



Istituto Superiore di Sanità



Ministero della Salute
Centro nazionale per la
prevenzione e il controllo
delle malattie

Salute e campi
elettromagnetici



Pontecchio Marconi (BO)
31 Marzo 2009

In collaborazione con
ELETTRA 2000 e ARPA Emilia Romagna



Sorgenti per comunicazione mobile e modalità di esposizione

Daniele Andreuccetti
IFAC-CNR, Firenze

I servizi di telecomunicazione numerica

ZigBee

UWB

GSM

PCN

DCS

Bluetooth

UMTS

Wi-Fi

Wi-Max

LTE

DVB-T

DVB-S

DVB-H

HiperLAN / HiperMAN

DAB

Da cosa dipende il livello di esposizione della popolazione?

- Dalla **frequenza**, poiché i limiti di sicurezza dipendono dalla frequenza
- Dalla **potenza complessiva irradiata dall'antenna**, ovvero:
 - dalla potenza in uscita al generatore;
 - dalle perdite del cavo e dell'antenna stessa.
- Dalle **modalità con cui l'antenna diffonde il segnale nello spazio** circostante.
- Da alcune **caratteristiche del servizio**, ovvero:
 - dalla modalità di accesso multiplo;
 - dalla modalità di comunicazione bidirezionale (*duplex*);
 - dalla presenza di dispositivi di controllo automatico della potenza;
 - altro...

E la modulazione?

GMSK

QPSK

16QAM

BPSK

8-PSK

64QAM

RADIATION RESEARCH 162, 219–225 (2004)
0033-7587/04 \$15.00
© 2004 by Radiation Research Society.
All rights of reproduction in any form reserved.

COMMENTARY

Biological Effects of Radiofrequency Fields: Does Modulation Matter?

Kenneth R. Foster^{a1} and Michael H. Repacholi^b

^a Department of Bioengineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104; and ^b World Health Organization, Geneva, Switzerland

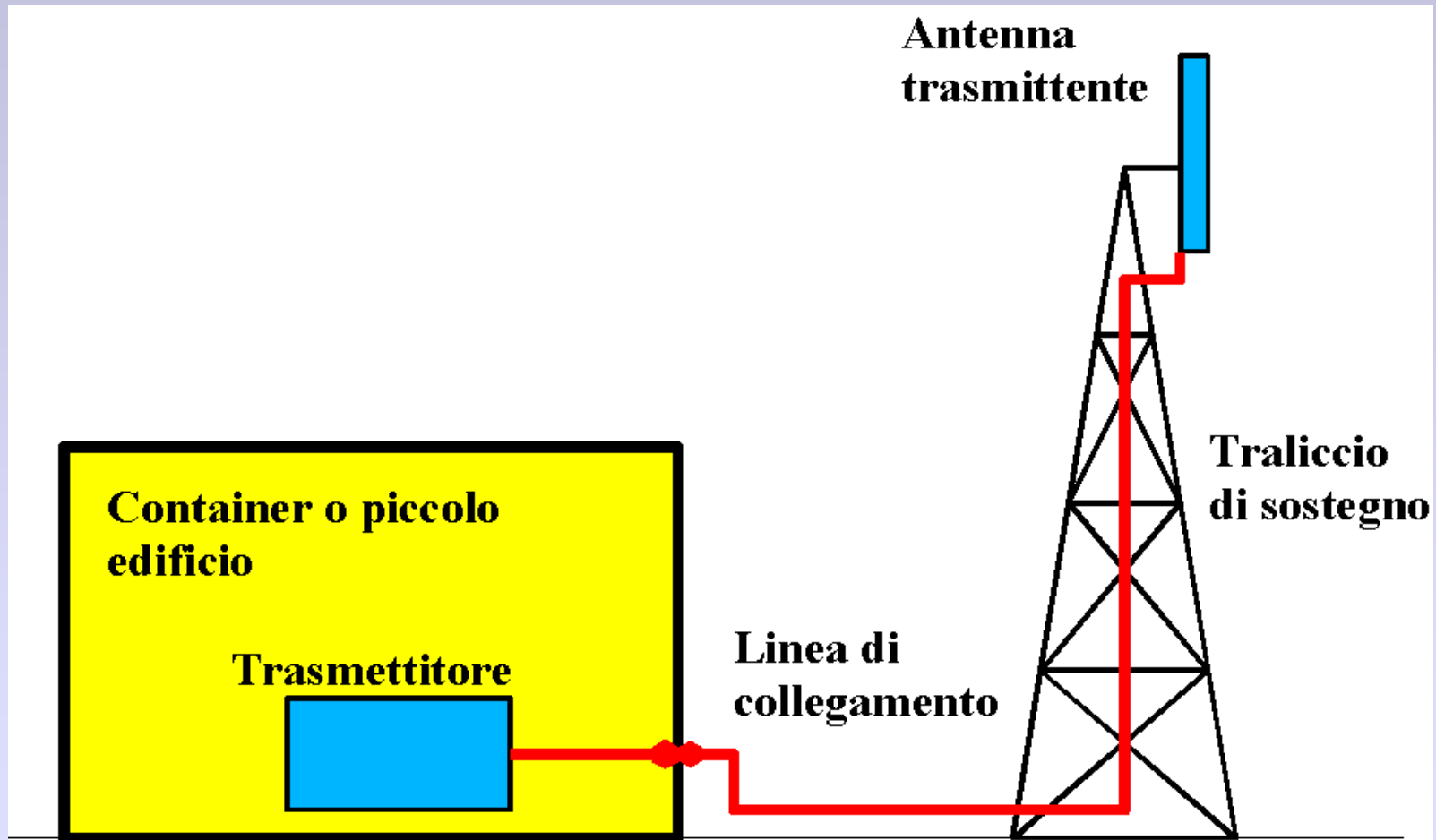
La potenza media
assorbita **NON**
dipende
significativamente
dal tipo di
modulazione

- No established direct-field mechanisms (linear or not) that are capable of producing biologically significant responses (modulation dependent or not) from RF fields of reasonable strength
- Numerous biological effects have been reported from RF fields, some apparently related to modulation.

Frequenza

Servizio	Frequenza [MHz]	Limite italiano esposizioni brevi	Limite italiano esposizioni lunghe	Limite europeo popolazione
GSM	dl: 925 – 960 ul: 880 – 915	20 V/m	6 V/m	41 V/m
DCS	dl: 1805 – 1880 ul: 1710 – 1785	20 V/m	6 V/m	58 V/m
UMTS	dl: 2110 – 2170 ul: 1920 – 1980	20 V/m	6 V/m	61 V/m
Wi-Fi	2400 – 2483.5	20 V/m	6 V/m	61 V/m
Wi-Max	3400 – 3600	40 V/m	6 V/m	61 V/m

Apparati di telecomunicazione



Potenza e diagramma di radiazione: qualche formula

- Radiatore isotropico
- Radiatore reale nella **direzione di massima radiazione**
- Radiatore reale in una direzione qualunque

$$E(r, \vartheta, \varphi) = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{\zeta_0 \cdot P}{\pi}}$$

$$E(r, \vartheta_0, \varphi_0) = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{\zeta_0 \cdot P \cdot G}{\pi}}$$

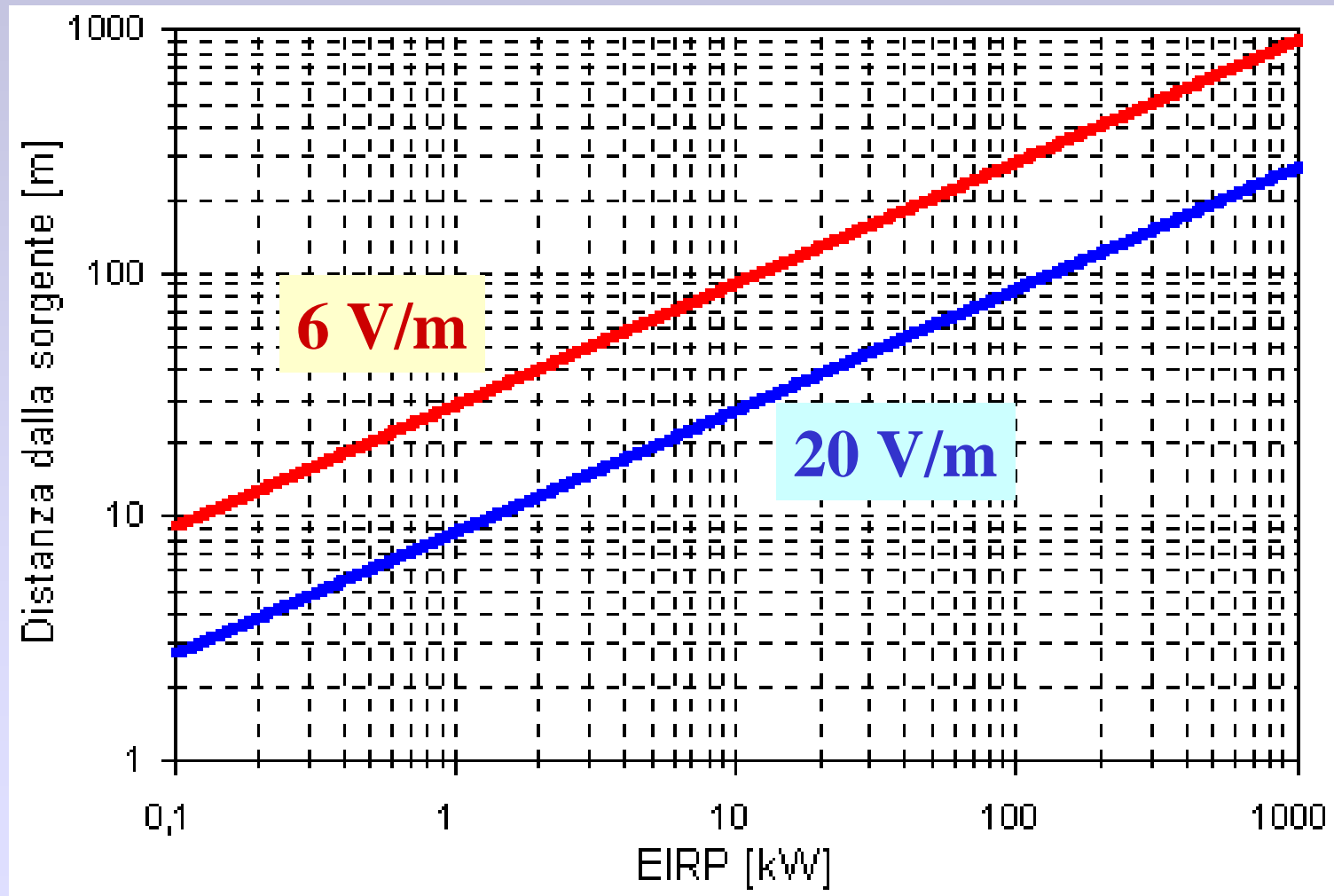
$$E(r, \vartheta, \varphi) = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{\zeta_0 \cdot P \cdot G \cdot D(\vartheta, \varphi)}{\pi}}$$

$$r_{\text{lim}} = \frac{1}{2E_{\text{lim}}} \sqrt{\frac{\zeta_0 \cdot P \cdot G}{\pi}} \approx \frac{1}{E_{\text{lim}}} \sqrt{30 \cdot \text{EIRP}}$$

$$\text{EIRP} = P \cdot G \quad \text{nel vuoto: } \zeta_0 \approx 377\Omega \quad 0 \leq D(\vartheta, \varphi) \leq 1$$

Nota bene: nelle antenne, un elevato guadagno richiede dimensioni grandi rispetto alla lunghezza d'onda!

Apparati per telecomunicazione: distanze limite in funzione della EIRP



La potenza necessaria è imposta dalla distanza che si vuole coprire e a sua volta determina i livelli di campo elettromagnetico nell'ambiente



d



Distanza d	Potenza (*)	Campo E @ 30 m
1 km	0,15 W	0,07 V/m
10 km	15 W	0,7 V/m
100 km	1500 W	7 V/m

() Potenza EIRP minima necessaria per avere un campo di 2 mV/m in aria ovvero un segnale di -70 dBm (eq. a 71 μ V) disponibile al terminale mobile.*

Potenze tipiche

GSM/DCS

UMTS

Wi-Fi

Wi-Max

- 10 W per canale (fino a 6 canali per settore)
- 10 W per canale (fino a 3 canali per settore, ma molto spesso solo 1)
- 100 mW (normativa vincolante perché su frequenza di libero uso)
- 5 W per canale (tipicamente 1 canale per settore)

I terminali mobili o terminali utente

- Non possono utilizzare antenne ad alto guadagno (**eccezione: WiMax**)
 - per motivi di ingombro
 - perché non si può chiedere all'utente di orientare o puntare l'antenna del terminale
- Non utilizzano elevate potenze
 - per contenere ingombro e peso della batteria
 - per aumentare l'autonomia
- Poiché l'utilizzo è in stretta prossimità dell'utente, l'esposizione non è caratterizzata in termini di campo o di densità di potenza, bensì in termini di SAR

GSM/DCS

UMTS

Wi-Fi

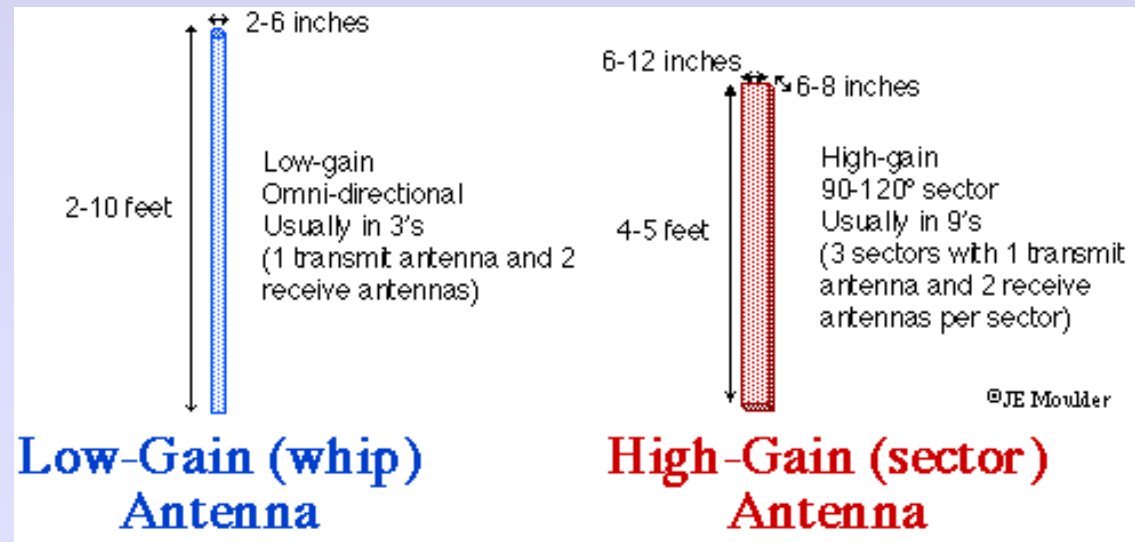
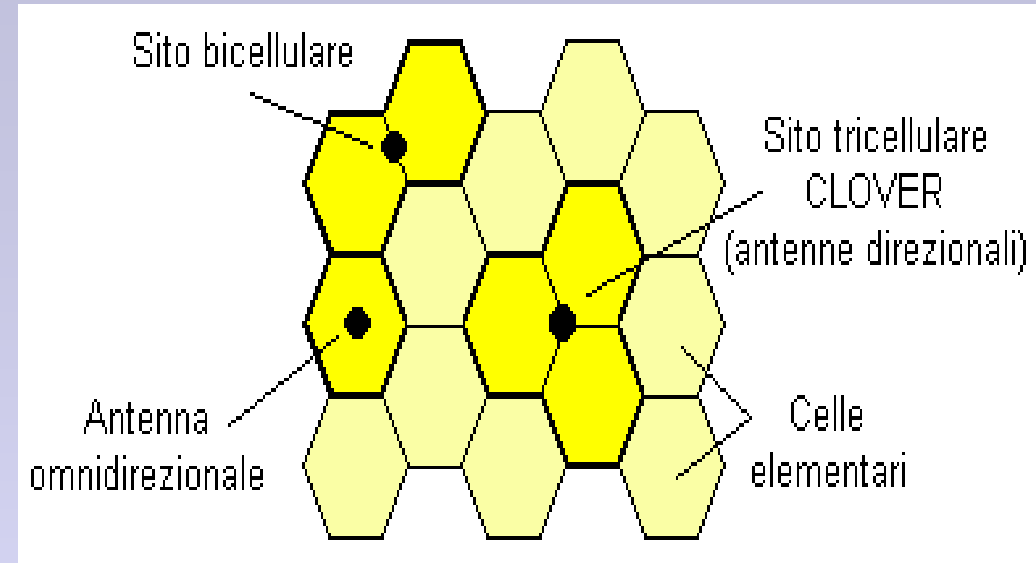
Wi-Max

- Max. 2 W picco (1 W picco per DCS)
- Max. 125 - 250 mW
- 30 mW (100 mW max.)
- 200 mW

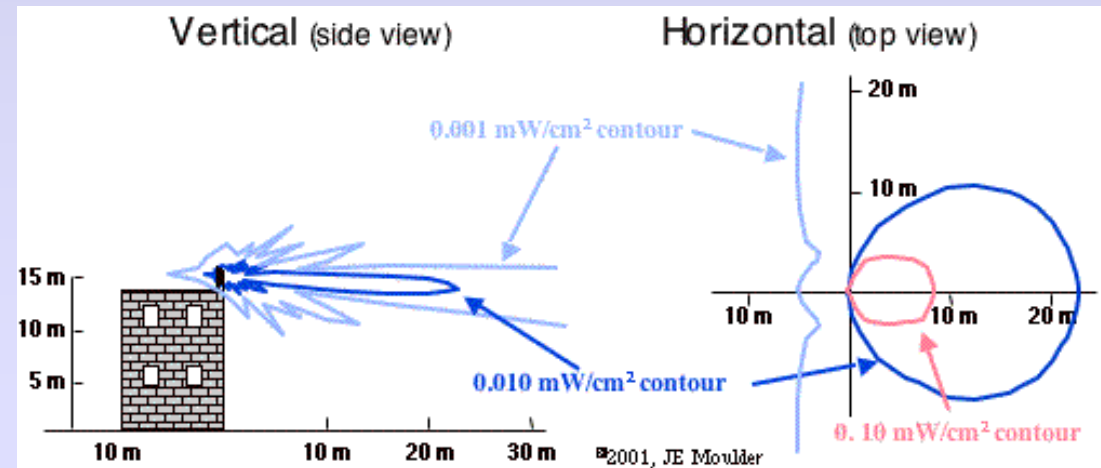
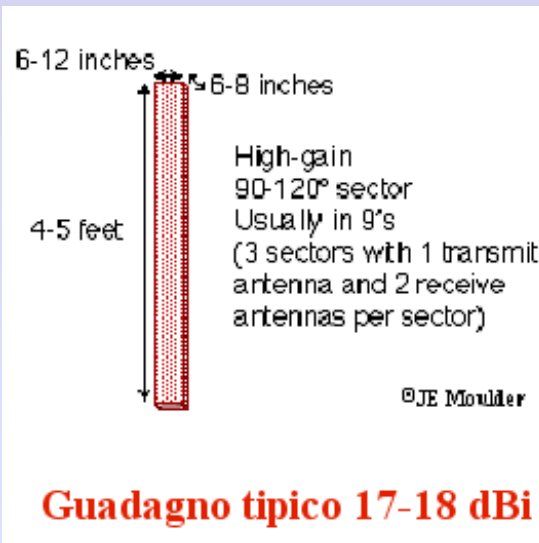
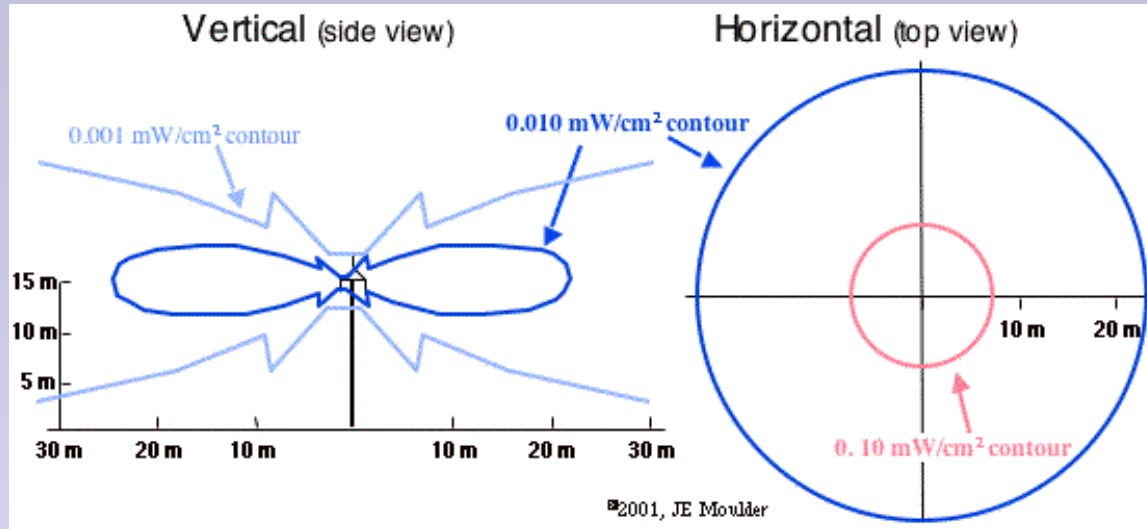
Antenne per telefonia



Config. "Clover"

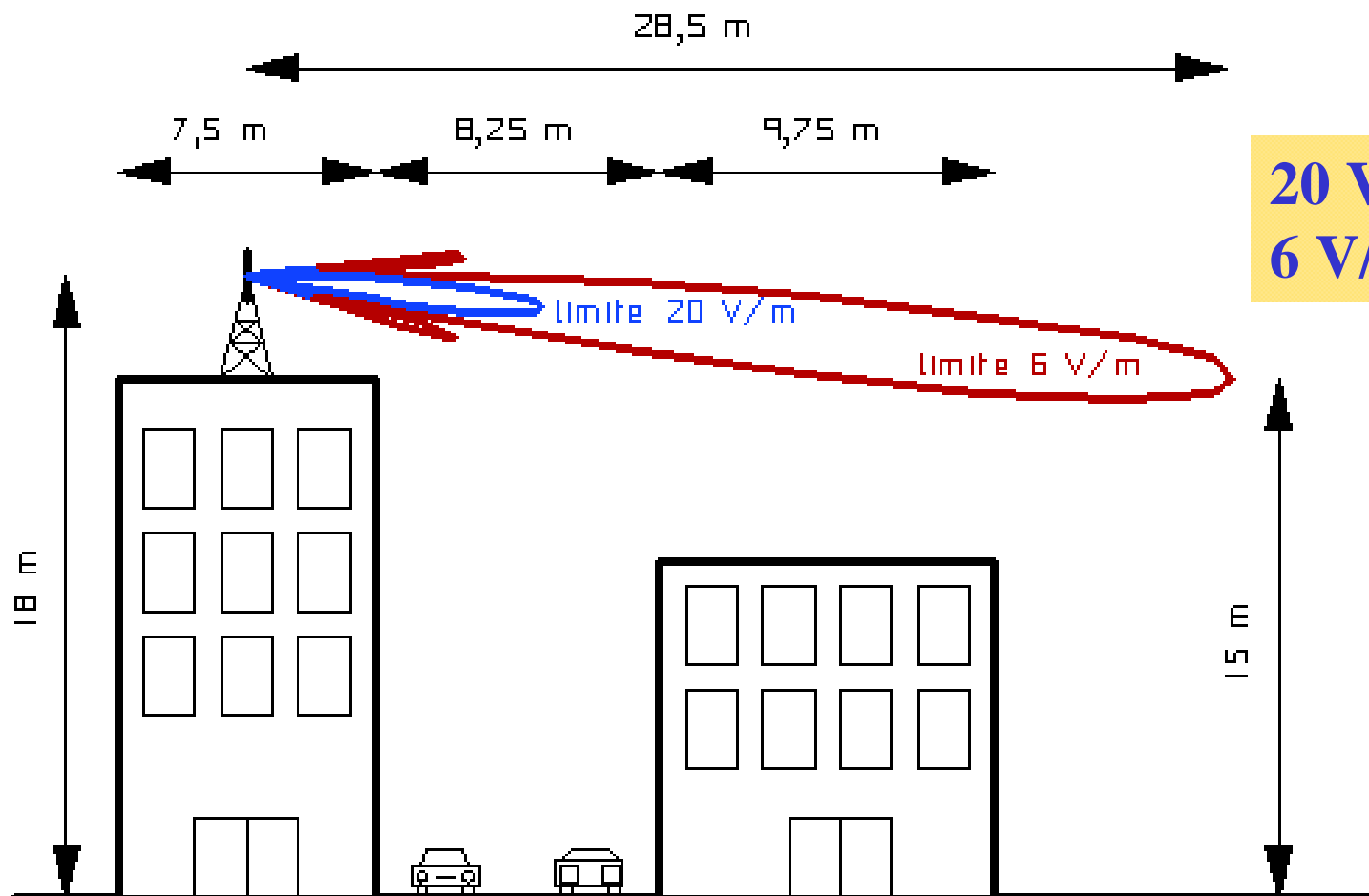


Antenne per telefonia / Wi-Max



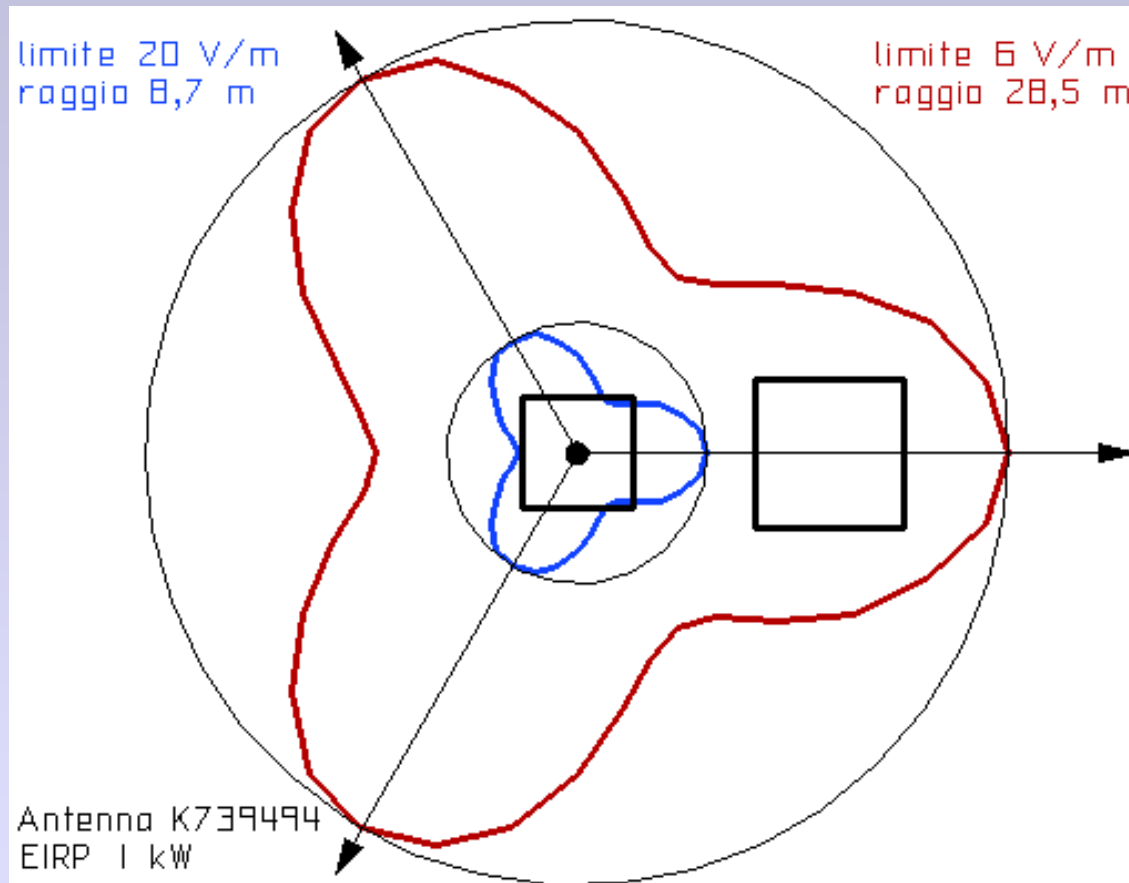
Distribuzione tipica dell'emissione delle stazioni radio base sul piano verticale

Antenna K739494
EIRP 1 kW



20 V/m a 8,7 m
6 V/m a 28,5 m

Distribuzione tipica dell'emissione delle stazioni radio base *clover* sul piano orizzontale



- Guadagno 18 dBi (x63)
- Larghezza fascio a metà potenza sul piano verticale 6,5°
- Tilt verticale 6° verso il basso
- Larghezza fascio a metà potenza sul piano orizzontale 63°
- Potenza in antenna 16 W (EIRP 1 kW)

Accesso multiplo a divisione di frequenza, divisione di tempo, divisione di codice

FDMA

- Ogni **canale** può servire **un solo utente**; più utenti necessitano di più canali.

Ad ogni **canale** corrisponde una **frequenza** diversa e, in genere, ogni canale richiede un proprio modulo **trasmettitore**. Più trasmettitori corrispondenti ai diversi canali di uno stesso sito e di uno stesso gestore possono condividere la stessa antenna.

TDMA

- Una stessa **frequenza** (uno stesso **canale**), viene usata a turno dai vari utenti.
- Molti utenti utilizzano lo stesso **canale** contemporaneamente, distinti in base ad una **codifica numerica**.

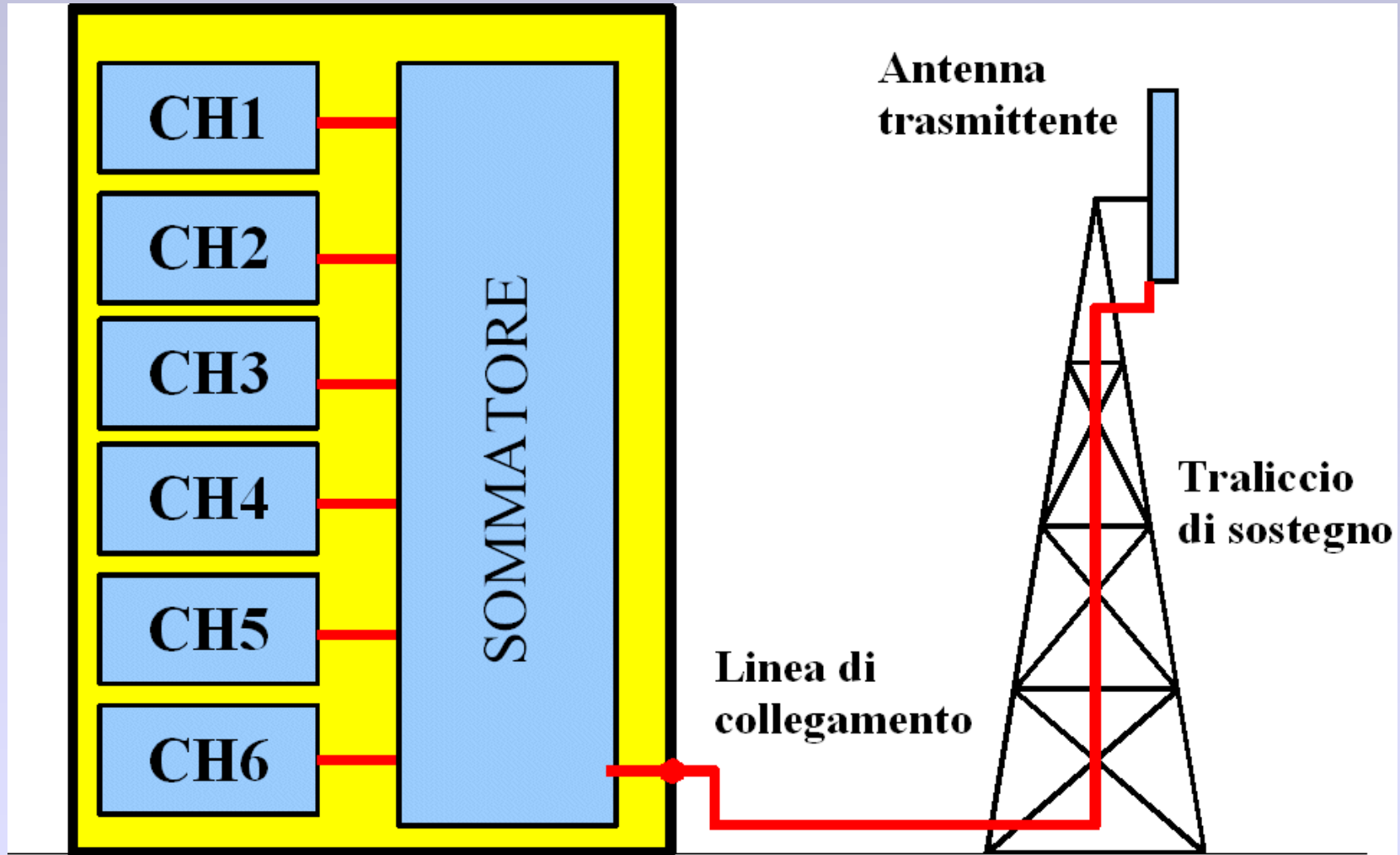
CDMA

OFDMA

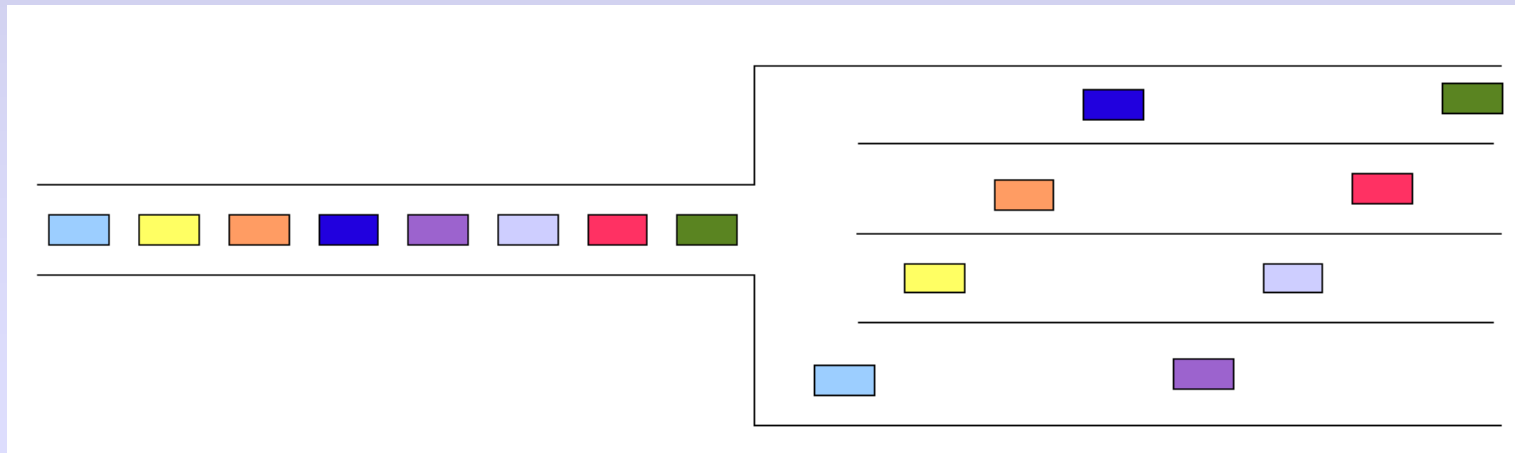
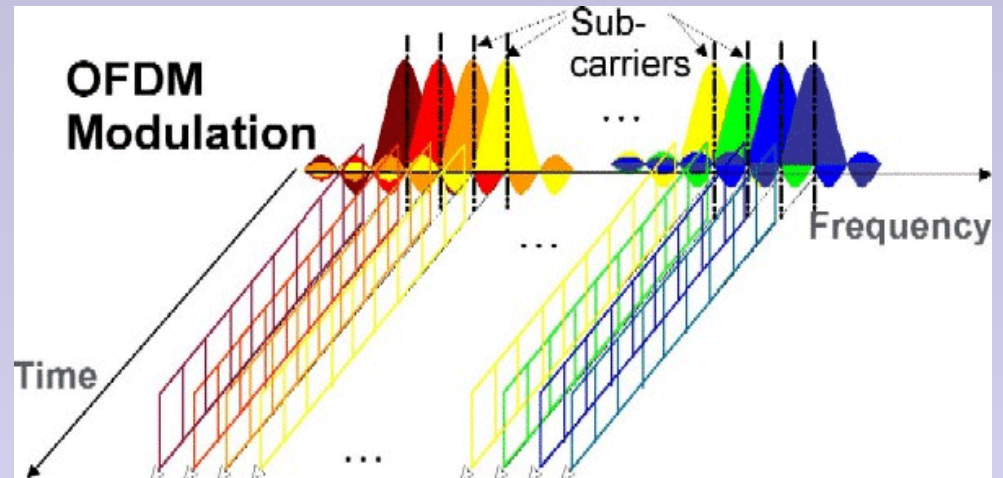
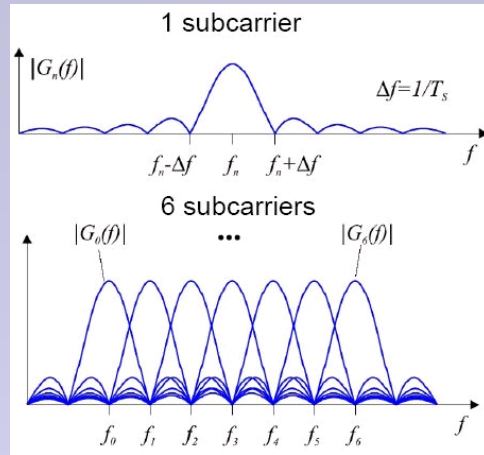
- Nei sistemi che utilizzano la tecnica **OFDM**, è possibile assegnare a **utenti diversi** dei gruppi distinti di **sottoportanti**.

Si possono avere anche combinazioni di più tecniche

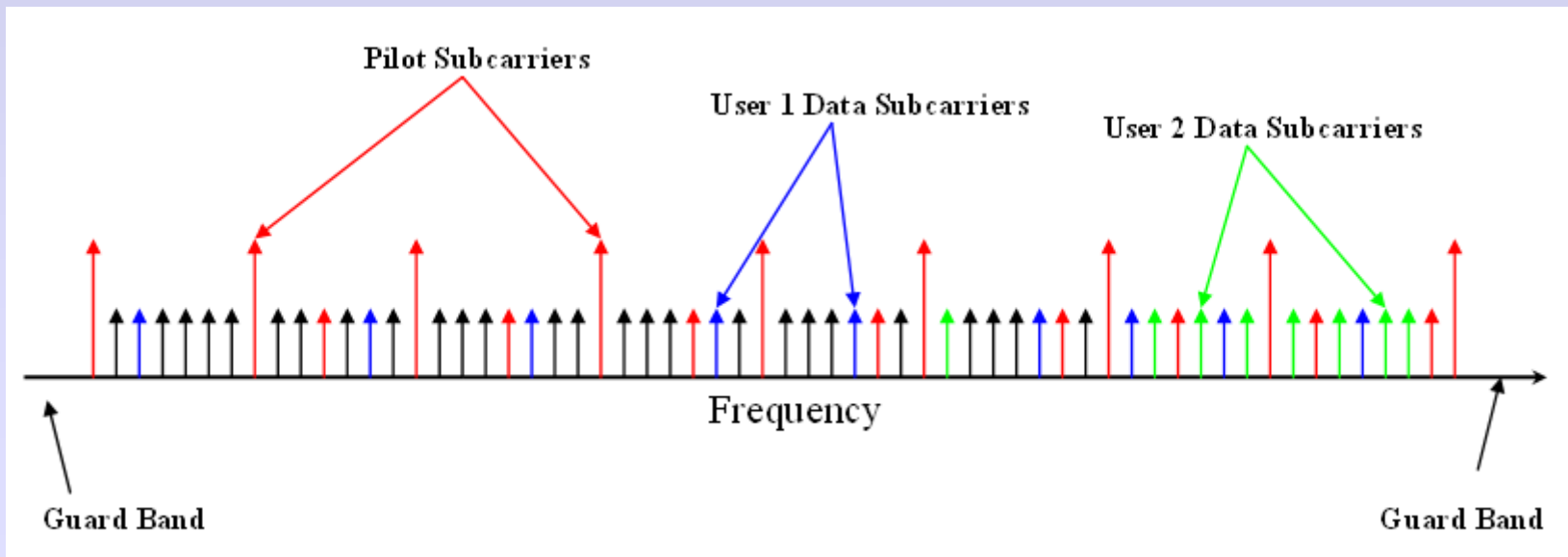
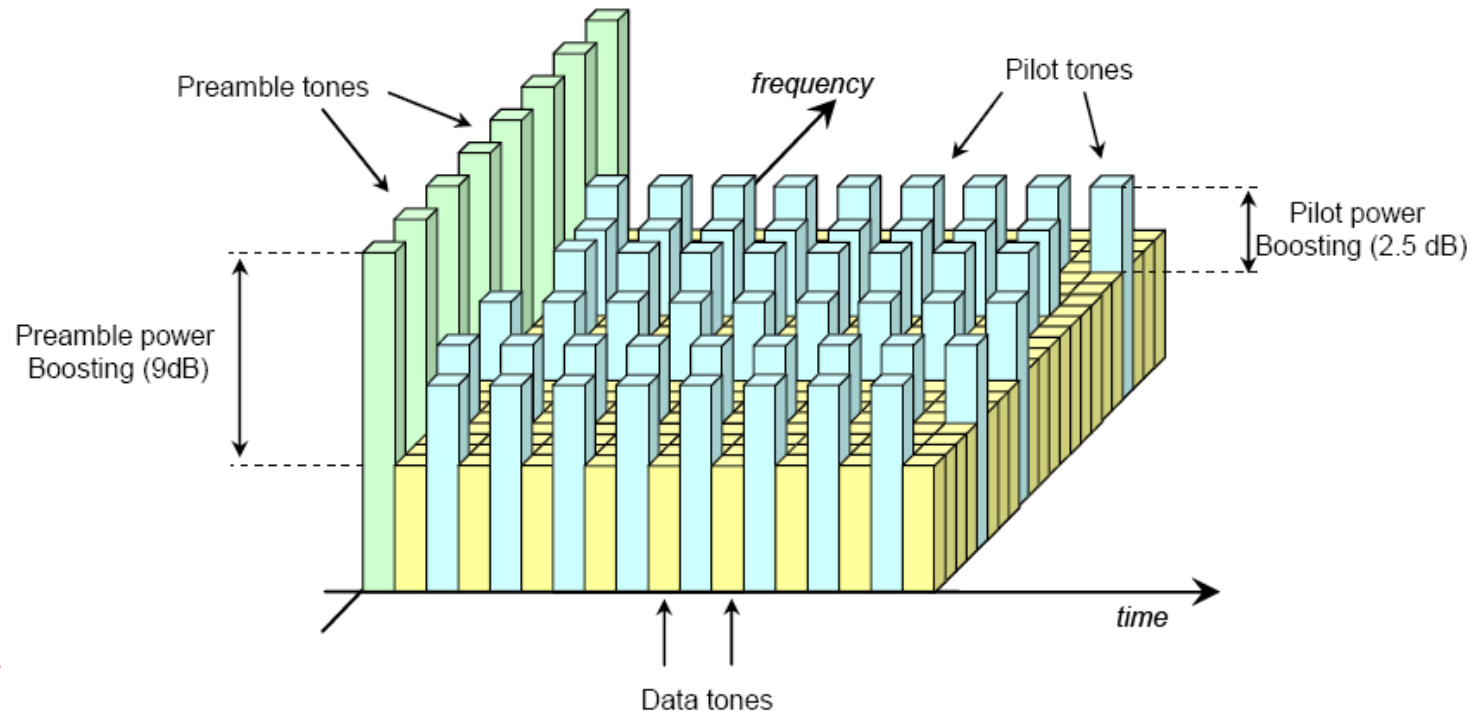
La potenza negli apparati di telecomunicazione



La tecnica OFDM



OFDM e (S)OFDMA



Accesso multiplo

GSM/DCS

- **FDMA + TDMA**

UMTS

- (FDMA +) **CDMA**

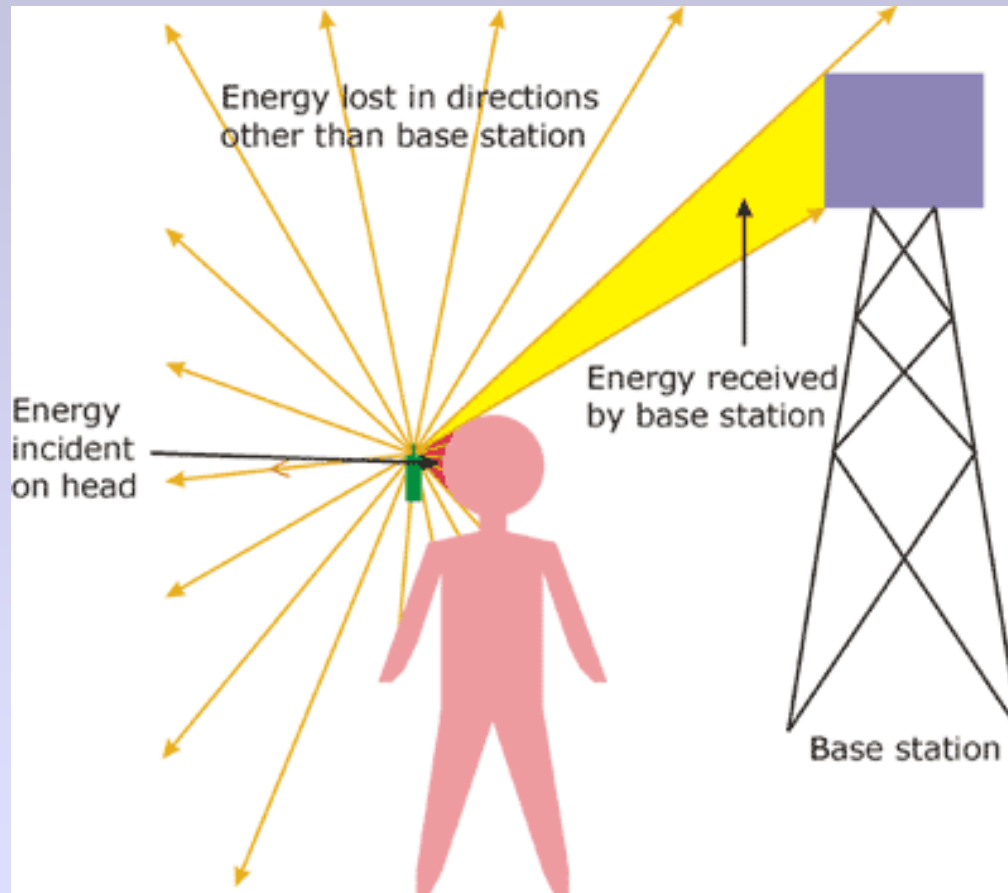
Wi-Fi

- **TDMA (CSMA/CA)**

Wi-Max

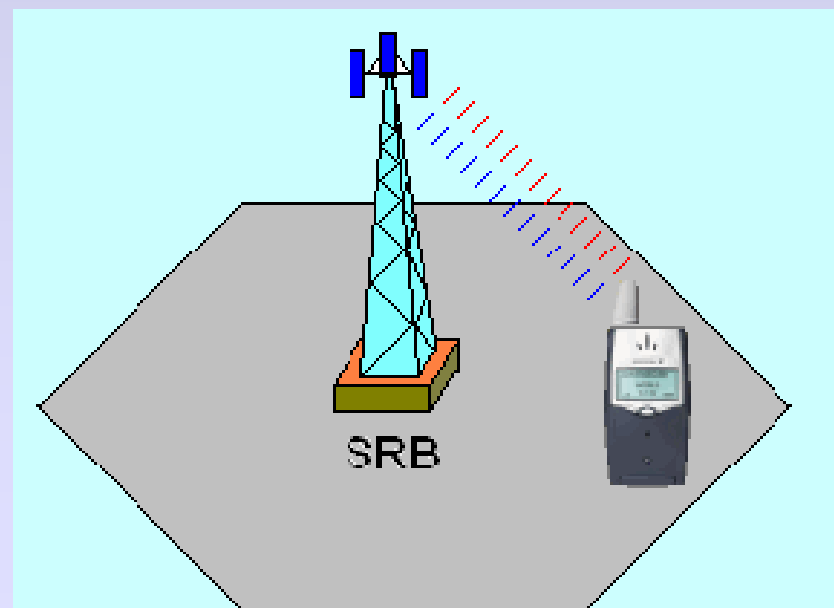
- **TDMA (uplink)**
- **OFDMA** (802.16d “fixed Wi-Max”)
- **SOFDMA** (802.16e “mobile Wi-Max”)

I servizi che consideriamo sono bidirezionali!



Dovremo interrogarci anche su come vengono fatte coesistere le comunicazioni nelle due direzioni (“**gestione duplex**”):

- FDD (Frequency Division Duplex)
- TDD (Time Division Duplex)



Gestione duplex

GSM/DCS

- FDD

UMTS

- FDD

Wi-Fi

- TDD (CSMA/CA)

Wi-Max

- TDD (FDD)



GSM (GSM-900) e DCS (GSM-1800)

- GSM: introdotto sperimentalmente nel 1992, commercialmente nel 1995, è tuttora il sistema più diffuso.
- 174 canali accoppiati FDMA-FDD di 200+200 kHz ciascuno; ogni coppia può supportare fino a 8 conversazioni (TDMA).
- DCS: introdotto nel 1998 per far fronte all'enorme successo del GSM.
- 374 canali con le stesse caratteristiche tecniche del GSM.
- Frequenze di *downlink* (dalla stazione radio base verso il terminale mobile): 925 - 960 MHz; 1805 - 1880 MHz.
- Frequenze di *uplink* (dal terminale mobile verso la stazione radio base): 880 - 915 MHz; 1710 - 1785 MHz.
- Modulazione GMSK (di frequenza a involuppo costante).
- Velocità di trasmissione dati: 9.6 kbit/s (40 kbit/s con GPRS, 200 kbit/s con EDGE).
- Tre operatori nazionali: TIM, Vodafone, Wind

GSM (GSM-900) e DCS (GSM-1800)

- **Stazioni radio base**

- Potenza massima in antenna fino a 300 W circa (ma di solito molto meno)
- Guadagno fino a 70 circa
- EIRP tipica 1-3 kW
- EIRP media: dipende dal servizio e può essere anche molto inferiore (vedi dopo)

- **Terminale mobile**

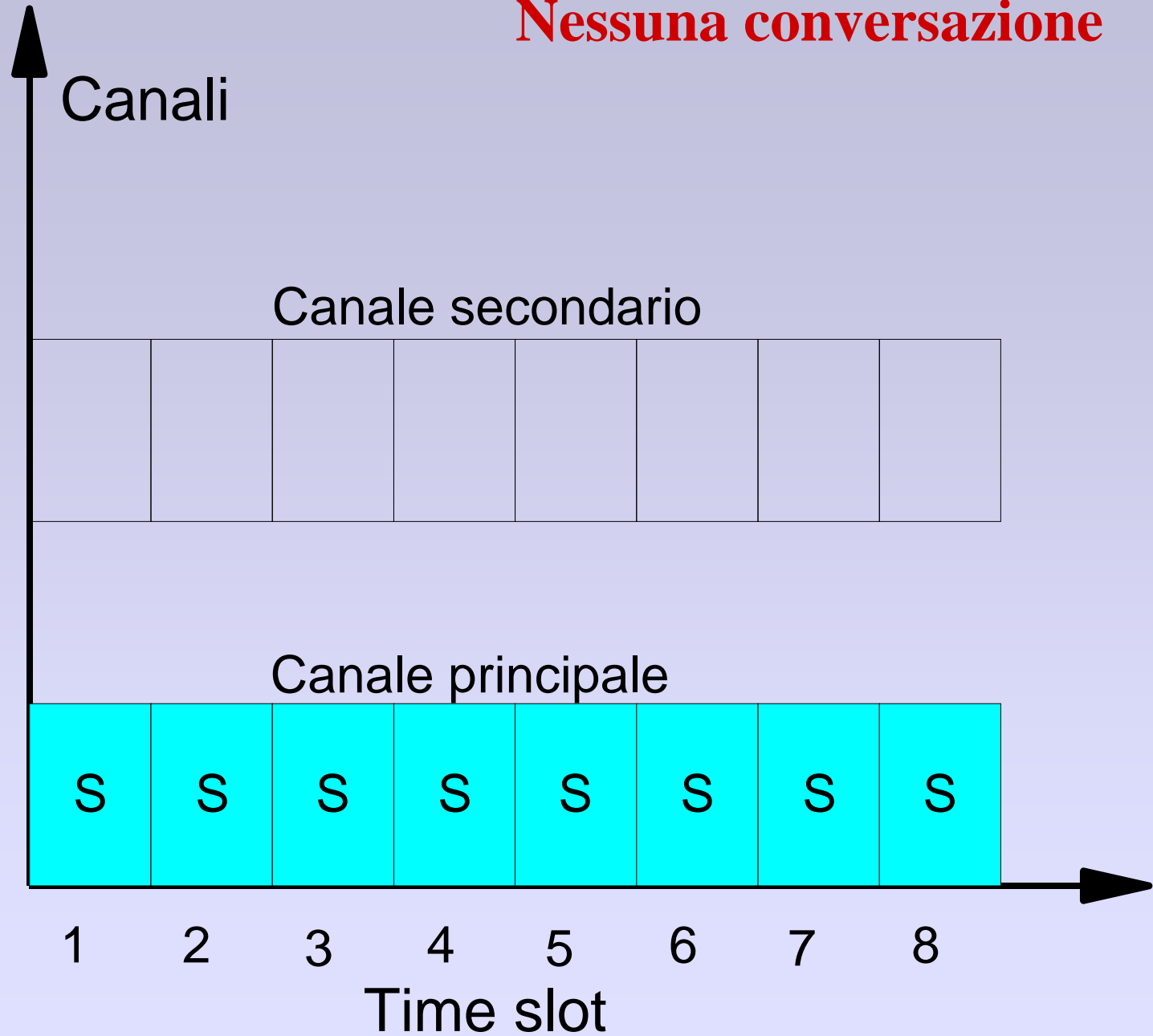
- Potenza massima 2 W di picco, guadagno d'antenna pressoché unitario
- I valori medi sono più bassi di almeno un fattore 8 (TDMA)
- I dispositivi *power control* (PC) e *discontinuous transmission* (DTX) riducono ulteriormente l'emissione media
- Alcune stime indicano che la potenza media è inferiore ai 100 mW anche nei casi peggiori
- Il SAR nella testa provocato dall'esposizione resta al di sotto di 1 W/kg (in alcuni casi *molto* al di sotto) per la maggior parte dei modelli di telefoni cellulari (il valore limite ICNIRP è di 2 W/kg)

GSM: accesso multiplo FDMA+TDMA

- A ciascuna cella viene assegnato un certo numero di **canali** (almeno 1, massimo 6 di solito), ciascuno dei quali utilizza una delle **frequenze** assegnate al gestore ed è diviso in 8 “fette di tempo“ (**time slot**).
- Uno dei canali (**canale base** o BCCH) è sempre in funzione alla massima potenza con tutti i time slot occupati e può ospitare fino a 7 conversazioni simultanee senza aumenti di potenza.
- Se sono richieste ulteriori conversazioni, si attivano (se esistono) i **canali supplementari** (TCH), che possono ospitare fino a 8 conversazioni ciascuno; ad essi si applicano i meccanismi di **controllo dinamico della potenza** e di **trasmissione discontinua**.

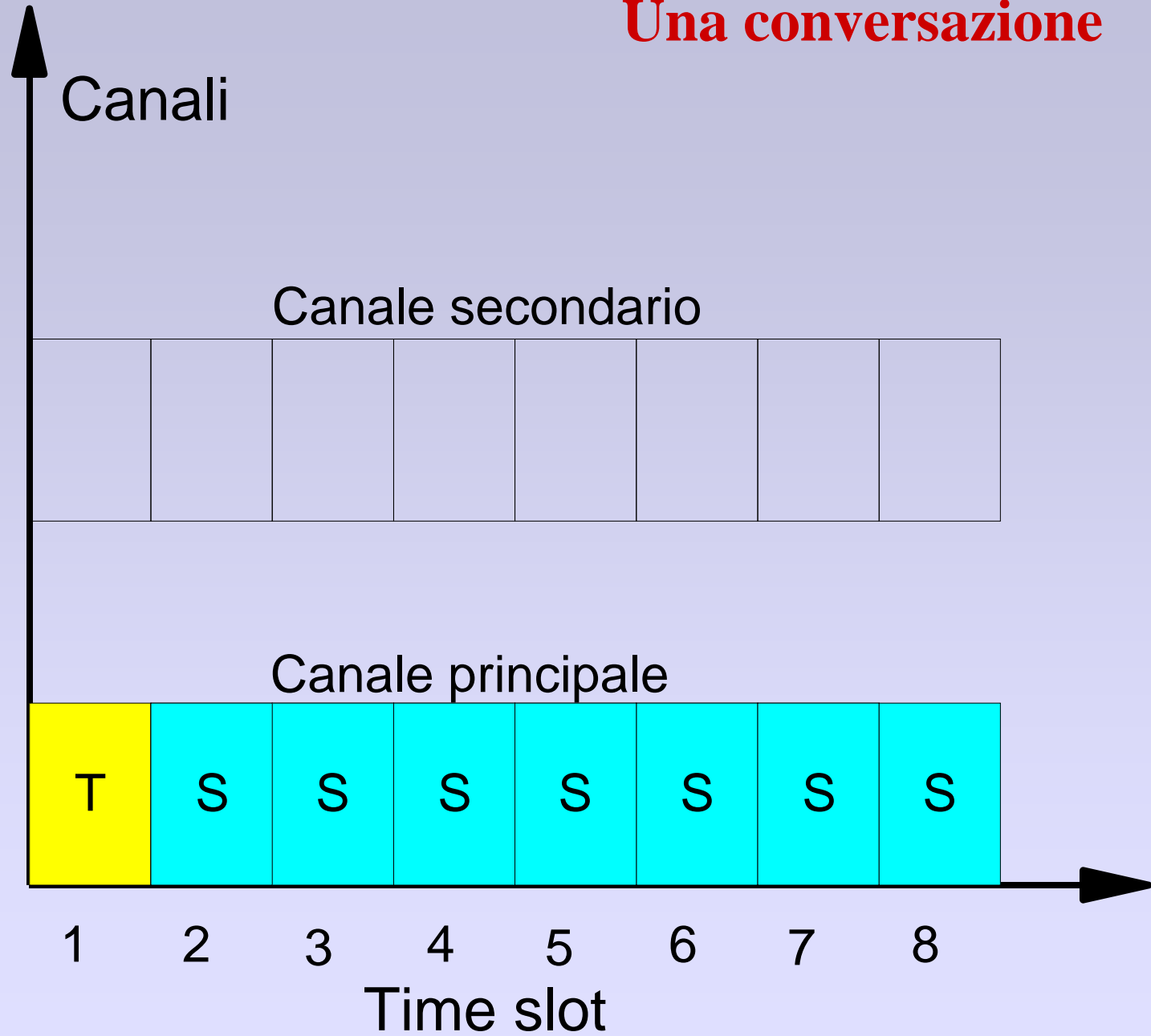
Nessuna conversazione

Livello di esposizione



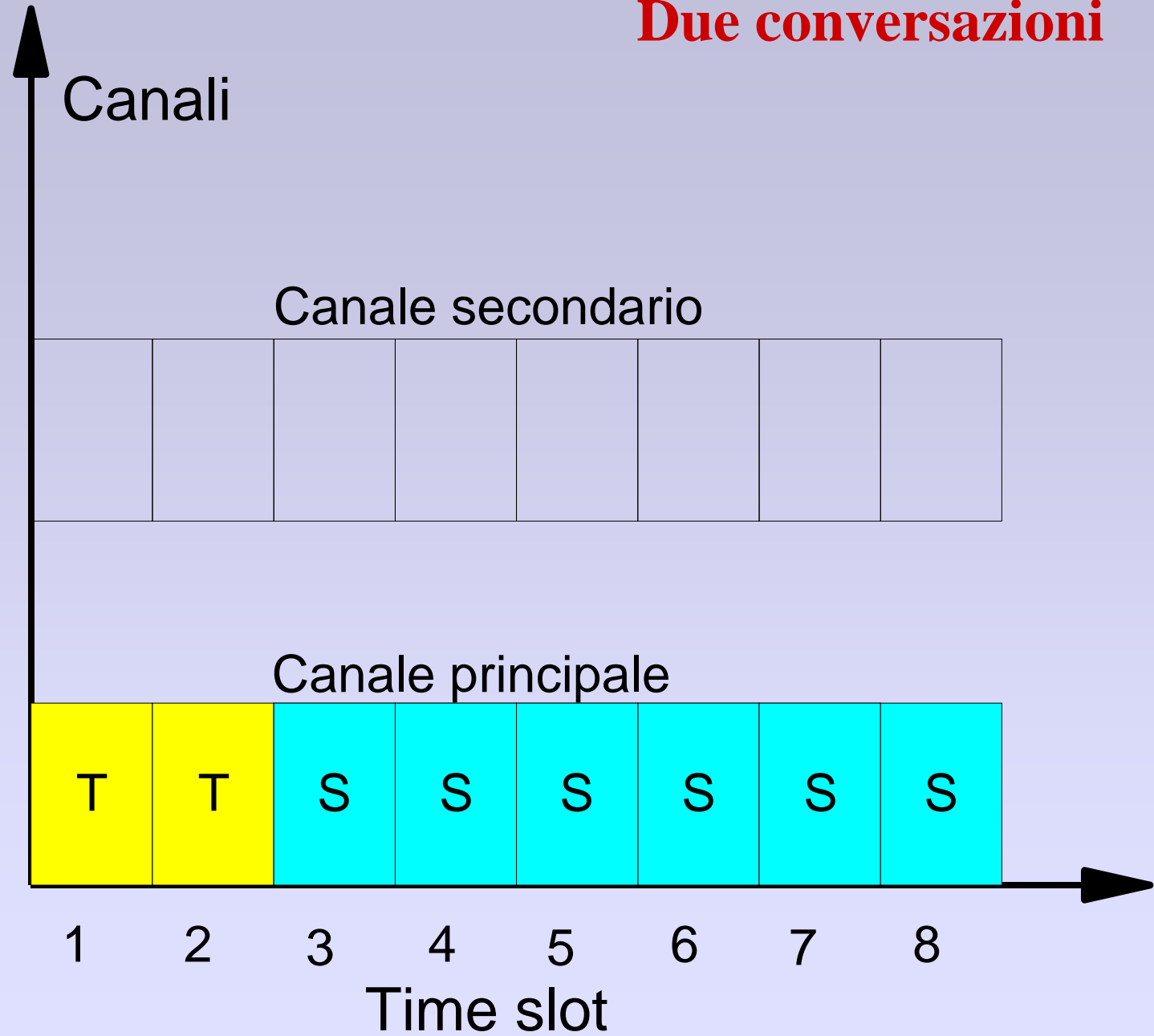
Una conversazione

Livello di esposizione



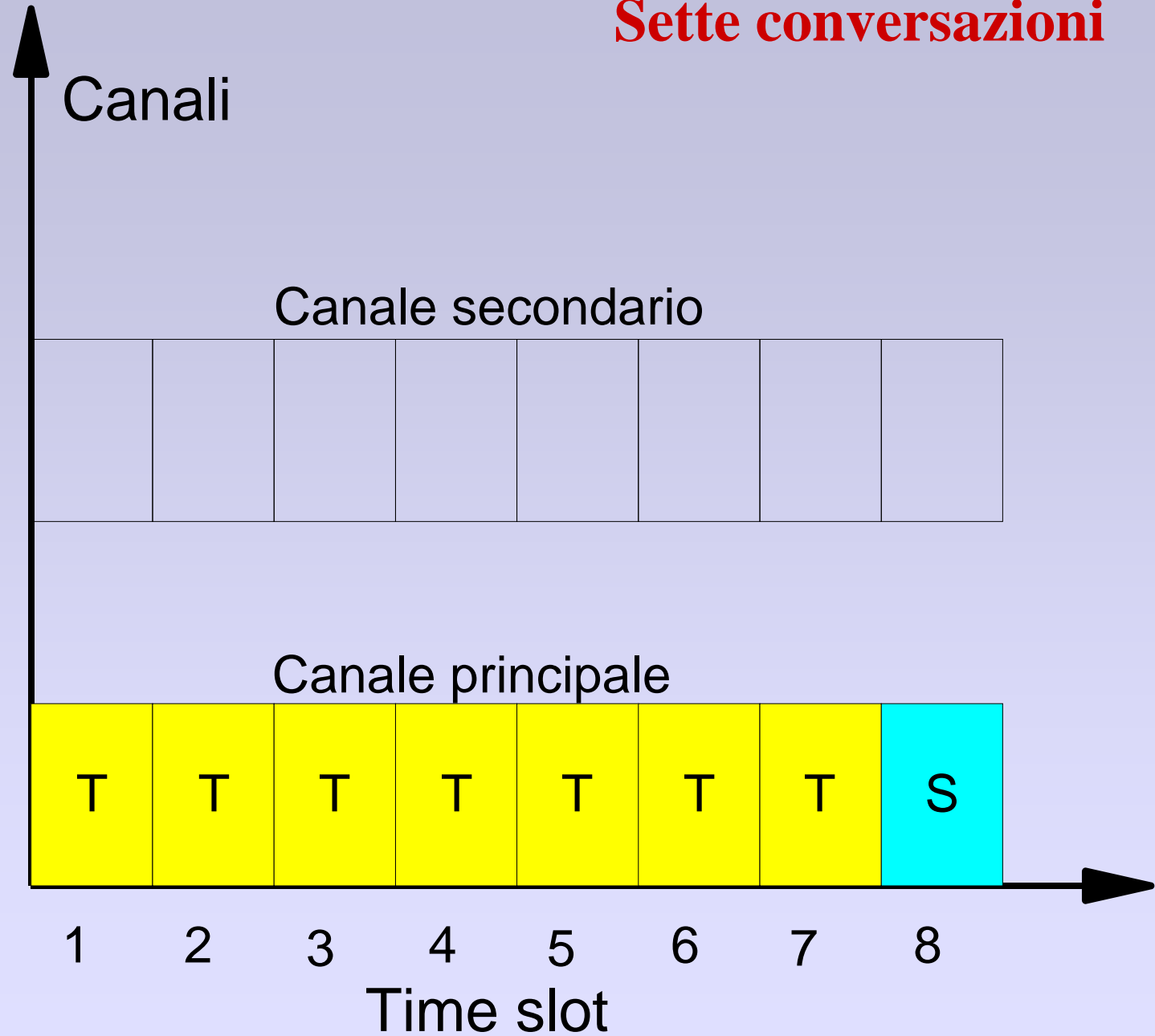
Due conversazioni

Livello di esposizione



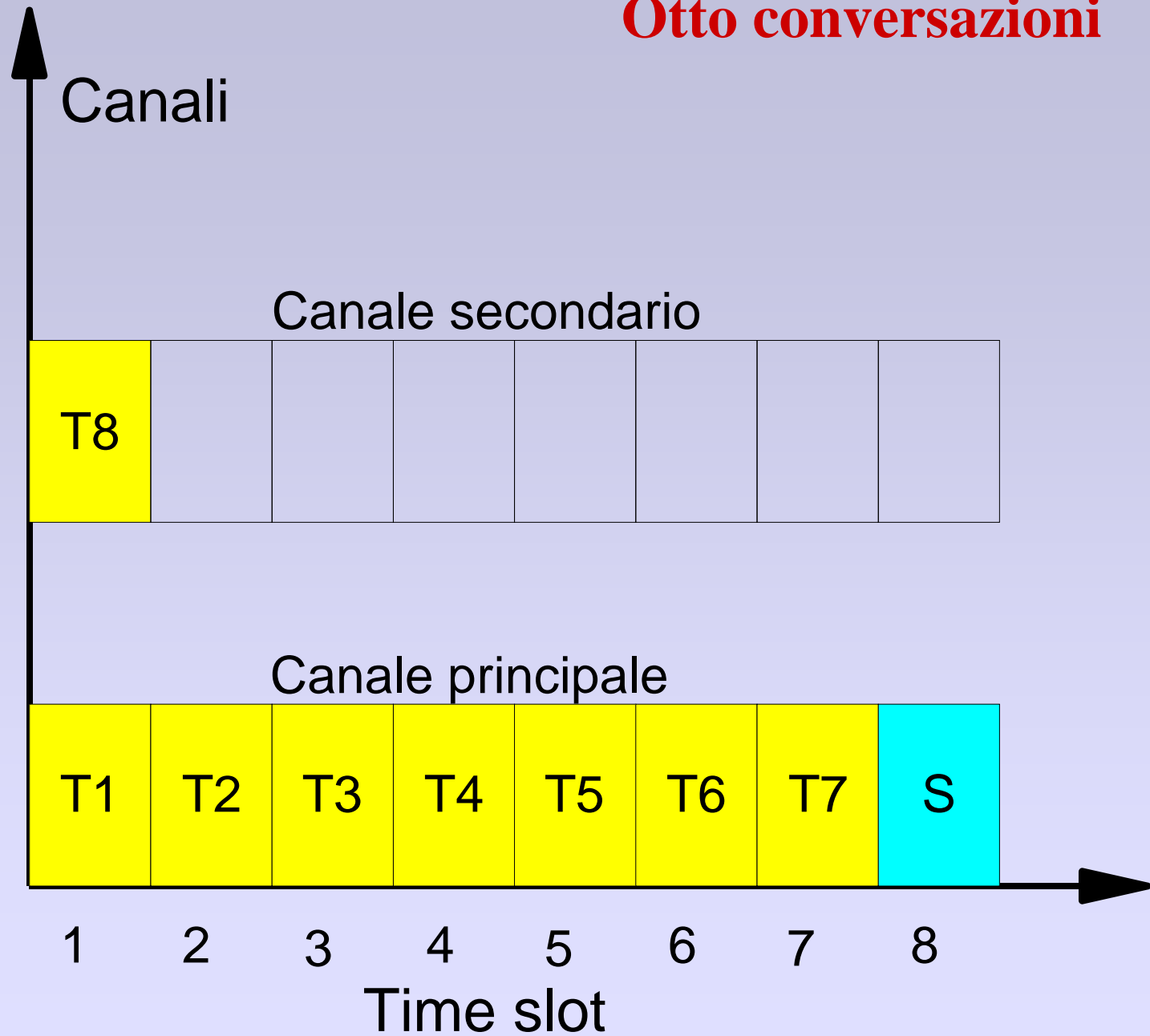
Sette conversazioni

Livello di esposizione



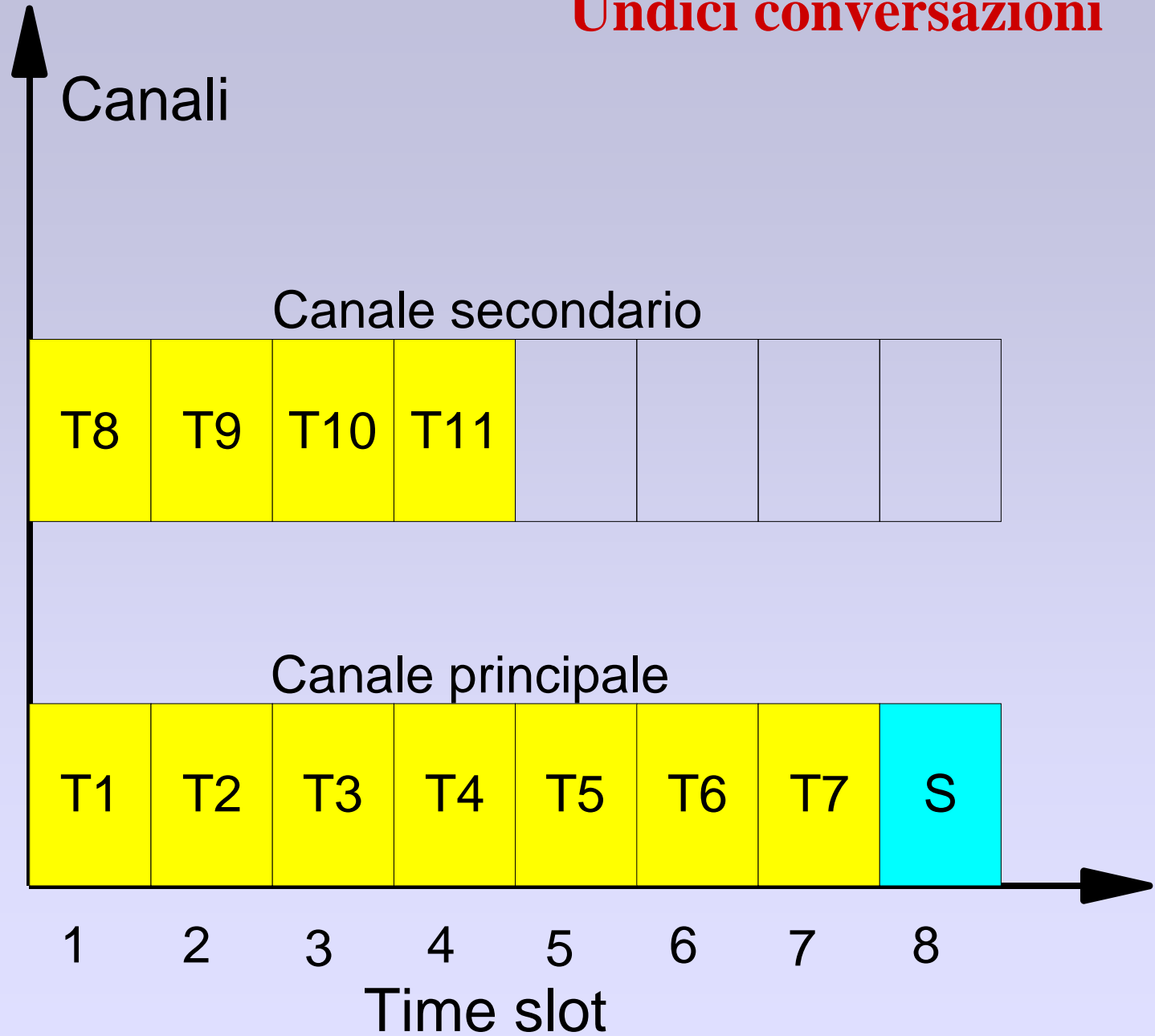
Otto conversazioni

Livello di esposizione



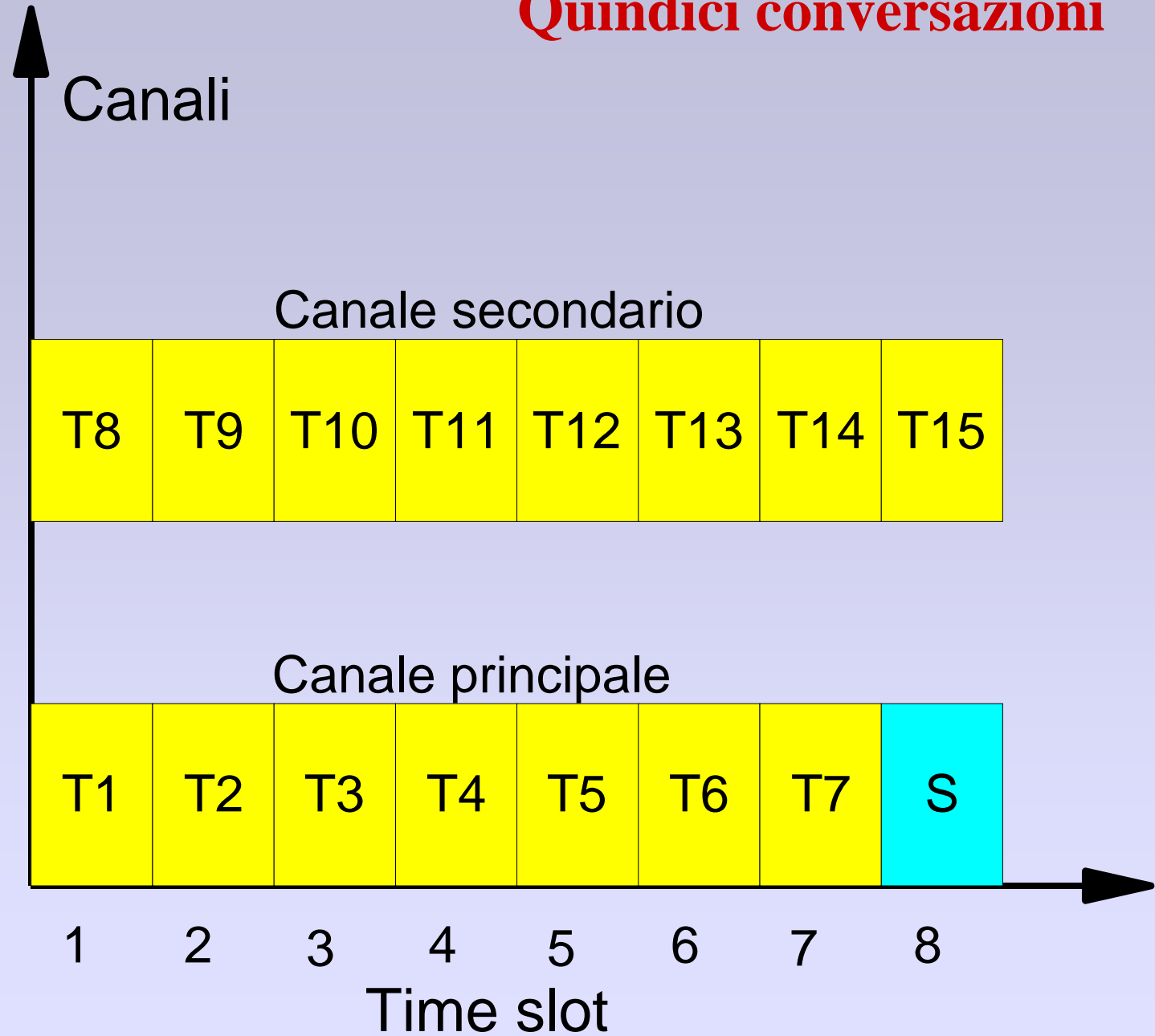
Undici conversazioni

Livello di esposizione



Quindici conversazioni

Livello di esposizione



Caratteristiche del sistema GSM: PC, DTX

- Per limitare l'interferenza di cocanale, l'attuale standard tecnico alla base della telefonia GSM mette automaticamente in atto un **principio di riduzione dell'emissione al minimo valore possibile**, per mezzo di dispositivi come il **controllo della potenza (PC)** emessa o la **trasmissione discontinua** del segnale (DTX).
- Gli stessi accorgimenti (PC e DTX) sono utilizzati dal terminale mobile per **economizzare la batteria**.
- Quando un telefonino riceve un buon segnale (“**molte tacche**”) può trasmettere a potenza più bassa e sottoporre così l'utente ad una esposizione **più bassa**.

GSM: in definitiva

- Indicando con P_{MAX}^{CH} la potenza massima disponibile per ogni canale e con N il numero di canali installati, per ogni cella avremo:

$$P_{TOT} = P_{MAX}^{CH} + (N - 1)P_{MAX}^{CH} \alpha_{TRAF} \alpha_{PC} \alpha_{DTX}$$

- Il valore di P_{MAX}^{CH} dipende dalla dimensione della cella
- Il valore massimo assoluto di P_{TOT} è uguale a $N * P_{MAX}^{CH}$, dove N dipende dal numero di chiamate che si vogliono supportare
- Il valore massimo del campo in un dato punto dipende dalla distanza del punto dall'antenna e dalla direzione angolare rispetto alla direzione di massimo irraggiamento (diagramma di radiazione dell'antenna)

UMTS

- UMTS è un sistema multiservizi a copertura globale, con almeno tre componenti:
 - Terrestre a traffico simmetrico
 - Accesso multiplo FDMA+CDMA (“W-CDMA”)
 - Duplex FDD
 - Terrestre a traffico asimmetrico (*non ce ne occuperemo*)
 - Accesso multiplo TDMA+FDMA+CDMA (“TD-CDMA”)
 - Duplex TDD
 - Satellitare (*non ce ne occuperemo*)
- Consente traffico voce e dati fino a 2 Mbit/s teorici (in pratica circa 385 kbit/s; con HSDPA fino a 14.4 Mbit/s teorici, in pratica circa 7 Mbit/s)



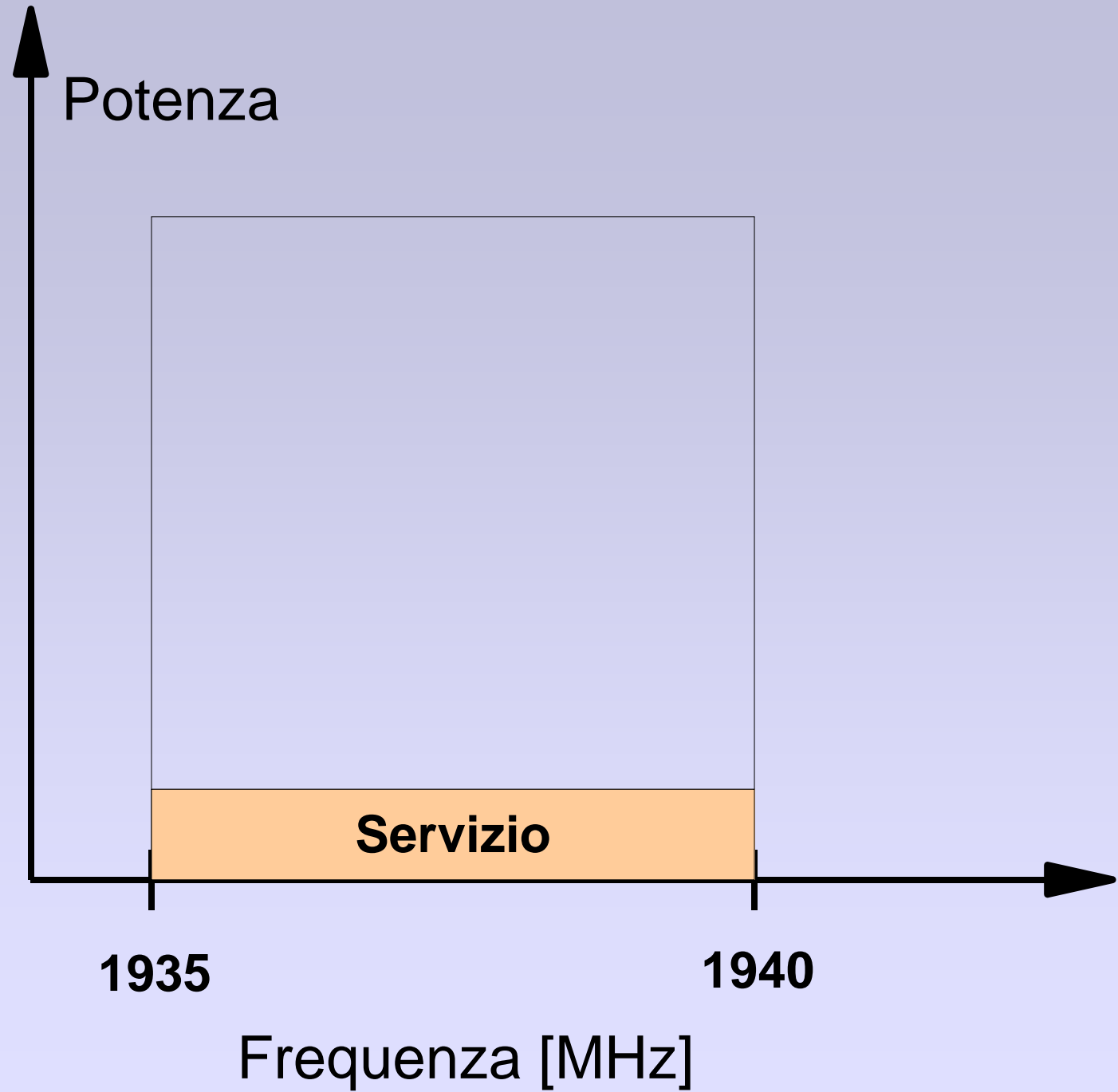
UMTS terrestre a traffico simmetrico

- 12 canali accoppiati FDMA-FDD di 5+5 MHz ciascuno; ogni coppia può supportare dalle 100 alle 200 conversazioni simultanee distinte in CDMA.
- Cinque operatori hanno vinto la gara del 2000:
 - H3G (ex Andala 3G) (3 canali)
 - *Ipse 2000 (3 canali) che però ha rinunciato; i suoi canali sono tornati allo Stato e dovrebbero essere messi all'asta tra gli altri quattro operatori*
 - TIM (2 canali)
 - Vodafone (2 canali)
 - Wind (2 canali)
- L'offerta commerciale in Italia ha preso l'avvio nel 2003
- Frequenze di *downlink* (dalla stazione radio base verso il terminale mobile): 2110 - 2170 MHz.
- Frequenze di *uplink* (dal terminale mobile verso la stazione radio base): 1920 - 1980 MHz.
- Modulazione QPSK (di fase a inviluppo costante)

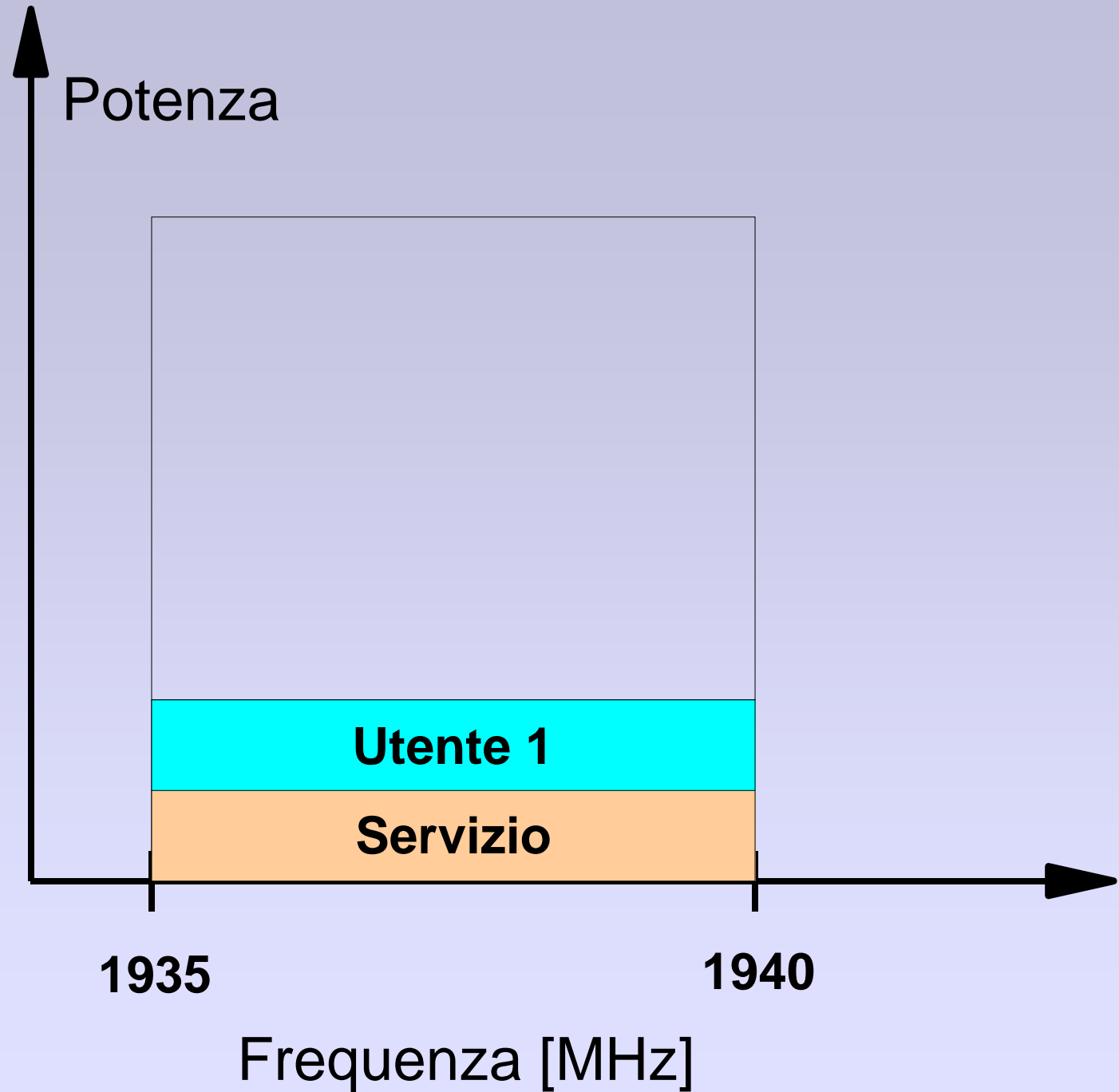
UMTS terrestre a traffico simmetrico

- Ogni canale è equipaggiato da un trasmettitore con potenza di uscita complessiva massima dell'ordine di **poche decine di watt** (tipicamente non più di 20 W per cella); l'EIRP corrispondente è in genere inferiore ad 2 kW. L'EIRP media dipende dal servizio.
- La principale fonte di variazione del livello emesso proviene dalla **variabilità del traffico** in corso, dato che ad ogni comunicazione utente deve essere assegnata una certa potenza, che si va a sommare a quella associata alle altre comunicazioni utente attive ed alle comunicazioni di servizio, che ovviamente devono essere trasmesse di continuo ed a potenza costante.
- Esiste inoltre un accurato meccanismo di **regolazione dinamica della potenza**, con frequenza di campionamento di 1500 Hz.
- Il limite del sistema (inteso come **massimo numero di comunicazioni utente simultanee** consentite) può essere raggiunto quando il trasmettitore non dispone della potenza necessaria ad attivare una nuova conversazione.

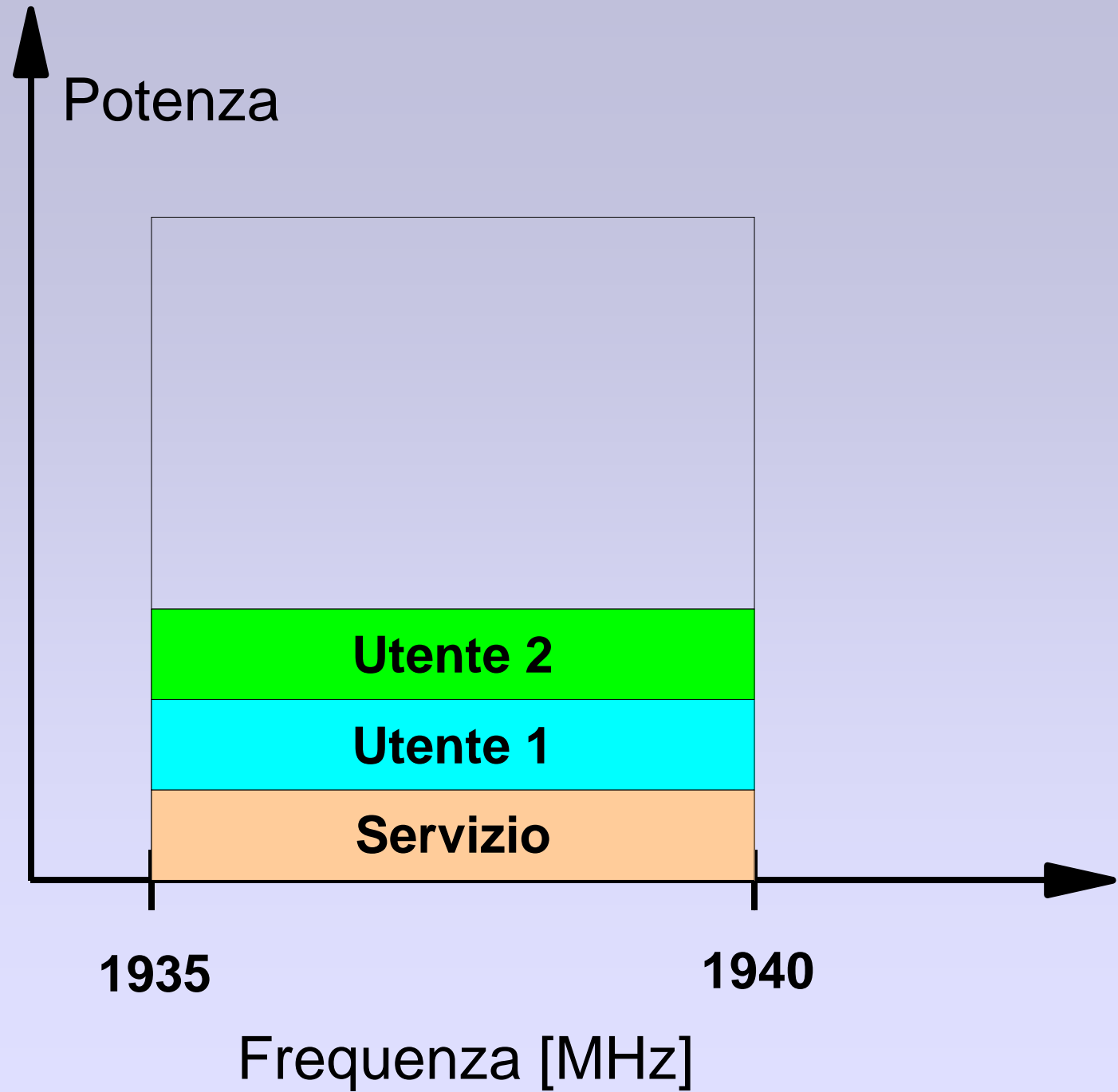
**Utilizzo
della
potenza
nei sistemi
CDMA
(UMTS)**



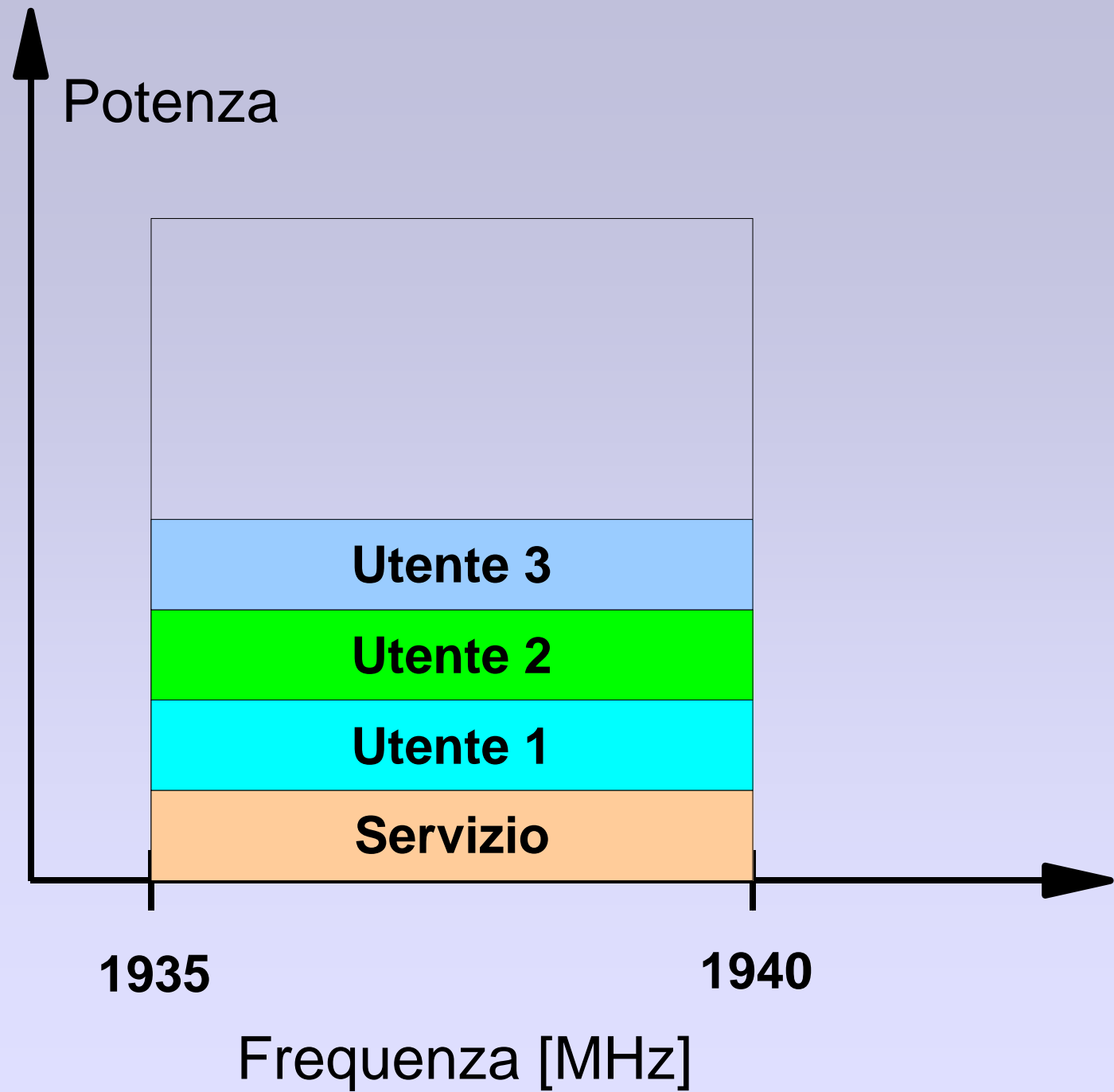
**Utilizzo
della
potenza
nei sistemi
CDMA
(UMTS)**



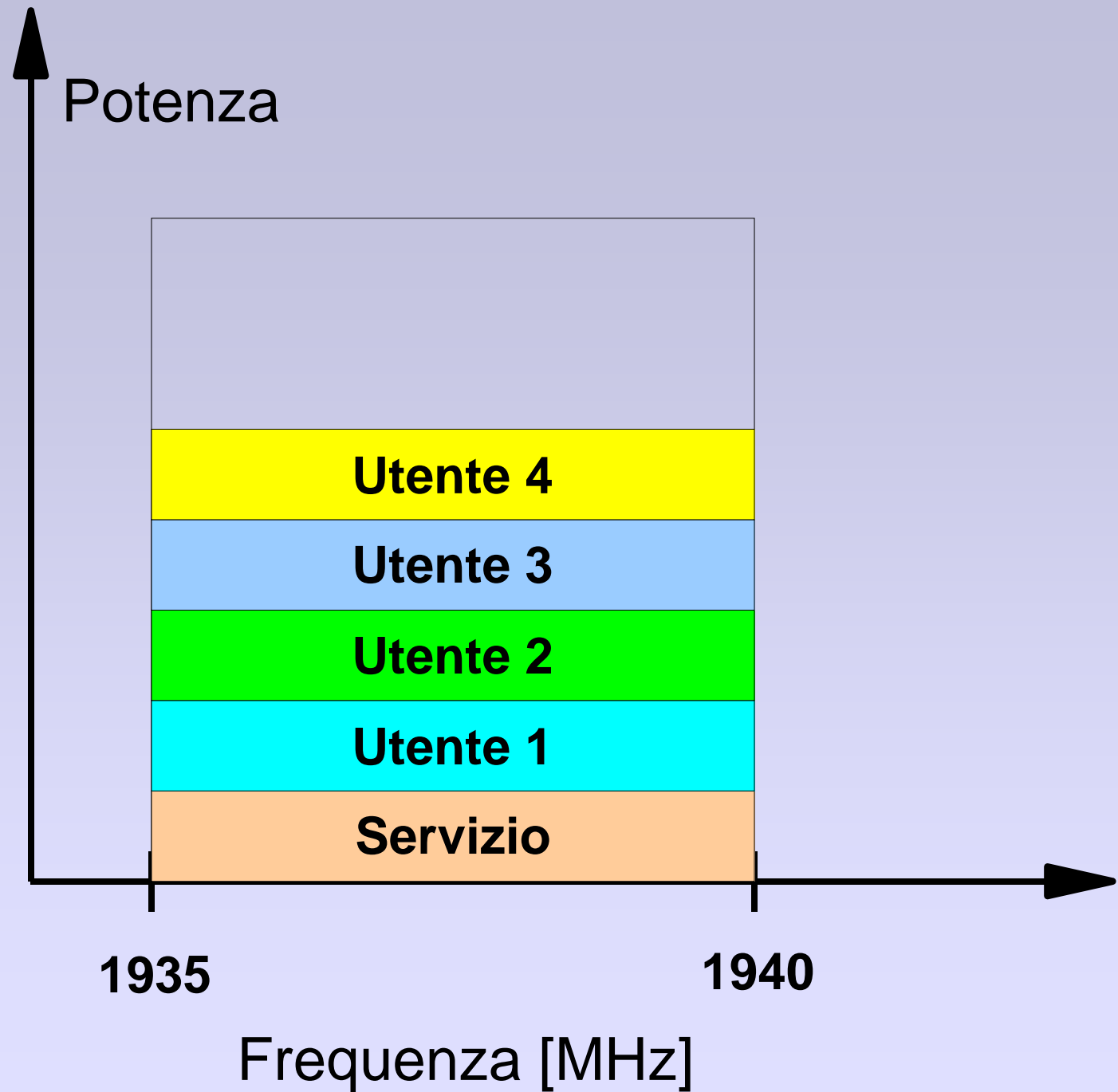
**Utilizzo
della
potenza
nei sistemi
CDMA
(UMTS)**



**Utilizzo
della
potenza
nei sistemi
CDMA
(UMTS)**



**Utilizzo
della
potenza
nei sistemi
CDMA
(UMTS)**



UMTS terrestre a traffico simmetrico

- **Stazioni radio base**

- Detta P_{MAX}^{CH} la potenza massima per ogni canale, la potenza complessivamente emessa dipende – oltre che dal numero N di canali eventualmente attivi nella cella – da un parametro s (dell'ordine di 0.5 – 0.9) che definisce i criteri di ammissione:

$$P_{TOT} = sP_{MAX}^{CH}N$$

- **Terminali mobili d'utente**

- La potenza di emissione massima dei terminali UMTS è pari a 125 o 250 mW (la classe di potenza inferiore si utilizza con i telefoni cellulari, la classe superiore con i dispositivi che necessitano di maggiore velocità).
- La potenza di emissione in esercizio normale è decisamente più bassa; alcune simulazioni hanno fornito valori inferiori a 10 mW.
- Il SAR nella testa (per i terminali utilizzati in modalità “telefono”) è stimata essere dell'ordine di 0.3 W/kg.

UMTS terrestre a traffico simmetrico

- Un importante parametro operativo impostabile dall'operatore UMTS è infine il **rapporto tra la potenza dedicata ai canali di controllo e la potenza massima erogabile dal generatore**. Maggiore è questo rapporto, più ampia è la zona coperta dalla stazione, ma minore è la potenza che resta disponibile per il flusso dati di traffico e quindi minore è anche il numero di utenti servibili simultaneamente.
- A seconda della dimensione della cella, il rapporto in questione dovrebbe assumere valori compresi tra 1% e 15%: valori bassi si adattano a celle piccole e ad alto traffico (**celle urbane**), valori maggiori a celle grandi e a basso traffico (**celle extraurbane**).
- Per chi si occupa degli aspetti protezionistici, il rapporto suddetto riveste particolare importanza soprattutto dal punto di vista misuristico. È infatti evidente che, se esso è noto, allora eseguendo una misura della sola intensità associata ai *canali di controllo* si può risalire alla intensità massima che sarebbe irradiata qualora fosse attivo il massimo numero di comunicazioni simultanee possibili.

Wi-Fi

- Wi-Fi (da *Wireless Fidelity*) è un termine che indica una classe di dispositivi che possono collegarsi a reti locali senza fili (Wireless LAN) basate sulle specifiche della famiglia IEEE 802.11x.
- Il logo ufficiale Wi-Fi può essere utilizzato solo dai dispositivi che hanno superato le procedure di certificazione stabilite dal consorzio Wi-Fi Alliance, che controlla e certifica la compatibilità dei componenti wireless con gli standard di riferimento.



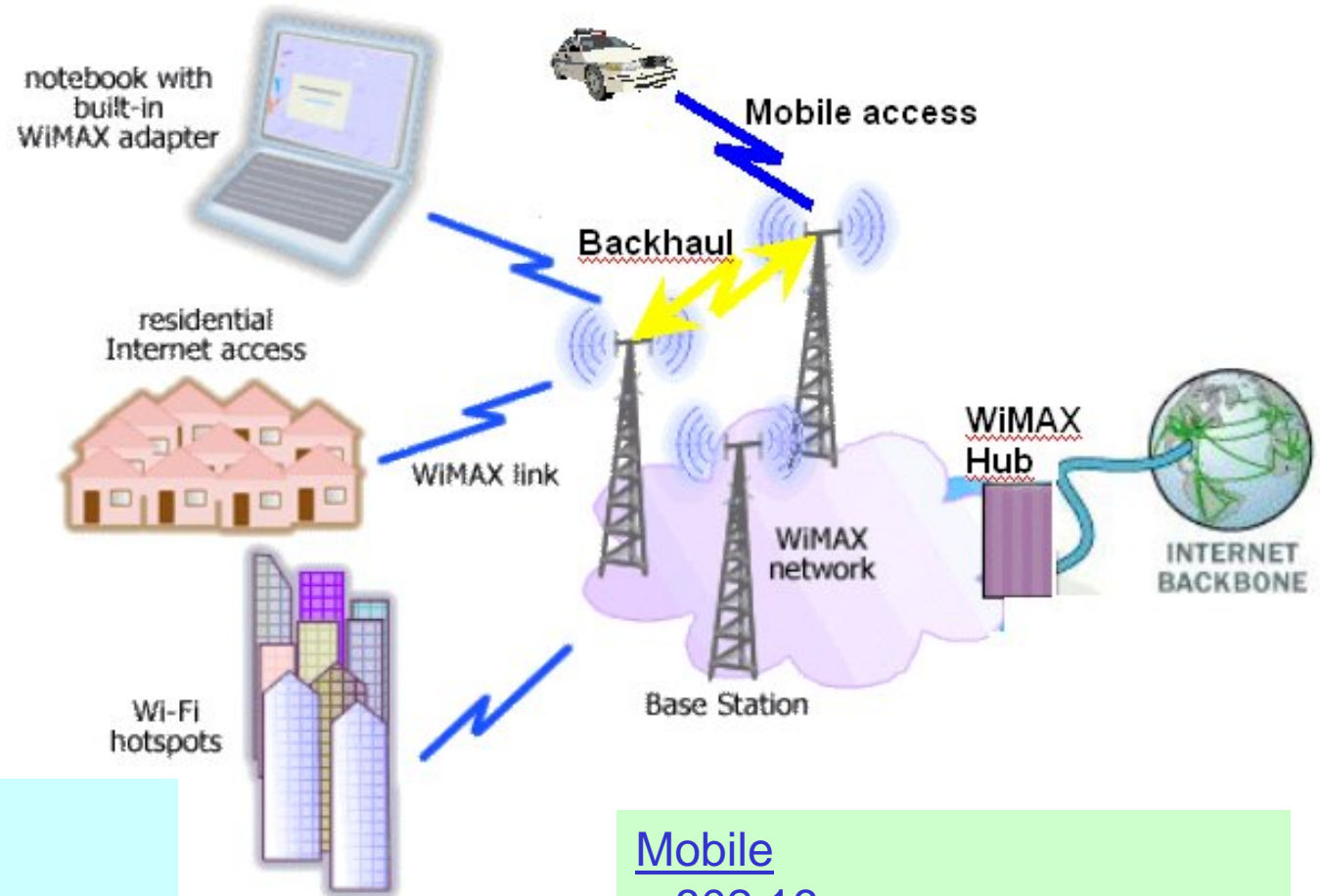
- Ad oggi, le implementazioni più stabili e diffuse sono quelle che corrispondono alle versioni “b” e “g” dello standard di riferimento IEEE (quindi 802.11b e 802.11g)
- 802.11b e 802.11g
 - Intervallo di frequenza da 2400 a 2483.5 MHz, diviso in 14 canali da 22 MHz ciascuno parzialmente sovrapposti; sono effettivamente utilizzati due gruppi di tre canali ciascuno non sovrapposti (1,6,11 e 2,7,12).
 - Codifica / Modulazione / Velocità di trasmissione
 - 802.11b: DSSS-CCK (FHSS abband.) / QPSK / fino a 11 Mbps
 - 802.11g: 64 ch. OFDM / BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM / fino a 54 Mbps
 - EIRP massima 100 mW fissata da una norma europea; vengono spesso utilizzati valori inferiori, per esempio 30 mW (specie nel terminale mobile, per risparmiare la batteria)
 - Antenne a guadagno molto basso (poco più che unitario)
 - Tanto gli algoritmi di accesso multiplo quanto il duplex sono a divisione di tempo (TDMA e TDD) in quanto mutuati dalla rete ethernet in cavo

- 802.11b e 802.11g
 - Ogni access point utilizza un singolo canale (largo 22 MHz), che viene condiviso in TDMA-TDD (CSMA/CA) da tutti gli utenti
 - La trasmissione avviene a pacchetti con conferma di ricezione.
 - La potenza media (su 6') dipende dalle condizioni di servizio ed è influenzata dal duty cycle, a sua volta determinato da vari fattori.
 - La bidirezionalità della trasmissione (attesa dell'OK di ricezione)
 - La necessità di servire più terminali mobili (diminuisce il duty cycle di ogni singolo terminale mobile)
 - Il duty cycle aumenta col volume di dati da trasferire, ma raramente ci si avvicina al 100%
 - Il duty cycle dipende dalla velocità della connessione (connessioni più veloci richiedono tempi di trasmissione inferiori)
 - Il duty cycle dipende anche dalla qualità del collegamento, a causa delle ritrasmissioni
 - La presenza di più access point sullo stesso canale determina collisioni che fanno diminuire il duty cycle di un singolo access point
 - La capacità di traffico della rete collegata influenza il duty cycle
 - Il duty cycle minimo dell'access point è fissato dai segnali di servizio (*beacon signals*) ed è dell'ordine di 0.01%

- Considerata la bassa potenza di uscita di picco, il bassissimo guadagno d'antenna e la riduzione operata dal duty cycle, gli access point delle reti Wi-Fi generano livelli di densità di potenza sempre **molti ordini di grandezza sotto i limiti normativi** ed anche significativamente inferiori alle stazioni radio base
- Anche sotto le ipotesi più cautelative, sia gli access point sia i terminali mobili possono indurre valori di SAR **di picco** che arrivano al massimo a circa 1 W/kg
- I valori di SAR medio sono pressoché trascurabili nella stragrande maggioranza dei casi

- Si tratta di uno standard (IEEE 802.16) progettato per dare grande flessibilità nell'impostazione dei parametri operativi, a seconda dell'applicazione
- Parametri aggiustabili (alcuni anche dinamicamente, in run-time)
 - Intervallo di frequenze
 - Larghezza di banda
 - Metodo di condivisione dell'accesso e di duplexing
 - Numero di sottoportanti
 - Tipo di modulazione
- Configurazioni operative
 - In linea di vista (LOS) – non in linea di vista (NLOS)
 - Collegamenti punto-punto (backhaul) e punto-multipunto
 - Terminali utente fissi o mobili
 - Varie dimensioni di copertura (fino a qualche decina di km)
 - Varie velocità di trasferimento dati (fino ad alcune decine di Mbit/s)
 - Differenti livelli di QoS
 - **Attenzione: velocità dati e distanza sono parametri antagonisti!**

WiMax



Fixed / nomadic

- 802.16d
- 802.16-2004
- 256 ch. OFDM
- 40-45 Mbit/s bidirezionale
- Canali 7 MHz
- TDMA (ul) / OFDMA (dl)
- TDD (FDD)

Mobile

- 802.16e
- 512, 1024 ch. OFDM
- 30-35 Mbit/s bidirezionale
- Canali 5,7,10 MHz
- TDMA (ul) / S-OFDMA (dl)
- TDD (FDD)

Modulazione BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM

WiMax in Italia

- Solo intervallo di frequenze “licensed” 3.4 – 3.6 GHz.
- 3 blocchi di 21+21 MHz ciascuno.
- Gara conclusasi nel febbraio 2008, con assegnazione dei tre blocchi su base macroregionale (“blocco A”, “blocco B”) e regionale (“blocco C”)
- Adattabilità ad entrambi gli standard 802.16d e 802.16e
- Le infrastrutture sono in corso di realizzazione
- Pensato prima di tutto come soluzione per combattere il **digital divide** (fornire connettività fissa dove non arriva la banda larga via cavo) ma, in prospettiva, anche mobile.

- **Stazioni radio base**
 - Ci si aspettano potenze tra 5 e 20 W per canale con 1 canale per settore
 - Antenne settoriali o omnidirezionali
 - EIRP per settore sempre inferiori ad 1 – 1.2 kW
 - Il traffico, il duplex TDD ed il controllo di potenza riducono la potenza media
- **Terminali d'utente**
 - Terminali fissi con antenne a tetto anche ad alto guadagno e potenze fino a 200 mW (EIRP fino a 10 – 12 W)
 - L'antenna esterna ottimizza la qualità (e quindi la velocità) del collegamento e minimizza l'esposizione dell'utente, ma ovviamente penalizza la mobilità, che può essere recuperata con un impianto WiFi interno.
 - Terminali mobili (PC con scheda WiMax integrata) con antenne a basso guadagno e potenza di 100 – 200 mW (mobilità massima; qualità e velocità del collegamento modeste)
 - L'accesso multiplo, il duplex TDD ed il controllo di potenza riducono la potenza media
 - Telefonia voce su WiMax?