporto. In tal senso in vari progetti di ricerca (ad es. iJOIN, METIS-II, FLEX5GWARE) e anche in enti di standardizzazione, quali 3GPP/RAN3, sono in discussione diverse soluzioni di fronthauling più efficienti, basate sul principio di una differente separazione funzionale (*functional split*) dei livelli protocollari tra il data centre e l'antenna. Alcune caratteristiche comuni a molte di queste soluzioni sono la dinamicità della banda occupata (funzione del carico effettivo smaltito sull'interfaccia radio), i requisiti di latenza funzionali alle esigenze di servizio e non deterministici come quelli adottati nelle soluzioni di fronthauling attuali e la possibilità di utilizzare un

trasporto a pacchetto; tutte caratteristiche che rendono più sostenibile l'introduzione graduale dell'architettura vRAN nelle reti di trasporto attualmente progettate per i requisiti di connettività tra Stazione Base e Rete Core (backhuling) nella rete mobile attuale.

Il supporto di nuovi modelli di business per l'Operatore, tra i quali l'offerta di servizi di rete per applicazioni "Verticals", richiede un progressivo grado di automazione in alcune fasi dell'operatività di rete, tale da favorire l'inserimento della rete di accesso nel cosiddetto *end-to-end service and network management*.

L'evoluzione dal modello di SON (*Self-Organizing Network*) nato con il 4G, con le prime funzionalità autonome introdotte nei nodi di rete o negli elementi di Network Management, prevede l'introduzione del concetto di *Orchestration*, secondo il quale la configurazione e l'adattamento delle funzionalità di rete è strettamente coordinato con gli altri domini di rete (core network e trasporto) e con la gestione delle piattaforme di servizio.

Questo approccio sarà facilitato dall'introduzione di tecnologie di virtualizzazione in accesso radio, ma soprattutto da interfacce / API aperte messe a disposizione da parte dei diversi livelli funzionali dell'accesso radio, secondo il principio che TIM definisce *Open SON*: non solo i nodi di rete, ma anche le funzionalità di gestione (incluse quelle che in 4G implementano il cosiddetto SON centralizzato - C-SON) e applicazio-

ni sviluppate dall'Operatore a supporto della progettazione e ottimizzazione di rete (in TIM realizzate da tool sviluppati internamente, quali TIMPLAN e TIMQUAL) si interfacceranno con le nuove funzionalità di orchestrazione della RAN contribuendo al processo end-to-end.

## 5G New Radio (NR)

L'ecosistema 5G include un numero di settori di mercato e relativi abilitatori tecnologici che possono essere raggruppati in tre macro-categorie: eMBB (*enhanced Mobile BroadBand*), mMTC (*massive Machine Type Communication*), URLLC (*Ultra-Reliable & Low Latency services*), ciascuno di essi caratterizzato da diversi requisiti. Inoltre il 5G è nativamente basato sulla virtualizzazione sia in accesso sia in core network, al fine di abilitare il rapido dispiegamento di un'ampia gamma di servizi con diversi requisiti e relative tecnologie; è previsto che il sistema 5G lavori in gamme di frequenza sia al di sotto, sia al di sopra di 6 GHz, in dipendenza della disponibilità e regolamentazione dello spettro, come trattato nel seguito. È comunque molto importante notare che le evoluzioni di LTE-Advanced saranno parte integrante della tecnologia radio 5G e ciò permetterà di garantire la copertura macro su larga scala.

Un punto chiave è che l'aumento delle prestazioni di data-rate non

saranno più considerate come unico "driver" evolutivo, ma lo diventerà la disponibilità di un framework complessivo nuovo, flessibile ed agile in grado di soddisfare diversi requisiti di servizio derivanti dalle tre macro-categorie sopra citate.

In tale ottica, il sistema ed in particolare modo l'accesso radio 5G, integrando nuove componenti radio e le evoluzioni di LTE, dovrà abilitare i differenti use case relativi alle suddette macro-categorie: bit rate sensibilmente più elevate (e.g. 20 Gbit/s di picco in condizioni ideali in downlink) in caso di servizi eMBB, latenze radio dell'ordine di 1 ms per i servizi URLLC e densità di sensori a basso costo dell'ordine del milione per km<sup>2</sup>.

Le principali caratteristiche della nuova componente radio, detta appunto "New Radio", in fase di studio in 3GPP sono:

- adozione delle onde/tecnologie centi/millimetriche che implica a sua volta:
  - UDN: "Ultra Network Densification";
  - Nuovo design delle forme d'onda ed "ultra-lean signalling";
- massive/Full Dimensional MIMO (>> 8x8 antenne) & Beamforming;
- Virtual - RAN: Virtualized Radio Access Network di cui si è già parlato nel paragrafo precedente.

I potenziali vantaggi derivanti dall'uso delle onde centimetriche/millimetriche sono riassumibili in:

- disponibilità di ampie porzioni di spettro dell'ordine di centinaia di MHz;

- data rate estremamente elevati, e.g. i già citati 20 Gbit/s teorici di picco in ambiente indoor in downlink;
- ultra-densificazione della rete (da cui il citato acronimo UDN) e riuso spaziale molto elevato grazie alle tecniche di beamforming;
- "flexible deployment": possibilità di integrare backhuling e accesso sulla stessa banda.

Le principali sfide derivanti dall'uso delle onde centimetriche/millimetriche invece sono riassumibili in:

- soluzioni mai usate per le reti radiomobili;
- costi potenzialmente elevati della tecnologia e problematiche legate alle componenti RF, in particolare modo lato terminale;
- alte attenuazioni di tratta con elevata sensibilità a fenomeni di blocking ed assorbimento, oltre alle difficoltà legate alla penetrazione indoor, attenuabili dai guadagni di beamforming;
- necessità di algoritmi robusti ed efficienti per il track/search dei fasci e complessa gestione del sistema che prevede numerose connessioni "direzionali".

Le principali caratteristiche del nuovo design delle forme d'onda sono progettate per consentire l'implementazione di slicing su servizi con

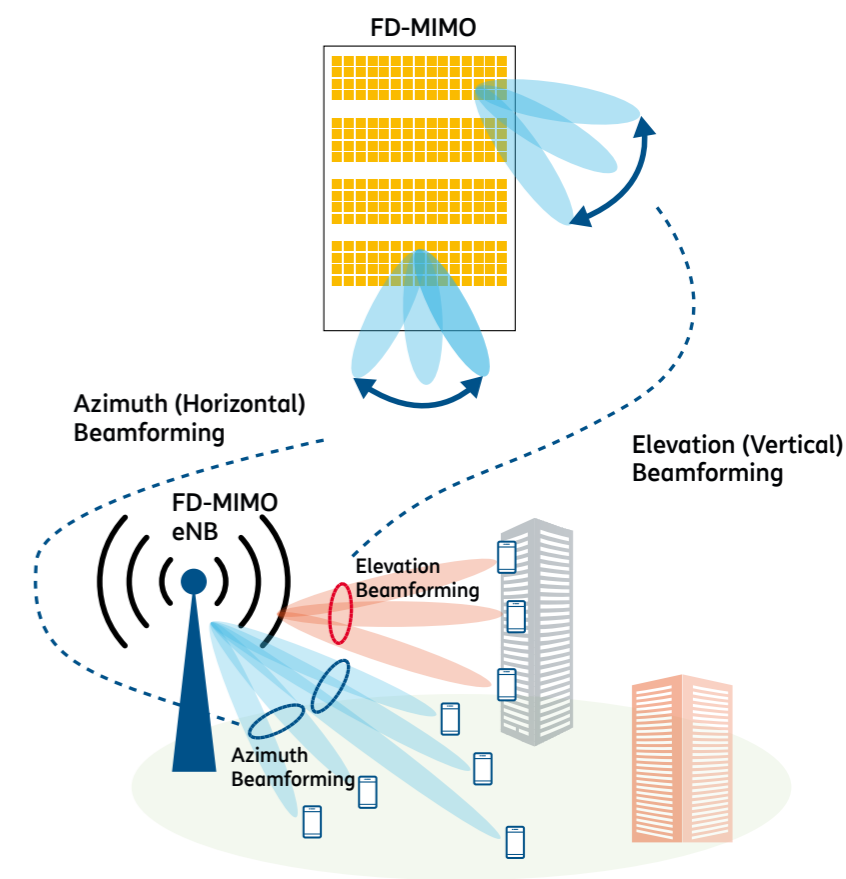
requisiti di banda, latenza o affidabilità diversi, ecc e sono riassumibili in:

- uso della tecnica di accesso OFDM come in LTE, ma incrementando l'uso dello banda disponibile (da 90% di LTE a 95% - 98%);
- variazione dei simboli pilota (RS) per gestire modelli di canale al di sopra dei 6 GHz diversi da quelli tradizionali, cercando anche di ridurre OverHead (OH) ed interferenza generata;
- adozione di diversi valori di spaziatura tra le portanti (15 (come LTE), 30, 60, 120, 240, 480 kHz) per gestire diverse larghezze di banda e diversi use case, anche in maniera dinamica;

- adozione di diversi valori di prefisso ciclico per gestire diversi range di copertura al variare della gamma di frequenza;
- "ultra lean signalling": tentativo di riduzione di overhead dei canali di controllo, sia comuni sia dedicati, adozione di "grant free operation" per use cases a bassa latenza e "self contained signalling" in caso di "Stand Alone Operation" (i.e. non in dual connectivity con macro-celle LTE).

I principi fondamentali del Massive MIMO, riassunti graficamente nella Figura 3 adottati nel 5G sono:

- elevato numero (fino ad alcune migliaia al salire della frequenza)



# FIXED WIRELESS ACCESS VERSO IL 5G: LA VISIONE DI ERICSSON

La porta che aprirà ai “servizi broadband per tutti”, SME (*Small Medium-size Enterprise*) e Residenziali, è rappresentata dal FWA (*Fixed Wireless Access*), che utilizza la tecnologia radio per portare la banda larga lì dove la fibra non si ritiene un investimento percorribile.

Infatti, l'FWA sta diventando un'alternativa sostenibile in alcune aree svantaggiate al Broadband Access fisso tradizionale grazie alla progressiva disponibilità di maggiore spettro, all'avanza-

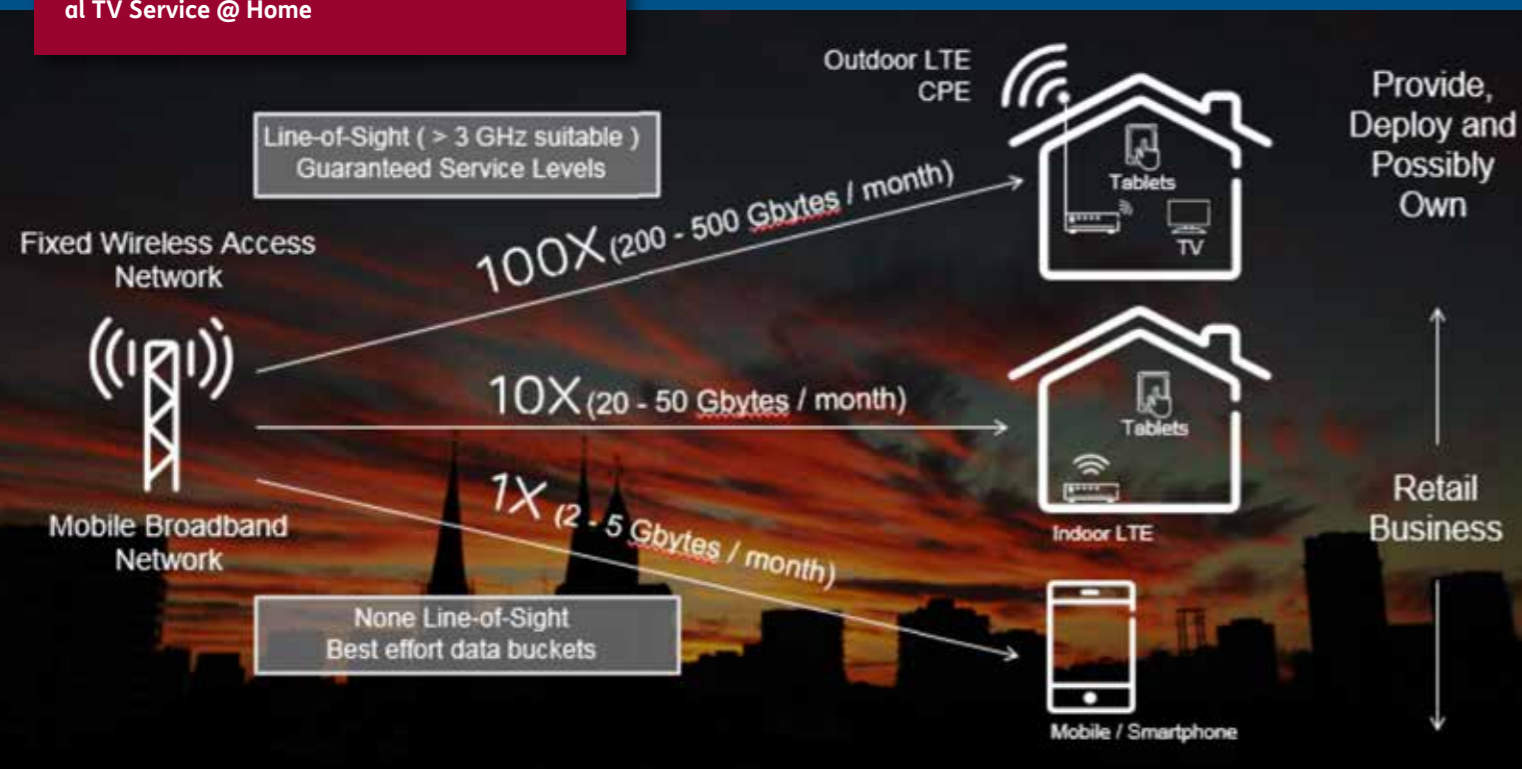
mento tecnologico nel campo dei terminali, alle avanzate tecniche di compressione Radio e alla virtualizzazione sia della Core che della Radio stessa.

Già oggi gli Operatori possono offrire servizi FWA alla clientela utilizzando la tecnologia LTE attuale eventualmente anche in banda 3,4-3,6 GHz o soluzioni di accesso Microwave PTMP sia in banda licenziata (come le bande 26 e 28 GHz) sia in banda non licenziata (HiperLAN a 5 GHz) per connettere abitazioni o uffici non raggiunti da fibra.

La tecnologia 5G, avendo l'obiettivo di fornire capacità 10-100 volte superiori all'LTE, ha il potenziale di abilitare soluzioni FWA

A

Fixed Wireless Access come evoluzione dal MBB al TV Service @ Home



più efficaci, grazie all'adozione di opzioni tecnologiche che rendono possibile utilizzare blocchi più ampi di spettro e fornire ai Clienti importanti benefici in termini di bassa latenza e maggiore capacità.

Il successo dell'FWA dipenderà dalle tecniche di “beamforming” e MU-MIMO (Multi User MIMO). Il beamforming renderà più facile fornire copertura alle alte frequenze creando fasci stretti che possono essere rediretti facilmente secondo la necessità, mentre il MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input, Multiple-Output) consentirà ai segnali provenienti da terminali utente di essere multiplexati sulla stessa risorsa frequenziale in fasci differenti. L'impiego di antenne intelligenti ad alto guadagno lato Terminale (sia Indoor che Outdoor) consentirà la possibilità di utilizzare frequenze più alte abilitando capacità 10 volte superiori alle massime capacità attualmente possibili con LTE.

Con l'FWA in tecnologia 5G a 28 GHz possiamo ad esempio immaginare uno scenario di applicazione in area sub-urbana con circa 1000 nuclei familiari da servire per km<sup>2</sup> e servizio video 4K UHD on demand. Ebbene in questo scenario, utilizzando antenne array 8x12 (costituite quindi da una matrice di 96 elementi) si può offrire un data rate di 100 Mbp/s (per il 60% delle famiglie) ed un volume di traffico che può raggiungere i 5200 Gbytes/mese per utente.

Nella figura B sono riportati degli esempi di performance di FWA 5G sia a 3,5 GHz che a frequenze superiori.

Inoltre, dalle nostre sperimentazioni si evince chiaramente che la soluzione ottimale potrà avere diverse tipologie di installazioni terminali: gli utenti più distanti necessiteranno di antenne sul tetto mentre avvicinandosi alla base station si potranno avere installazioni in esterno a parete e in un raggio più corto anche alternative “indoor”.

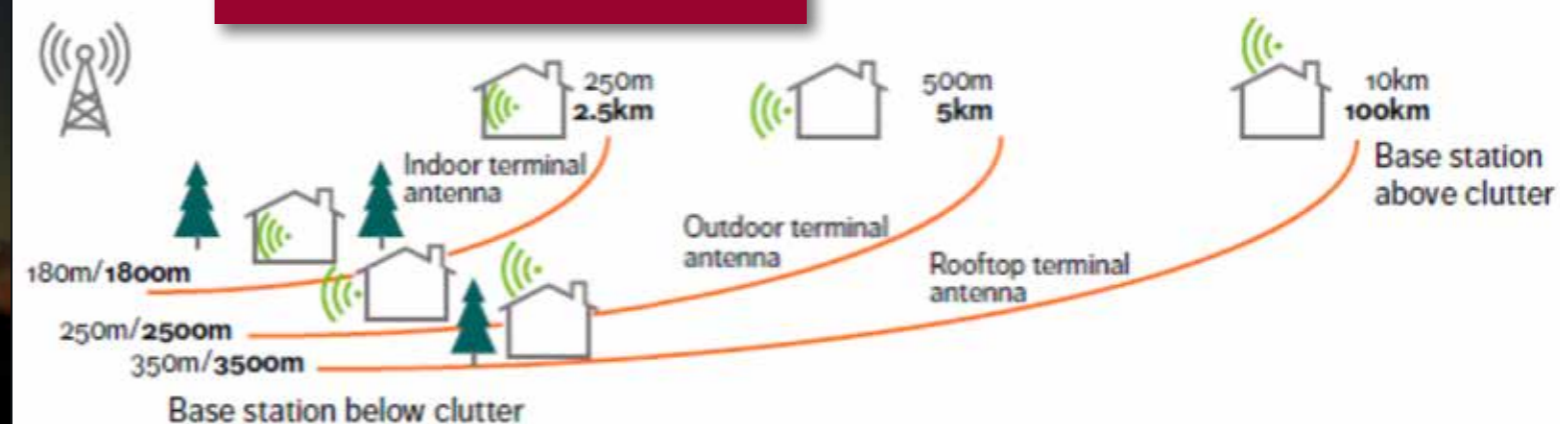
Queste due bande non sono le uniche opzioni quando si parla di 5G ma offrono un buon esempio per valutare la complementarietà di basse e alte frequenze per le applicazioni FWA.

Negli Stati Uniti, Verizon ha già iniziato sperimentazioni FWA 5G nella banda 27,5 - 28,5 GHz (con 800 MHz di banda utilizzata) utilizzando la tecnica di “Analog beam-forming” con 2 active beams per Phased Array Antenna Module (Dual Polarized) e terminali sperimentali (CPE) Intel con l'obiettivo di fornire ai clienti Gbit/s e latenze di 1-2 ms. Obiettivo di Verizon, Ericsson e Intel è un lancio pre-commerciale entro fine 2017.

In conclusione l'FWA con il 5G fornirà performance comparabili alle connessioni in fibra garantendo servizi ultra-broadband anche nelle aree suburbane e rurali, grazie non solo alla più avanzata tecnologia radio ma anche a un più efficiente utilizzo della maggiore risorsa spettrale disponibile nelle bande al di sopra di 3 GHz. Una possibilità aggiuntiva per archiviare il Digital Divide come storia passata ■

B

Fattibilità FWA per diversi scenari e frequenze a 3.5 GHz (in bold) e 28GHz



Nello Califano  
nello.califano@ericsson.com

di elementi di antenna alla Base Station;

- decine di utenti serviti in contemporanea grazie al beamforming "orizzontale" e "verticale".

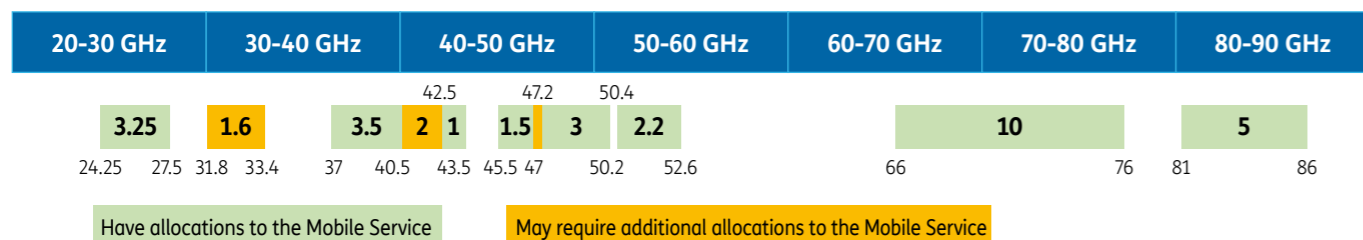
All'evoluzione dei sistemi di antenna necessaria per supportare tecniche di trasmissione FD/Massive MIMO è dedicata la sezione "Le tecnologie dei sistemi di antenna per il 5G".

## Nuovi layer frequenziali per il 5G

Durante l'ultima Conferenza Mondiale delle Comunicazioni dell'ITU a novembre 2015 (WRC-15) è stato deciso l'avvio delle attività di studio necessarie per poter giungere all'identificazione per il 5G di bande di frequenza comprese tra 24 e 86 GHz (c.d. "above 6 GHz"), allo scopo di soddisfare i requisiti prestazionali previsti per il 5G, in particolare quello di poter utilizzare blocchi di frequenza di grandi ampiezze, dell'ordine del GHz. Le bande oggetto di studio, undici in tutto, sono le

4

Bande di frequenza WRC-19



seguenti : 24,25 - 27,5 GHz; 31,8 - 33,4 GHz; 37 - 40,5 GHz; 40,5 - 42,5 GHz; 42,5 - 43,5 GHz; 45,5 - 47 GHz; 47 - 47,2 GHz; 47,2 - 50,2 GHz; 50,4 - 52,6 GHz; 66 - 76 GHz; 81 - 86 GHz (v. Figura 4). Le identificazioni avranno luogo nel 2019, a conclusione del periodo di studio in corso (2015 - 2019) e durante la prossima Conferenza ITU WRC che avrà luogo a fine 2019 (WRC-19).

A commento delle decisioni intraprese in sede WRC-15, è opportuno evidenziare due "assenze": la prima, l'assenza, tra quelle allo studio, delle bande comprese nella porzione di spettro tra 6 GHz e 24,25 GHz; la seconda, l'assenza della banda "28 GHz", sulla quale stanno invece puntando i Paesi che prima di tutti si sono lanciati verso il 5G, in particolare Corea del Sud e USA.

La tempestiva disponibilità di spettro per il 5G, è fondamentale per poter garantirne le aspettative.

In Europa, a settembre 2016, la Commissione ha lanciato il programma "5G for Europe: An Action Plan", nel quale sono individuate le azioni per giungere con la massima efficienza possibile all'identificazione delle bande 5G, focalizzandosi inizialmente sull'identificazione di un numero limitato di bande cosiddette pionie-

re (*pioneer spectrum bands*) per poi giungere all'identificazione di un ulteriore insieme (*additional spectrum bands*), senza tuttavia tralasciare l'obiettivo di massimizzare le opportunità di armonizzazione globale. A seguito della pubblicazione dell'Action Plan, il Radio Spectrum Policy Group (RSPG), gruppo consultivo della Commissione, ha pubblicato a novembre 2016 l'*Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G)* in cui le bande pioniere sono chiaramente identificate. L'*Opinion*, che contiene la roadmap strategica europea sullo spettro nei tre range frequenziali al di sotto di 1 GHz, tra 1 e 6 GHz e al di sopra di 6 GHz, individua una banda pioniera in ciascun range, ovvero le bande 700 MHz, 3,4 - 3,8 GHz e 26 GHz. In aggiunta, e bande 31,8 - 33,4 GHz e 40,5 - 43,5 GHz sono identificate come bande "prioritarie". Di queste ultime, la banda 31,8 - 33,4 GHz è quella più interessante, in quanto potrebbe essere facilmente resa disponibile per il 5G in molti Stati, compresa l'Italia, dato il suo attuale scarso utilizzo; la banda a 40 GHz, invece, è indicata come un'opportunità più nel lungo termine.

In aggiunta, l'*Opinion* fornisce l'indicazione di rendere disponibili per il

5G anche le bande già identificate e in uso per i sistemi 2G, 3G e 4G, anche in considerazione delle caratteristiche delle frequenze al di sotto di 1 GHz, le sole in grado di fornire coperture ampie e buona penetrazione indoor. Sul piano tecnologico, ciò implicherà che nel caso delle frequenze oggi utilizzate per il 4G sia attuato un approccio evolutivo, con la coesistenza di terminali 4G e 5G sulle stesse bande di frequenza.

Per quanto riguarda le tre bande pioniere, mentre le bande 700 MHz e 3,4 - 3,8 GHz sono già armonizzate e identificate per i sistemi IMT a livello CEPT, la banda 26 GHz è attualmente allocata al servizio fisso per applicazioni Fixed Wireless Access (FWA) ed è tra le bande allo studio per le eventuali nuove allocazioni frequenziali per il 5G che saranno decise alla prossima WRC-19. Iniziative sulle bande pioniere simili a quelle della Commissione sono, naturalmente, in corso a livello internazionale ed extraeuropeo, in particolare in USA, Corea del Sud e Giappone, dove, come già ricordato, la banda pioniera nel range di frequenze al di sopra di 6 GHz è la banda 28 GHz, che tuttavia non rientra nelle bande allo studio per le nuove allocazioni della WRC-19.

## Le tecnologie dei sistemi di antenna per il 5G

Sin dai tempi in cui iniziarono i lavori per arrivare a specificare il 5G

era chiaro che un ruolo importante nella definizione del nuovo sistema di comunicazioni lo avrebbero giocato le antenne. Due gli ambiti nei quali ci si aspetta un contributo rilevante da parte dei sistemi di antenna per il raggiungimento degli sfidanti obiettivi che ci si prefigge di raggiungere: da un lato l'implementazione di algoritmi avanzati di beamforming, dall'altro la possibilità di operare efficacemente a frequenze di decine di GHz (a cui corrispondono lunghezza d'onda dell'ordine dei millimetri - da qui il termine di onde millimetriche o *mmWaves*).

## Le tecniche di beamforming

Le tecniche di *beamforming* (o sagomatura del fascio irradiato dall'antenna) a cui si fa riferimento, tutte mirate a far crescere l'efficienza spettrale del sistema, sono tipicamente le seguenti:

- *Single User - MIMO*: sin dalla prima release delle specifiche LTE (Release 8) è stata prevista la possibilità di trasmettere con più antenne sia lato eNB, sia lato terminale, per aumentare il throughput del singolo utente (inviando più flussi informativi sulle stesse risorse radio) o concentrare il segnale trasmesso verso il singolo utente.
- *Multi User - MIMO*: la tecnica *Single User - MIMO* è stata affiancata, sin dalla Release 9, da formati di trasmissione (transmission mo-

des) che permettono di trasmettere simultaneamente sulle stesse risorse radio verso due o più utenti;

- *Full Dimensional / 3D - MIMO*: per estendere ulteriormente la possibilità di dirigere il fascio irradiato dall'antenna in maniera quanto più possibile mirata (almeno idealmente) sul singolo utente lo standard ha introdotto (dalla release 13) dei meccanismi per ottimizzare il puntamento del fascio, sia nel piano orizzontale (azimuth), sia in quello verticale (elevation), attraverso una schiera bi-dimensionale (considerati fino a 64 elementi in standard);

- *Very large / Massive MIMO*: per dirigere il fascio irradiato dall'antenna in maniera quanto più possibile mirata (almeno idealmente) sul singolo utente l'antenna a schiera richiede un elevato ("very large", "massive") numero di elementi radianti (da alcune centinaia a migliaia, distribuiti nelle due dimensioni). Evoluzioni dello standard in tal senso sono previste per la 5G *New Radio*.

Al di là delle specificità di ciascuna delle tecniche citate, nella sostanza si tratta di soluzioni che sfruttano la capacità delle antenne a schiera di sagomare il proprio diagramma d'irradiazione agendo su ampiezza e fase dei segnali che transitano per ciascuno degli elementi radianti che le compongono, con l'obiettivo di operare "su base utente". Infatti, grazie a tecniche di elaborazione in banda-base del segnale relativo

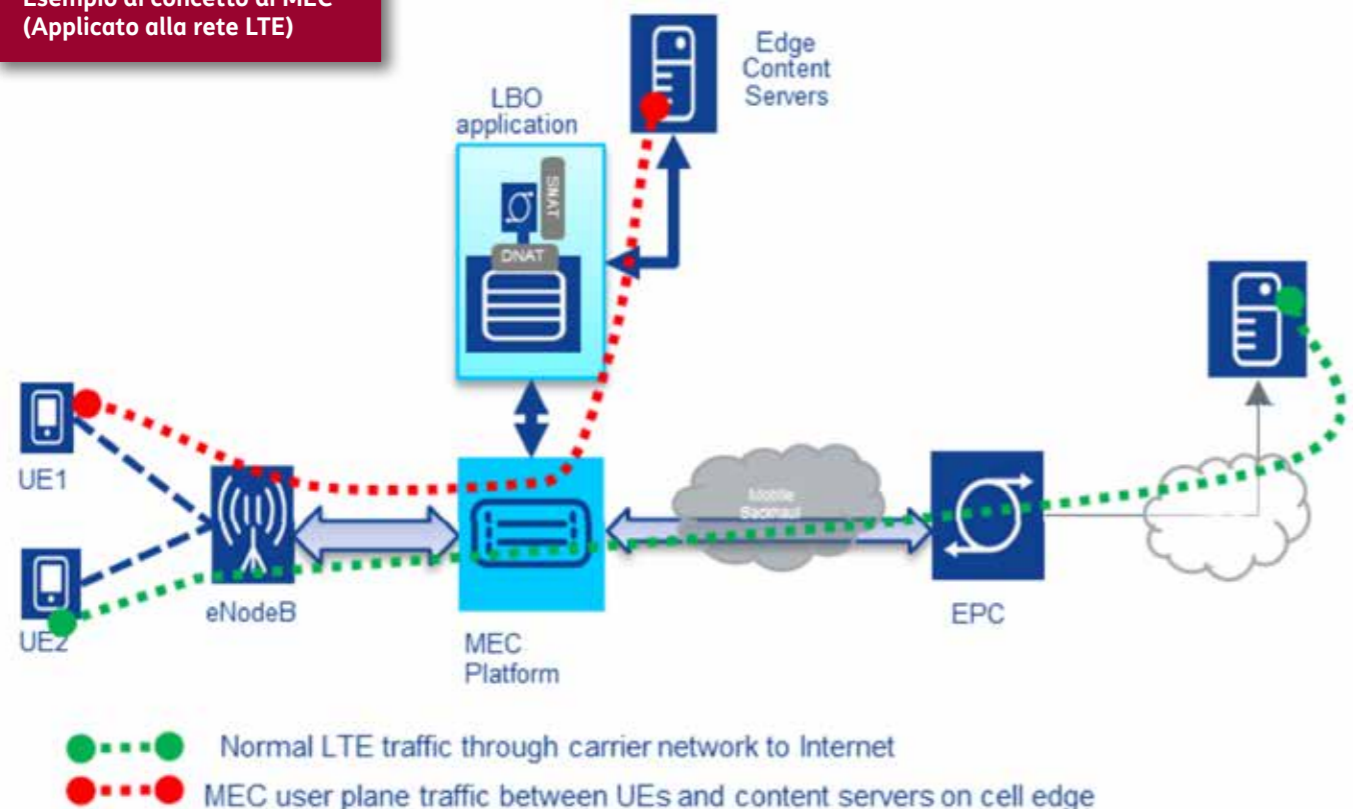
# MULTIACCESS EDGE COMPUTING: LA VISIONE DI NOKIA

Un elemento evolutivo introdotto dal 5G è la capacità di supportare servizi che richiedono bassa latenza, anche in condizioni di piena mobilità. A tal fine l'elaborazione dei dati relativi a queste applicazioni deve avvenire all'edge della rete, secondo il paradigma del MEC (Multi-access Edge Computing). La soluzione MEC di Nokia permette di fare evolvere il sistema LTE verso l'architettura del sistema 5G: l'introduzione di micro data centre disposti all'edge della rete (cloudlet), dove

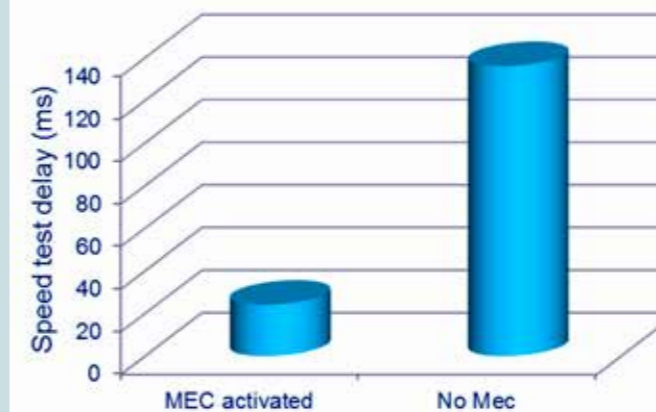
la tecnologia MEC può coesistere con altre funzioni di rete virtualizzate, permette di spostare il processing più vicino all'utente, riducendo la latenza. Si migliora in questo modo la qualità sperimentata dall'utente finale e l'interattività dei servizi. Un altro vantaggio di questa soluzione è dato dal fatto che mantenendo il traffico relativo all'applicazione a livello locale, il MEC permette di ridurre i requisiti di banda nella rete di trasporto e aumentare la sicurezza delle comunicazioni.

Sin dalla fine del 2014 più di 60 aziende partecipano all' Industry Specification Group for MEC [Formerly in-

## C Esempio di concetto di MEC (Applicato alla rete LTE)



## Speed test PK in main stand during peak hour (Shanghai F1 race)



## Application experience (4 TV feeds available on intuitive app in real time)

Delay between original TV feed and MEC-enabled race app

<500ms

Same content, same network but pulled from different app from the Internet

min. 30s

69% of survey respondents stated that they would pay extra for a real time video experience on race day

D Alcuni risultati sperimentazione MEC effettuata durante il Gran Premio F1 di Shanghai

dicated as "Mobile Edge Computing"] dell'ETSI: Nokia è tra i membri fondatori con l'obiettivo di guidare la standardizzazione e stimolare, tramite la definizione di un'architettura aperta con interfacce standardizzate, lo sviluppo di nuove applicazioni e la creazione di nuovi servizi.

Il MEC può trovare applicazione a diversi scenari: aree di particolare interesse come un centro commerciale o uno stadio, in reti private LTE per realizzare reti ultraveloci per clienti enterprise, ma anche una città intera (ad esempio per applicazioni IoT all'interno di iniziative per Smart City), o dispiegamenti più estesi.

Diversi use case possono trarre beneficio dall'impiego della tecnologia MEC, ad esempio Augmented/Virtual Reality, Edge Video analytics, distribuzione di contenuti unicast o broadcast, applicazioni con elevata interattività (gaming).

Una sperimentazione MEC effettuata durante il Gran Premio F1 di Shanghai ha mostrato significativi miglio-

ramenti di latenza, anche in condizioni di carico delle celle coinvolte (riduzione della latenza nella "peak hour" dell'ordine del 75%), con effetti sulla user experience di applicazioni "real time". (La figura è riferita ad una applicazione per la fruizione di contenuti televisivi in diretta durante il Gran Premio).

Miglioramenti significativi nella user experience si sono verificati anche con applicazioni di "realtà aumentata" che hanno mostrato un tempo di disponibilità del contenuto fino a 4 volte più ridotto rispetto ad una tradizionale rete LTE.

a ciascun utente, si ottiene che ad esso corrisponda, in modo puntuale, un fascio irradiato/ricevuto dalla stazione radio base per il tramite di una schiera di antenne (*beamforming* in elevazione/verticale e azimuth/orizzontale), al fine di limitare l'interferenza causata ad altri utenti e ridurre gli effetti di quella da essi generata.

Si tratta di tecniche che richiedono l'introduzione di sistemi di antenne attivi (AAS), che integrino le funzioni di conversione da e verso la Radio Frequenza (con opportuni filtri e amplificazioni) dei segnali relativi a ciascun elemento radiante (o loro raggruppamenti) con l'elevata capacità computazionale necessaria per elaborarli efficacemente su base utente.

Tra le implicazioni pratiche di questa impostazione vi sono le seguenti.

- Un AAS deve poter operare in un punto della catena rice-trasmissiva in cui siano disponibili i segnali relativi ai singoli utenti, dunque all'interno del Layer 1. Un motivo in più per modificare l'attuale implementazione del *fronthaul*, introducendo un diverso *functional split* (v. Evoluzione virtual RUN in ottica 5G) che sposti almeno parte delle operazioni di L1 all'interno dell'antenna (se non fosse così il *fronthaul* dovrebbe disporre di una capacità di decine di Gbit/s per trasferire i dati da elaborare verso l'apparato di banda-base, v. paragrafo 2).
- Il sistema deve preferibilmente operare in modalità TDD per ap-

profittare dei benefici offerti da tali tecniche grazie alla reciprocità del canale trasmissivo (condizione che non si verifica in modalità FDD, dove le bande di frequenza per la trasmissione e la ricezione dei segnali sono diverse).

- Limiti pratici legati alla complessità di un AAS fanno immaginare che il *beamforming* "su base utente" legato ad algoritmi di processamento in banda-base possa essere più facilmente realizzato per frequenze non troppo elevate (indicativamente "sub-6 GHz"). Per frequenze superiori si può comunque parlare di *beamforming* ma, con maggiore probabilità, potrebbe essere riferito a un tipo di elaborazione a RF (v. il riferimento alle tecniche di "fascio multiplo" e *beam steering* della sezione seguente).

### Operare a decine di GHz

L'impiego di sistemi operanti a mmWaves non è nuovo nel mondo delle comunicazioni. Attualmente, infatti, le bande V (60 GHz) ed E (80 GHz) sono già utilizzate per servizi di trasporto fisso infrastrutturali. Parallelamente l'incremento di banda richiesto in ambito domestico ha visto lo sviluppo del WiGig sempre alla frequenza di 60 GHz.

Peraltro negli anni scorsi molti esperimenti e trial sono stati eseguiti e molte indicazioni di funzionamento sono state raccolte e catalogate per

tali sistemi. Tutti i dati hanno confermato le previsioni di funzionamento pubblicate in ambito ITU-R, nonché la robustezza per applicazioni outdoor entro i 2 km di lunghezza del collegamento.

Con il 5G, l'esigenza di realizzare le prestazioni promesse in termini di elevate velocità trasmissive richiede di poter disporre di segnali con larghezze di banda quanto più possibile grandi. Tenuto conto che la larghezza di banda disponibile per un sistema di comunicazioni è tipicamente tanto più ampia quanto più alta è la frequenza a cui opera, risulta evidente l'interesse a lavorare a frequenze di decine di GHz (anche superiori agli 80 GHz e fino ai 170 GHz della banda D) dove l'ampia disponibilità di spettro permette di ottenere velocità trasmissive dell'ordine di diversi gigabit al secondo (non a caso approfondimenti in questa direzione sono da tempo in corso anche nell'ambito dei progetti finanziati dalla UE in ottica 5G, fra i quali ricordiamo *MiWaveS* a cui anche TIM ha contribuito).

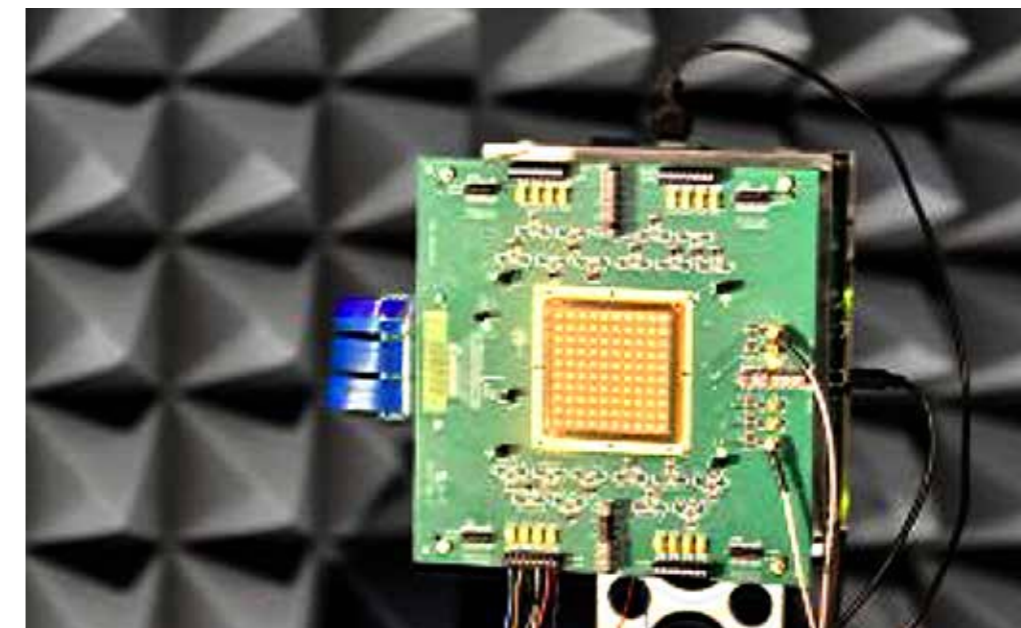
Una caratteristica propria dell'operare a decine di GHz è l'aumento dell'attenuazione subita del segnale a seguito della sua propagazione in aria (eventualmente accentuata dal fenomeno del picco di assorbimento dell'ossigeno nella banda dei 60 GHz). Si tratta di un effetto certamente negativo dal punto di vista del *link budget*, che però può essere compensato facendo ricorso ad antenne a elevato guadagno. Fra queste, benché una soluzione possibile

sia certamente rappresentata dalle antenne a riflettore, sempre maggiore interesse stanno rivestendo le antenne a schiera (o *array*) che, pur se costituite da alcune centinaia/migliaia di elementi radianti, occupano una superficie non eccessivamente grande, pari indicativamente a  $W \times H$  cm<sup>2</sup>, dove W e H sono dell'ordine di pochi/alcuni centimetri (si veda per esempio il caso di *Figura 5*). Tali *array* eventualmente permettono anche di realizzare soluzioni a fascio multiplo (basate su tecnologie quali la matrice di Butler oppure la lente di Rotman) o abilitare funzionalità di *beam steering* grazie all'impiego di elementi attivi (sfasatori e amplificatori a RF) integrati nell'antenna. Peraltro lo stesso fenomeno dell'aumento dell'attenuazione, letta come possibilità di mantenere il segnale ben confinato nello spazio, ha almeno due risvolti positivi. Da un

lato, infatti, dovrebbe consentire il contenimento dei fenomeni interferenziali. Dall'altro, grazie all'impiego di antenne che permettono di generare fasci altamente direzionali (con i benefici in termini di link budget di cui si è detto), favoriscono l'aumento del riuso spaziale delle frequenze, con un significativo incremento dell'efficienza di sfruttamento del canale hertziano.

Un aspetto chiave per ottenere un utilizzo efficace dei sistemi di trasmissione è dato dalla possibilità di prevedere la copertura radio in fase di progetto della rete. A tal fine, è necessario disporre di modelli propagativi accurati e di strumenti di progettazione che ne possano beneficiare. Tale aspetto è ancora più rilevante quando si opera a frequenze di decine di GHz, perché più la frequenza è elevata, più limitata è la copertura. Il segnale radio, infatti, è

un'onda elettromagnetica la cui propagazione è influenzata dagli elementi ambientali le cui dimensioni sono confrontabili con la lunghezza d'onda. Nel caso delle mmWaves, dunque, la propagazione del segnale radio risente in particolare degli ostacoli più piccoli, quali scrivanie, sedie, automobili, cartelli stradali e le stesse persone. Da qui la scelta di TIM di investire nello sviluppo di modelli di propagazione dettagliati ma computazionalmente efficienti da integrare all'interno di TIMPLAN (lo strumento di progettazione radio sviluppato internamente a supporto delle attività di progetto ed evoluzione della rete), al fine di simulare le coperture radio dandone una rappresentazione tridimensionale, con l'onda elettromagnetica che, come un raggio, si riflette sulle pareti, penetra negli edifici attraverso porte e finestre e si attenua (v. *Figura 6*).



5  
L'antenna (il quadrato al centro di 2,8 pollici di lato), realizzata da IBM ed Ericsson a inizio 2017, è progettata per operare a 28 GHz ed è basata su circuiti integrati in Silicio [6].

# DAL BACKHAULING AL FRONTHAULING VERSO IL 5G: LA VISIONE DI ALTIOSTAR

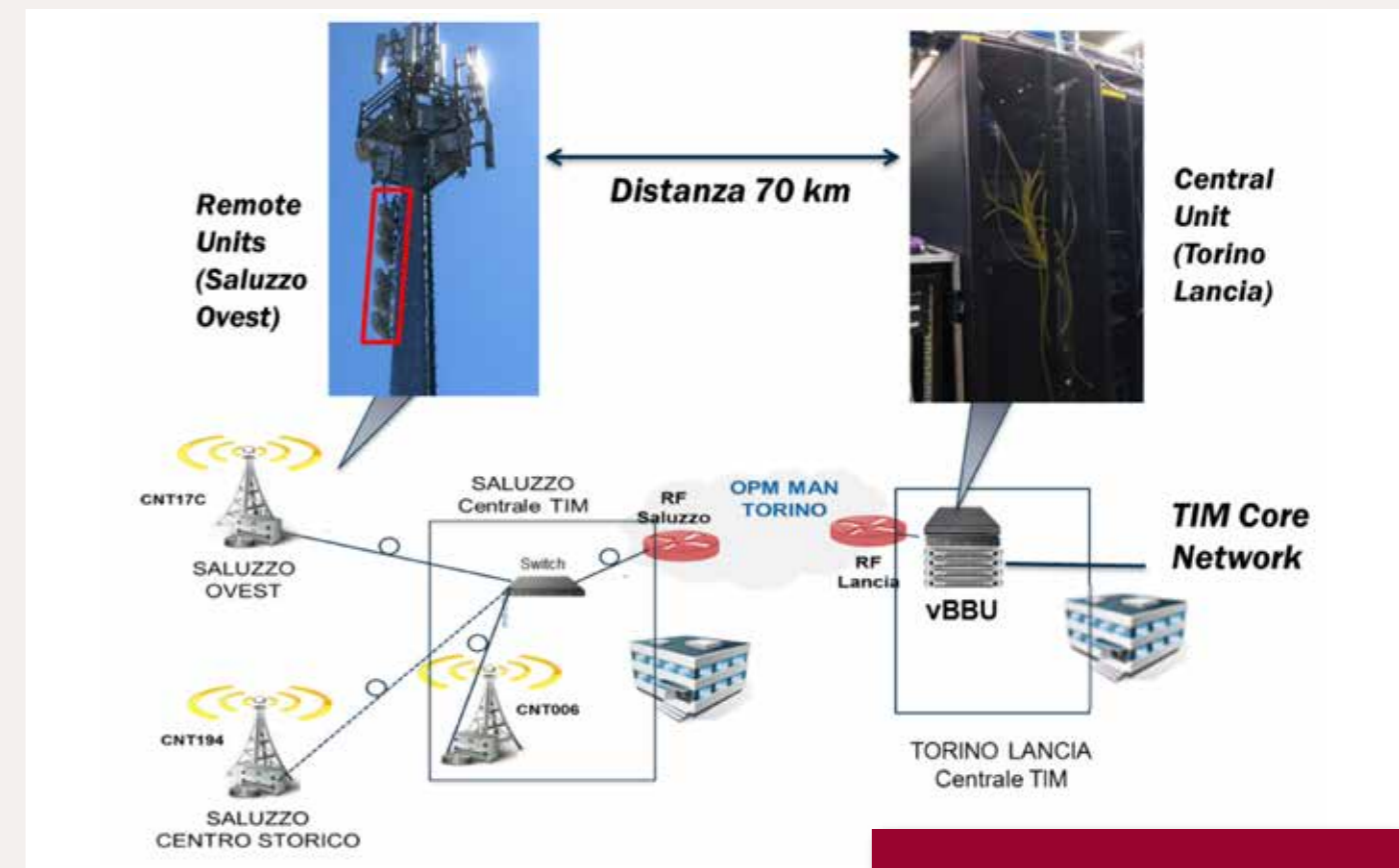
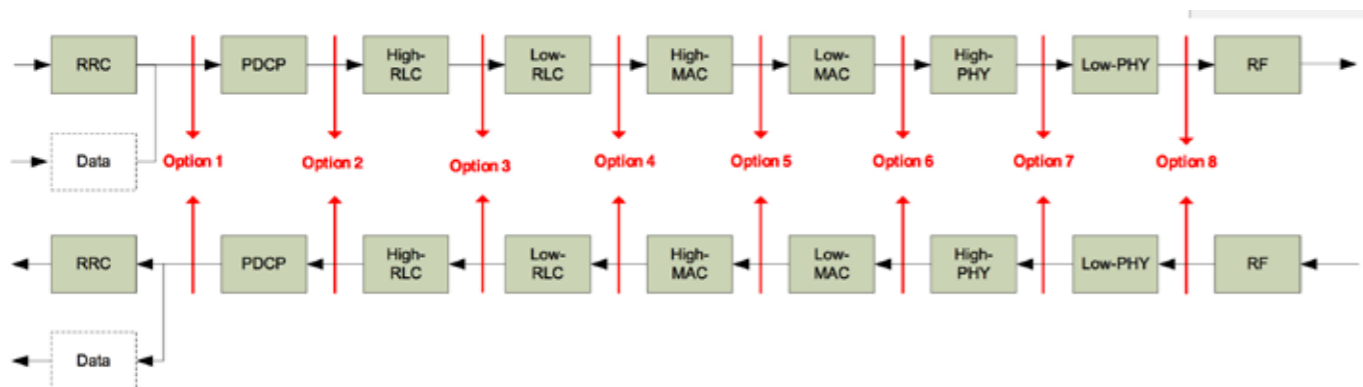
L'eNB in LTE e il gNB per il 5G NR (New Radio) possono essere progettati separando il protocol stack radio a diversi livelli. Una parte del protocol stack può quindi risiedere nella DU (Distributed Unit) vicino all'antenna e la parte rimanente può essere installata nella CU (Centralized Unit). Le varie opzioni di split discusse in 3GPP sono riportate nella Figura E.

Tra le varie opzioni la 2 è stata selezionata in 3GPP, indicata come HLS (Higher-Layer Split). L'option 7, anche indicata come LLS (Lower-Layer Split) è in fase di studio in 3GPP. L'opzione 2 è molto simile all'architettura vRAN progettata da AltioStar e permette di rilassare i requisiti sul trasporto pur mantenendo il supporto delle funzionalità previste da LTE-Advanced. In particolare AltioStar ha progettato una soluzione che permette all'operatore di realizzare il trasporto del fronthaul su connessioni ethernet o IP, riutilizzando la rete di trasporto del backhauling, sperimentata anche da TIM nell'ambito del trial in campo a Saluzzo (Figura F).

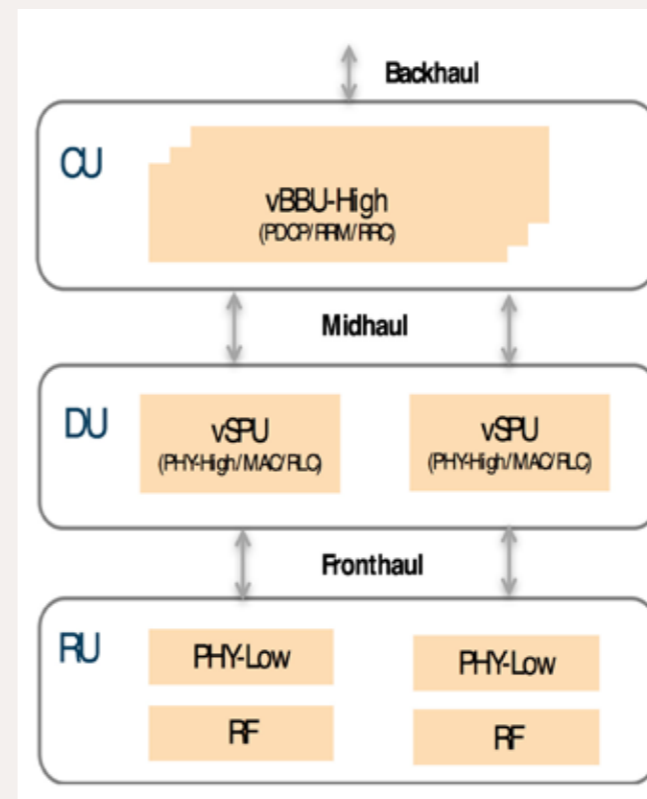
Questa opzione sarà possibile anche per il sistema 5G NR. La capacità di processing dei livelli più bassi del protocol stack aumenta notevolmente nel caso del 5G NR, soprattutto per le frequenze elevate (mmWave) a causa dell'elevata occupazione di banda del segnale generato in questa gamma di frequenza (si pensa a valori da 800MHz fino a 2 GHz nelle gamme 28 GHz e 39 GHz). A tal fine si pensa che l'aggregazione dell'hardware relativo a tali livelli può essere vantaggioso nei prodotti 5G NR che supportano tali frequenze. Per tale ragione AltioStar sta considerando anche l'opzione 7 per l'evoluzione del sistema verso il 5G. Una possibile architettura 5G che fa utilizzo di entrambi gli split in discussione in 3GPP (l'opzione 2 e l'opzione 7) è riportata nella Figura F. L'utilizzo di entrambi gli split permette di virtualizzare gran parte del protocol stack previsto per la nuova interfaccia 5G.

Da un lato l'opzione HLS ha come vantaggi un'elevata scalabilità, affidabilità e requisiti del trasporto del cosiddetto midhaul rilassati. L'opzione LLS, che permette l'aggregazione dei livelli più bassi utilizzando connessioni Ethernet o IP per il fronthaul, permette di ridurre i requisiti di banda tramite la compressione del segnale nel dominio della frequenza, un'implementazione semplificata della RU e della DU e il pooling del livello fisico nella

**E** Opzioni discusse in 3GPP per lo split funzionale tra Distributed Unit e Centralized Unit



**F** Il collegamento via OPM (Optical Packet Metro di Telecom Italia) tra unità remote (posizionate in prossimità delle antenne nei siti di Saluzzo) ed unità centrale virtualizzata (vBBU: virtual Base Band Unit), installata a Torino Lancia - Fonte TIM



DU in cui possono essere implementati algoritmi di processing evoluti.

È auspicabile che l'evoluzione della RAN per LTE-A e per il 5G si basi su interfacce aperte tra la CU e la DU per aumentare la flessibilità nel dispiegamento e la disponibilità di soluzioni sul mercato. Il lavoro svolto dal 3GPP si sta muovendo in questa direzione e TIM e AltioStar sono attivamente coinvolte in queste attività ■

Kuntal Chowdhury  
kc@altioStar.com  
Marco Gaggini  
mgaggini@altioStar.com



# INTERNET OF THINGS 5G: LE ATTIVITA' DI HUAWEI

Le reti 2G, 3G e 4G sono state incentrate principalmente su servizi dedicati alle persone, ma l'avvento di 5G renderà necessario progettare la rete mobile considerando protagonisti sia le persone, sia le 'cose'. Per questo motivo, è importante definire i principali fattori che caratterizzano le comunicazioni fra gli oggetti che, secondo la visione di Huawei, sono: disponibilità, larghezza di banda, copertura, sensibilità al ritardo (latenza) e risparmio

energetico. Questo modello di valutazione può essere utilizzato per definire gli scenari tipici dell'IoT (*Internet of Things*). Ad esempio, i contatori intelligenti hanno requisiti stringenti per

**H**  
Confronto della robustezza radio tra le diverse tecnologie di telemisura (NB-IOT, GSM, WMBus), eseguito con un banco di prova TIM. Gli schermi verdi corrispondono a contatori ancora funzionanti, mentre quelli rossi corrispondono a contatori fuori copertura. (Fonte: TIM)

## NB-IoT live coverage demo

- Le misure di laboratorio hanno verificato per NB-IoT un guadagno di copertura radio pari a circa +20 dB, in linea con i target 3GPP



copertura (a causa delle sfavorevoli condizioni radio dei luoghi in cui possono essere installati) e per efficienza energetica (in modo da garantire una lunga durata di esercizio senza necessità di intervento), ma hanno un basso requisito di ritardo (le misure possono essere trasmesse ogni tanto). Invece, veicoli collegati alla rete sono molto sensibili al ritardo in quanto devono acquisire dati in tempo reale durante il loro movimento, ma non richiedono un'elevata efficienza energetica potendo sfruttare l'energia disponibile sul mezzo. Infine, sistemi di produzione robotizzati hanno bassi requisiti di efficienza energetica, ma richiedono un'elevata affidabilità e bassissimi ritardi.

Huawei ha identificato l'opportunità del mercato IoT già nel 2014 e, da allora, ha contribuito alla definizione del primo standard specifico per IoT, denominato NB-IoT (*Narrow Band IoT*), che è stato finalizzato nel 2016 dal 3GPP. In parallelo, Huawei ha lanciato diverse iniziative per creare un "ecosistema delle cose". Nel 2014 Huawei ha acquisito una società, Neul, con core business nel M2M (*Machine-to-Machine*) che ha sviluppato i primi chipset NB-IoT; tra il 2015 e il 2016 sono stati poi creati sette Open Labs in collaborazione con operatori leader globali in diverse aree e, contestualmente, sono state siglate più di 100 partnership con aziende non appartenenti al settore telecomunicazioni ma interessate ad una convergenza con il mondo mobile. Alcune di queste azioni hanno anche coinvolto direttamente l'Italia: ad esempio Huawei ha supportato TIM nel lancio del NB-IoT Open Lab di Torino (novembre 2016).

Le principali caratteristiche introdotte con NB-IoT sono: estensione della copertura per una profonda copertura indoor, maggiore durata della batteria del dispositivo, alta densità di collegamenti (da intendersi come numero di dispositivi collegati per  $\text{km}^2$ ). La seguente figura mostra, a titolo di esempio, il miglioramento di copertura (sia rispetto al GSM che al WM-bus attualmente usate per applicazioni M2M) che consente il collegamento di dispositivi situati in situazioni radio sfavorevoli (ad esempio per contatori intelligenti posizionati nei piani interrati di un edificio). I miglioramenti prestazionali introdotti dalla tecnologia NB-IoT sono in linea con lo scenario identificato da ITU-R come Massive Machine Type Communication. In questo scenario, serve un'alta densità di collegamenti per supportare un enorme numero di dispositivi in rete che deve trasmettere solo occasionalmente, a basso bit rate e con mobilità assente o molto limitata. Un dispositivo a basso costo con lunga durata di vita operativa è di

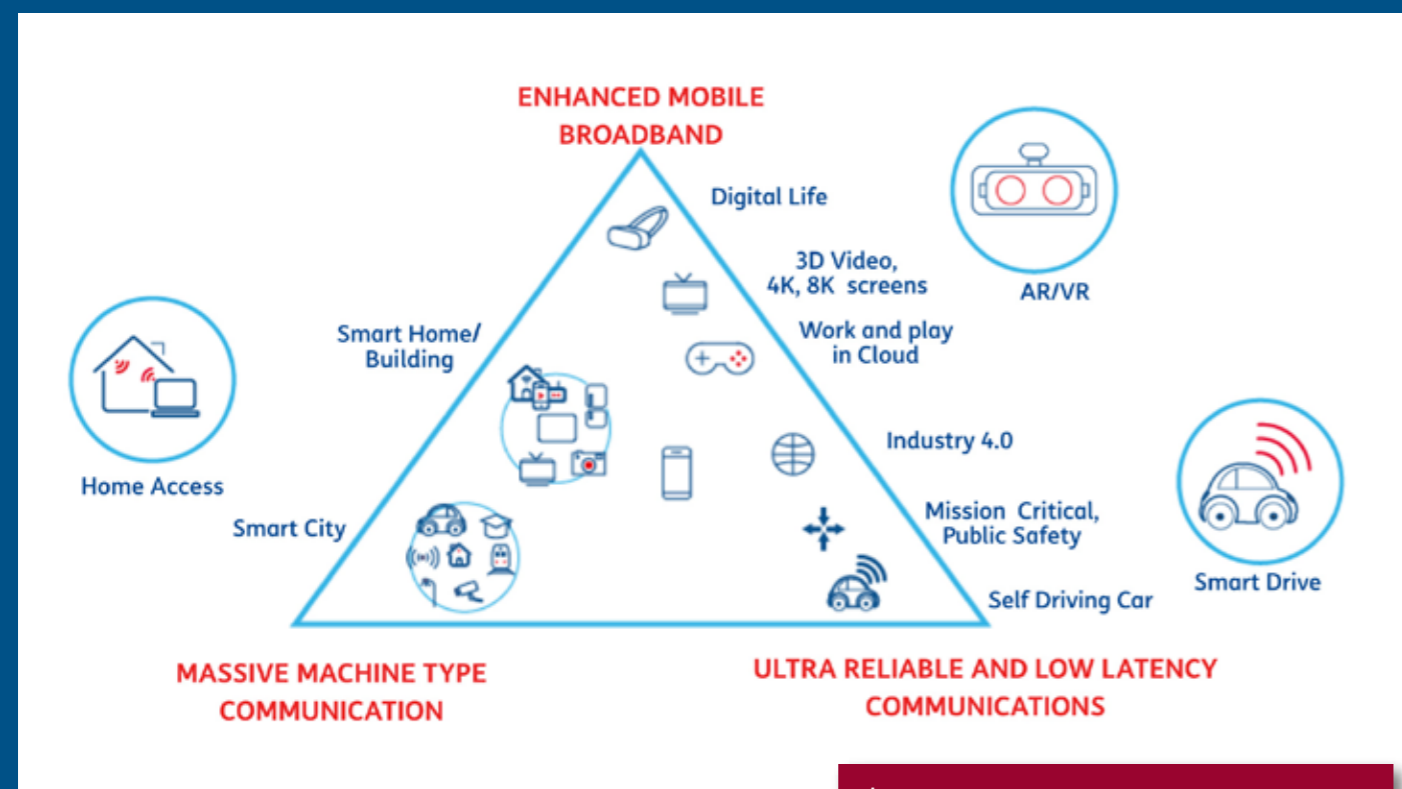
vitale importanza per questo scenario<sup>1</sup>. ITU-R ha individuato tre scenari d'uso: mMTC (*Massive Machine Type Communication*), eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*), uRLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communication*). Due di questi in particolare sono i pilastri fondamentali per l'IoT: mMTC, che sostanzialmente corrisponde alle tipiche applicazioni NB-IoT, e uRLLC, che può indirizzare, ad esempio, applicazioni incentrate sull'uso di robot, droni e veicoli.

Nell'ambito uRLLC l'Internet delle cose coinvolgerà funzionalità chiave relative a scenari dove la bassa latenza è di massima importanza, ad esempio applicazioni ad alto rischio dove i robot potranno sostituire l'uomo. Tale funzionalità sarà necessaria anche in alcuni scenari ad alta mobilità, come ad esempio per la sicurezza del trasporto. I miglioramenti delle prestazioni di affidabilità e latenza consentiranno infatti applicazioni come la guida a distanza: fondamentale in tale contesto una connessione sufficientemente veloce per ricevere tempestivamente e in modo altamente affidabile informazioni dalla rete, che si traducano in comandi da attuare molto rapidamente. Per altre applicazioni, invece, come ad esempio il "see-through" tra veicoli o la realtà aumentata, si richiederà anche un'elevato throughput associato a funzionalità di mobilità. Siamo nell'ambito dello scenario eMBB<sup>2</sup>.

Per rendere tangibili le potenzialità dell'IoT in un contesto interessante per un ampio pubblico, durante l'ultimo Mobile World Congress, sulla pista del circuito di Barcellona, è stata svolta da Huawei una dimostrazione dal vivo delle tecnologie cellulari sviluppate nell'ambito dell'iniziativa 5GVIA: passeggeri in un veicolo, dotato di tecnologia C-V2X, hanno potuto sperimentare come il collegamento in rete fra veicoli migliori la sicurezza e l'esperienza di guida. Le funzionalità dimostrate comprendevano meccanismi di allarme attivati quando altri veicoli improvvisamente frenano o cambiano corsia, o quando pedoni attraversano inaspettatamente la strada, o, ancora, quando i semafori stanno per cambiare di stato. Un video 'see-through' da altri veicoli forniva visibilità su quanto stesse accadendo a diverse macchine di distanza. Il trial con tali funzionalità ha dimostrato come una

Continua →

← Segue



scenari di utilizzo di IMT per il 2020 e oltre

connessione affidabile e a bassissima latenza, basata su 5G V2X tra veicoli e rete, riduca al minimo il rischio di collisioni.

In ultimo, è importante ricordare l'iniziativa "X-Labs", lanciata da Huawei con l'obiettivo di favorire la creazione di un ecosistema 5G in cui indagare le future applicazioni dell'internet delle cose insieme a operatori e imprese operanti in segmenti di mer-

cato verticali. Nell'ambito di tale iniziativa ogni partner è invitato a partecipare al co-design di servizi 5G ■

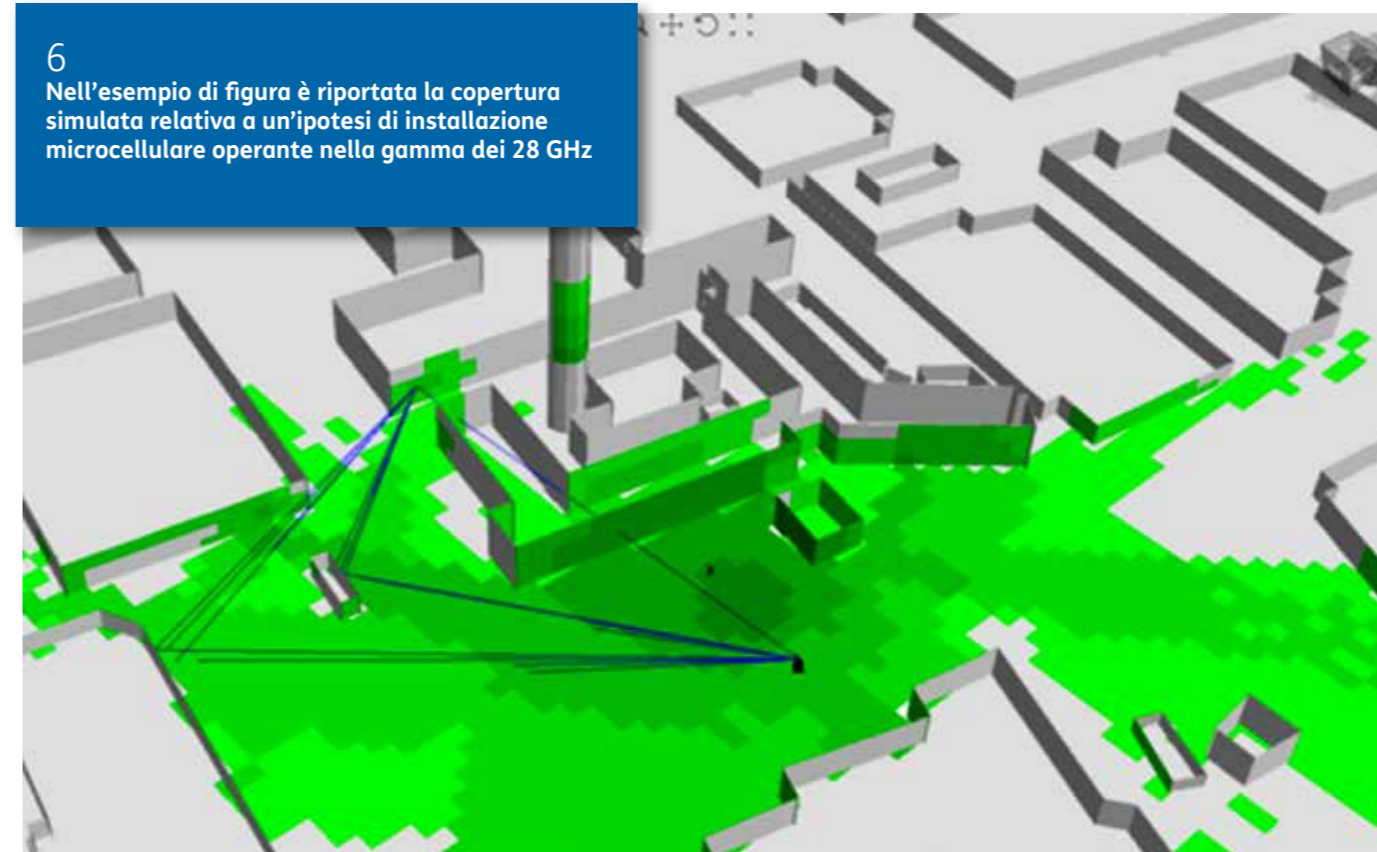
Fabio Moresi  
fabio.moresi@huawei.com

## Note

[1] Si veda Rec. ITU-R M.2083, "IMT Vision".

[2] Ulteriori informazioni sulle applicazioni di veicoli connessi sono disponibili sul white paper:  
<http://www.huawei.com/minisite/hwmbbf16/insights/HUAWEI-WHITEPAPER-CONNECTION-CARS-Final.pdf>

6  
Nell'esempio di figura è riportata la copertura simulata relativa a un'ipotesi di installazione microcellulare operante nella gamma dei 28 GHz



L'impiego di tali modelli permetterà di progettare al meglio il sistema, in relazione alle tecnologie abilitanti 5G, controllando ad esempio la generazione dei fasci di antenna in funzione del traffico.

## Conclusioni

La trasformazione dell'accesso radio verso il 5G, in TIM, è già iniziata. Tale trasformazione non corrisponde solo ad un aumento della velocità di connessione, verso il Gbit/s ed oltre, ma costruisce, già nel presente, le basi per nuovo eco-sistema di servizi in gra-

do di migliorare la digital life dei cittadini e contribuire allo sviluppo economico complessivo della società. L'estensione all'"internet delle cose" determinerà un'eterogeneità di requisiti in termini di velocità di connessione, latenza, affidabilità, richiedendo un'interfaccia radio flessibile, dinamicamente riconfigurabile, gestita con elevati livelli di automazione, aperta al continuo sviluppo di applicazioni e moduli software, all'interno del paradigma NFV (Network Function Virtualization), costituita dall'evoluzione di LTE-Advanced e dall'introduzione della New Radio, anche nell'ottica dell'utilizzo di nuove gamme frequenziali ■

## Bibliografia

- [1] METIS Deliverable D1.1., "Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system"  
[https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_D1.1\\_v1.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.1_v1.pdf)
- [2] METIS Deliverable D6.6, "Final report on the METIS system concept and technology roadmap"  
[https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_D6.6\\_v1.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D6.6_v1.pdf)
- [3] METIS-II D2.1 deliverable, "Performance evaluation framework",  
[https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/deliverables/METIS-II\\_D2.1\\_v1.0.pdf](https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/deliverables/METIS-II_D2.1_v1.0.pdf)
- [4] NGMN 5G White Paper, [https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN\\_5G\\_White\\_Paper\\_V1\\_0.pdf](https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf)
- [5] iJOIN deliverable D2.2, "PHY layer approaches applicable to RANaaS and holistic design of backhaul and access network" <http://www.ict-ijoin.eu/wp-content/uploads/2012/10/D2.2.pdf>
- [6] <https://www.ibm.com/blogs/research/2017/02/presented-today-at-ieee-conference-making-5g-a-reality/>



**Andrea Calvi** [andrea.calvi@telecomitalia.it](mailto:andrea.calvi@telecomitalia.it)

ingegnere elettronico, in Azienda dal 1994 è attualmente responsabile della funzione di Fixed & Wireless Innovation Network all'interno di Technology.

La responsabilità del team gestito è quella di assicurare la disponibilità nel medio termine delle reti ottiche, in ponte radio e delle reti IP per i servizi fissi e mobili attuali e per l'evoluzione ultrabroadband NGAN ed LTE.

Nella ventennale esperienza in TIM, si è occupato di diversi aspetti di rete, tra cui ricerca e standard (ETSI e 3GPP) in ambito reti mobili, innovazione della telefonia multimediale SIP-based (IMS), indirizzo tecnologico delle consociate TIM in Europa, responsabilità della ingegneria ed innovazione della rete mobile TIM, ingegneria ed innovazione dei modem-router DSL domestici e terminali mobili ■



**Paolo Gianola** [paolo.gianola@telecomitalia.it](mailto:paolo.gianola@telecomitalia.it)

ingegnere elettronico, in Azienda dal 1992 è attualmente responsabile della funzione di Wireless Innovation Network all'interno di Technology. Negli anni precedenti si è occupato della progettazione e della qualificazione di antenne e di sistemi radio; è stato dal 1997 al 2002 responsabile delle attività di qualificazione tecnica dei sistemi radianti per le reti GSM/UMTS. Ha ricoperto il ruolo di responsabile anche per la progettazione elettromagnetica dei siti di antenna, oltre che essere stato l'ideatore e il responsabile dello sviluppo di soluzioni Radio Over Fibre e Reconfigurable Antennas ■



**Michele Ludovico** [michele.ludovico@telecomitalia.it](mailto:michele.ludovico@telecomitalia.it)

ingegnere elettronico, in Azienda dal 1999, dal 2014 è responsabile della funzione di Technology denominata Radio Propagation and Self Organizing Network. Dal 2001 si occupa di strumenti e metodologie di progettazione ed ottimizzazione dell'accesso radio, che TIM sviluppa "in house" a supporto dell'evoluzione della rete mobile. Ha svolto, inoltre, attività di formazione e consulenza in Italia ed all'estero ed è co-inventore di diversi brevetti nel campo della progettazione wireless e della gestione delle risorse radio ■



**Maurizio Marcelli** [maurizio.marcelli@telecomitalia.it](mailto:maurizio.marcelli@telecomitalia.it)

lauree in Ingegneria Elettronica ed in Economia e Gestione di Impresa, in Azienda dal 1994 è attualmente responsabile della funzione di Mobile Access all'interno di Technology.

La responsabilità attuale è quella di assicurare il presidio delle tecnologie mobili a supporto del business di TIM, ed il loro dispiegamento articolato in linea con gli obiettivi strategici aziendali.

Il percorso professionale in TIM, oltre ad una ampia esperienza in ambito Technology, focalizzata sia sul mondo dell'accesso che su quello delle piattaforme a supporto dei servizi, come ad esempio nel caso del lancio della prima Mobile Tv di TIM, lo ha anche visto ricoprire ruoli di responsabilità in area Mercato Consumer con la responsabilità dello sviluppo VAS, successivamente in area Strategy ed in area Business Innovation, partecipando anche al kick off dei servizi video in ambito Broadband Content, oggi ridenominata Multimedia Entertainment ■