

# Evoluzione delle comunicazioni wireless verso le reti 5G

*Loreto Pescosolido*

Reti Avanzate

anno accademico 2014-2015



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

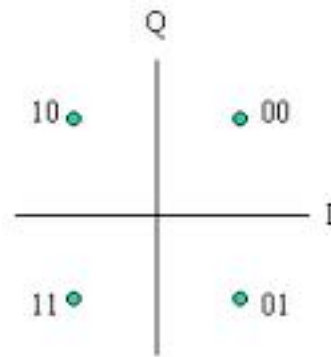
# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

Obiettivo:

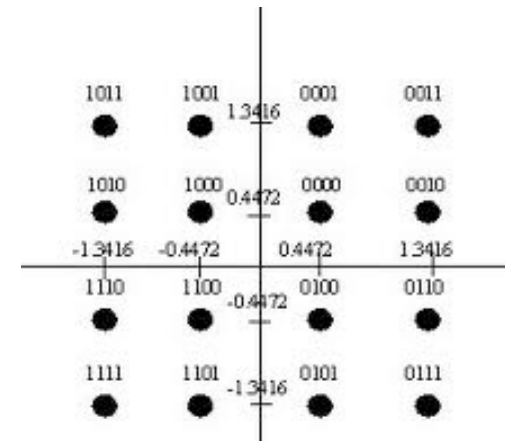
trasmettere una sequenza di numeri complessi o **“simboli”** (a cui verranno associati uno o più bits)

$$u(m) = u_c(m) + ju_s(m)$$

2 bits per simbolo



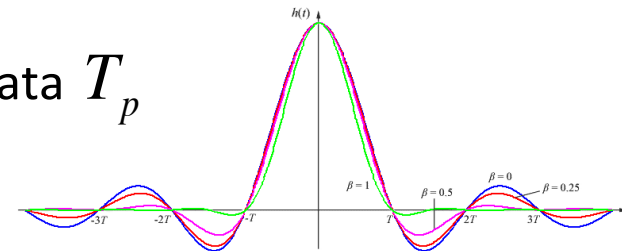
4 bits per simbolo



$p(t)$  = impulso sagomatore: è un segnale di durata  $T_p$

Segnale di banda base:

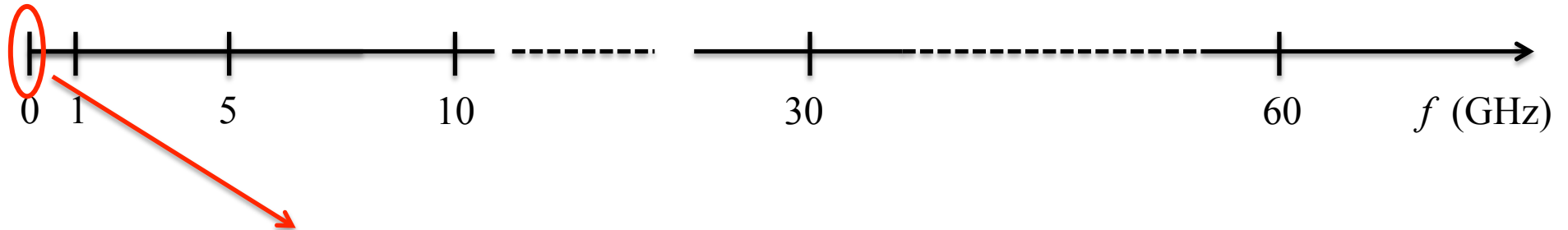
è sequenza (treno) di impulsi trasmessi ogni  $T_s$



$$\bar{y}(t) = \sum_m u(m) p(t - mT_s)$$

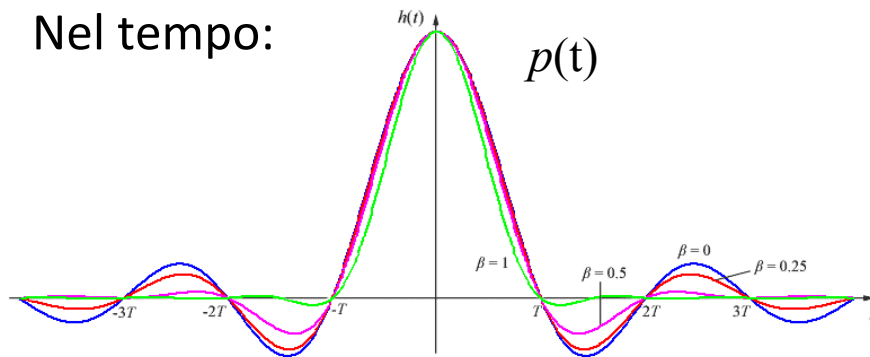
- E' un segnale complesso, non può essere direttamente trasmesso!

# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

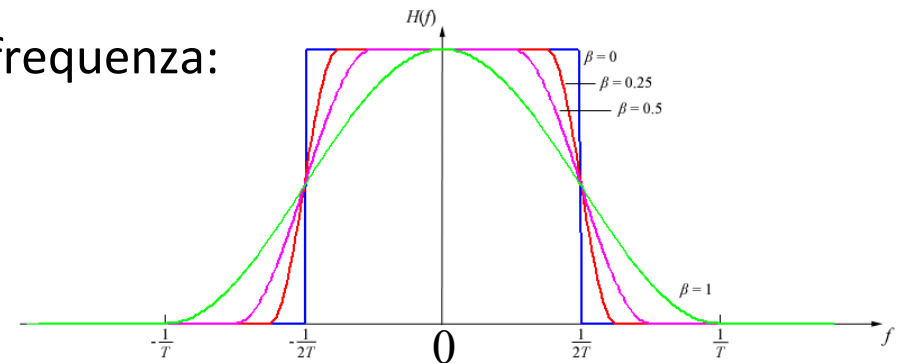


- Segnale in banda base – forma d’onda tipica di partenza per trasmissioni digitali\*

Nel tempo:



In frequenza:



- Minore è la velocità con cui varia il segnale nel tempo (e quindi maggior è la durata ad es. della campana centrale) minore è la banda occupata
- Poiché il segnale sarà delimitato nel tempo, in frequenza compariranno dei lobi laterali, tanto maggiori quanto più è stretto quello principale.

# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

Si dimostra che la sequenza  $\bar{y}(t) = \sum_m u(m) p(t - mT_s)$  ha una occupazione spettrale dello stesso tipo di quella dell'impulso  $p(t)$

... ma come si fa a trasmettere un segnale complesso?

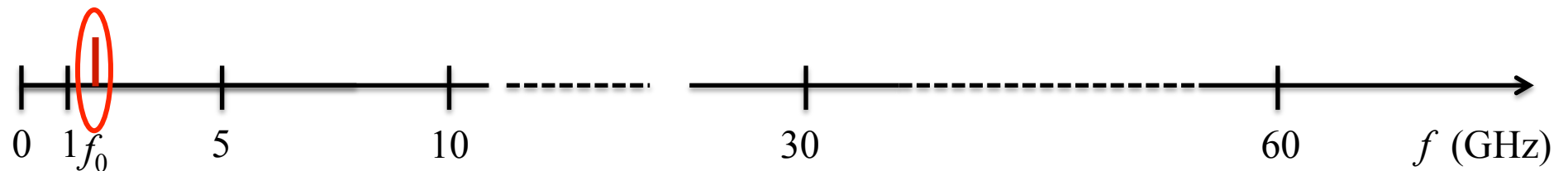
- Modulazione di un segnale (di banda base) complesso: lo trasforma in un segnale reale centrato su una certa frequenza portante

$$y(t) = u p(t) = (u_c + ju_s) p(t)$$

$$y_{rf}(t) = \text{Re}[y(t)] \cos(2\pi f_0 t) - \text{Im}[y(t)] \sin(2\pi f_0 t)$$

$$= u_c p(t) \cos(2\pi f_0 t) - u_s p(t) \sin(2\pi f_0 t)$$

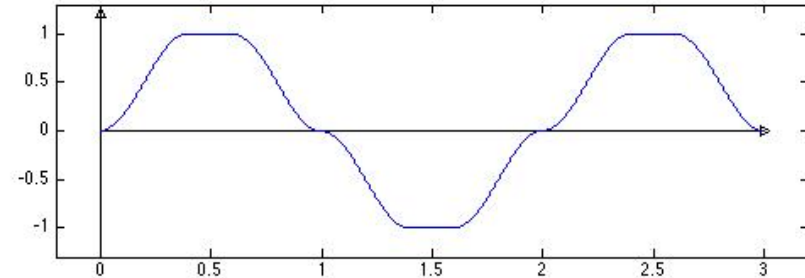
↙ frequenza portante ↘



# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

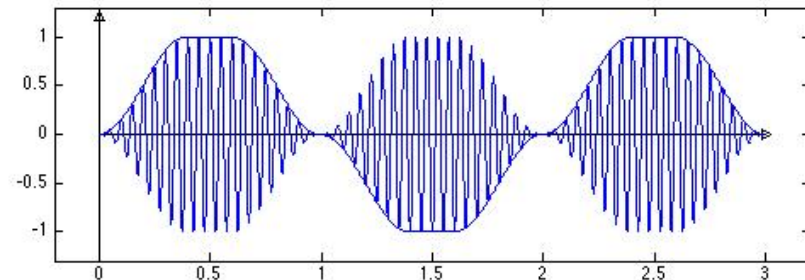
## - Segnale di banda base:

(per facilità usiamo un impulso che nelle modulazioni classiche a singola portante non si usa: il coseno rialzato)



## - Segnale modulato in frequenza:

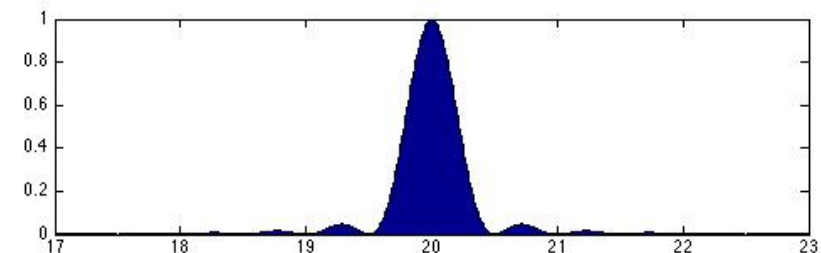
i simboli sembrano indistinguibili ma non lo sono, si recuperano tramite demodulazione



## - Spettro del segnale:

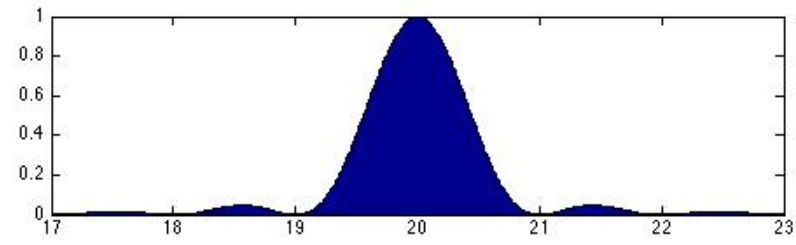
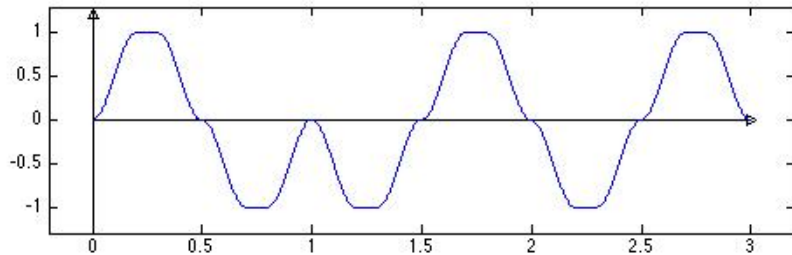
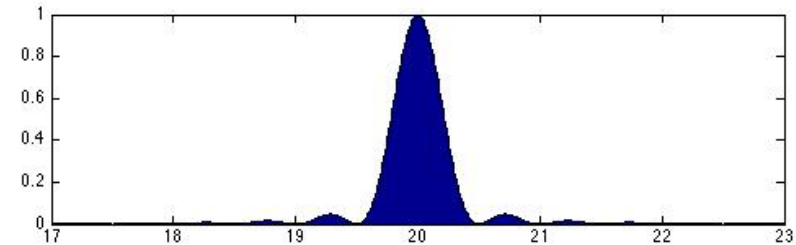
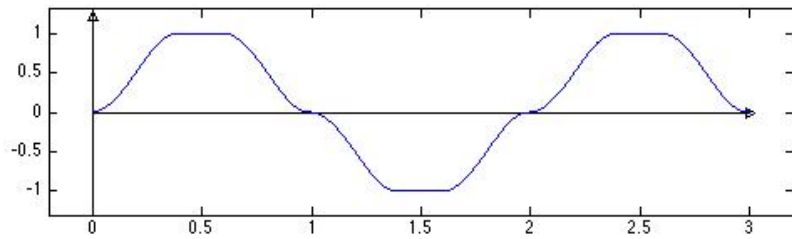
Rappresenta quali frequenze il segnale occupa.

Notare che qualunque forma abbia l'impulso, a causa del fatto che (nel tempo) è di durata limitata, lo spettro in frequenza avrà dei lobi laterali



# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

La larghezza della banda occupata è inversamente proporzionale alla durata degli impulsi → se si vogliono trasmettere più simboli, si deve allargare la banda

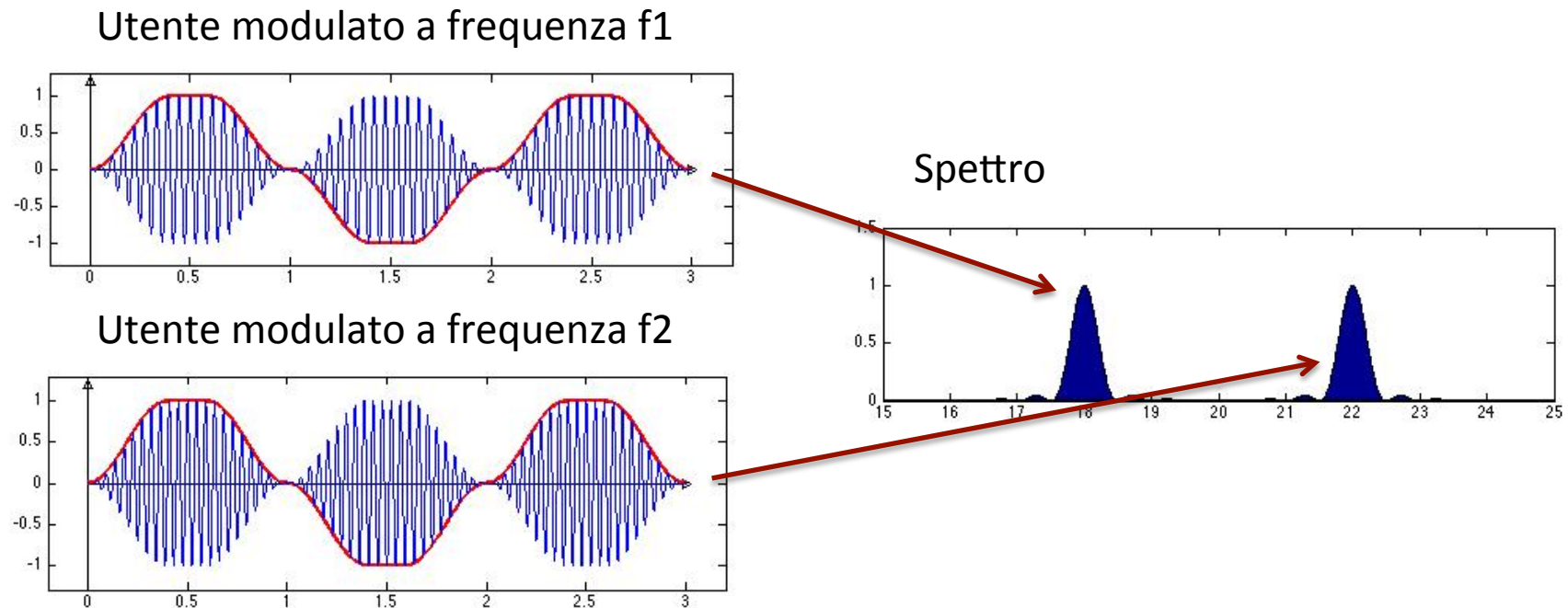


Larghezza di banda maggiore, a prescindere dalla portante  $f_0$  → maggiore DATA RATE

# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

Il posizionamento nell'asse delle frequenze dipende invece dalla frequenza portante che modula il segnale.

Esempio di segnali di utenti diversi con lo schema FDMA



Notare la presenza delle bande di guardia che causa una notevole inefficienza spettrale.

# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

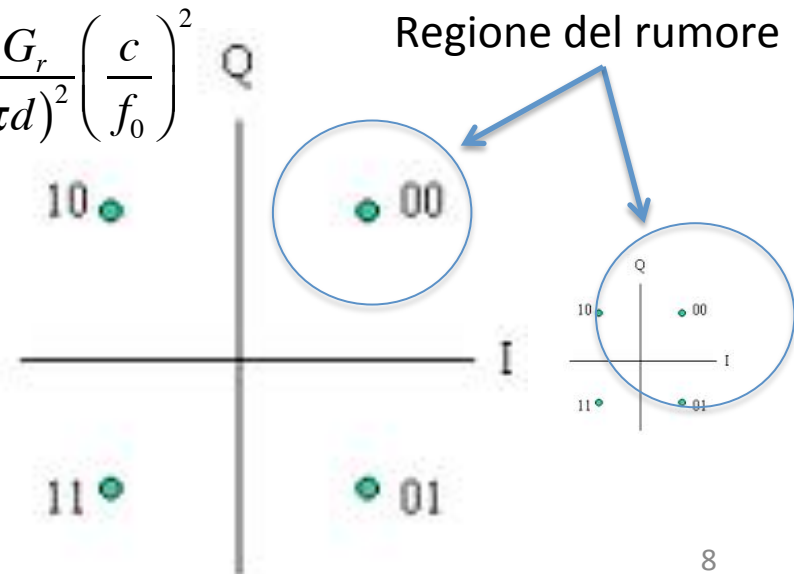
Effetti del canale di comunicazione wireless

1. Attenuazione
2. Dispersività in tempo – selettività in frequenza
3. Selettività in tempo (variazione temporale) – dispersività in frequenza

## 1 – Attenuazione

E' funzione della distanza e della frequenza della portante – esempi:

- doppino telefonico:  $\|H(f)\|^2 \text{ (dB)} = -k \cdot d^2 \cdot f_0$
- Trasmissione radio  $\|H(f)\|^2 = \frac{P_t(f)}{P_r(f)} = \frac{G_t G_r}{(4\pi d)^2} \left(\frac{c}{f_0}\right)^2$
- Il valore di potenza del segnale ricevuto varia con la distanza e la frequenza
- deve essere confrontato con la potenza del **rumore termico** che non dipende dalla frequenza



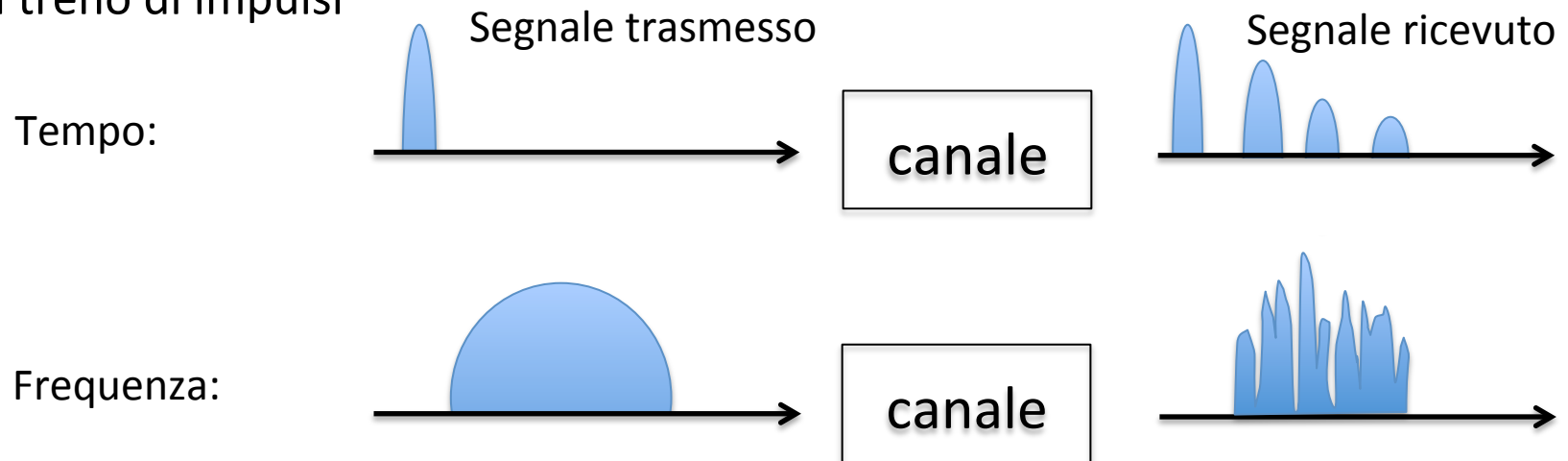


# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

Effetti del canale di comunicazione wireless

## 2 - Dispersività in tempo (o selettività in frequenza) dovuta a multipath fading

- Gli impulsi vengono riflessi su varie superfici ed arrivano al ricevitore in diverse repliche. Le ultime repliche di un impulso possono anche sovrapporsi alla prime repliche dell'impulso successivo (interferenza inter-simbolica - ISI - nel tempo) --> intervalli di guardia, oppure algoritmi di decodifica congiunta (es. CPM usato nel GSM)
- In frequenza questo corrisponde ad una distorsione della forma dello spettro del treno di impulsi

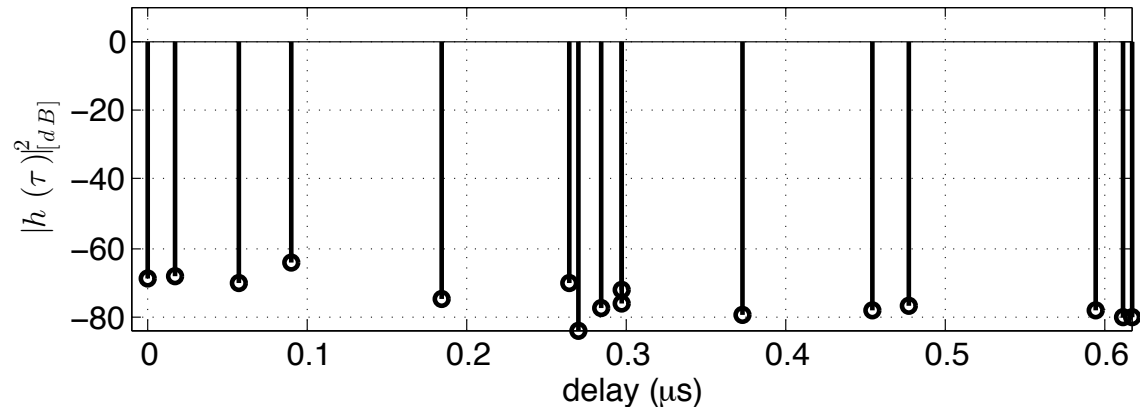


# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

Esempio di attenuazione con multipath fading:

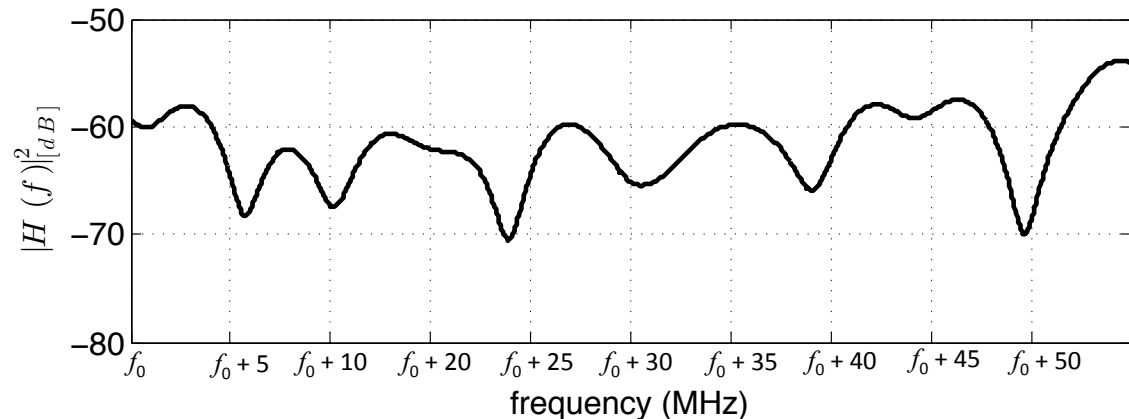
## Risposta impulsiva

ad ogni barra corrisponde l'inizio di una nuova replica del segnale trasmesso



## Risposta in frequenza

Lo spettro del segnale trasmesso viene moltiplicato per questa funzione



**Il canale si limita ad attenuare il segnale, senza distorcerlo causando ISI, solo se, nella banda del segnale, la risposta in frequenza è piatta**

# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

---

## Multipath fading

In frequenza: la risposta in frequenza non è piatta, ma fluttuante

In tempo corrisponde all'arrivo di repliche del segnale trasmesso ben oltre la durata dell'impulso → **Inter Symbol Interference (ISI)**

Si combatte con opportuni filtri (di solito digitali) che “equalizzano il canale” cioè a valle del filtro si ha di nuovo risposta piatta nella banda di interesse.

Questa è la strada seguita con il GSM

→ Tuttavia, non si può aumentare il data rate allargando indefinitamente la banda perché equalizzare il canale diviene via via più complicato (corrisponde ad avere ISI tra un numero sempre maggiore di simboli tra cui districarsi)

# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

---

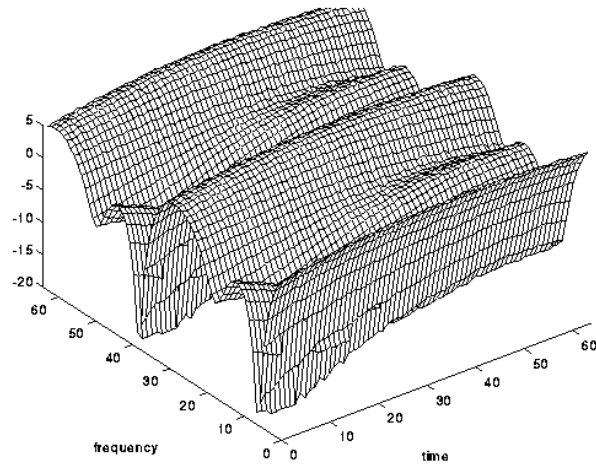
Effetti del canale di comunicazione wireless

## **3 - Dispersività in tempo (o selettività in frequenza) dovuta a multipath fading**

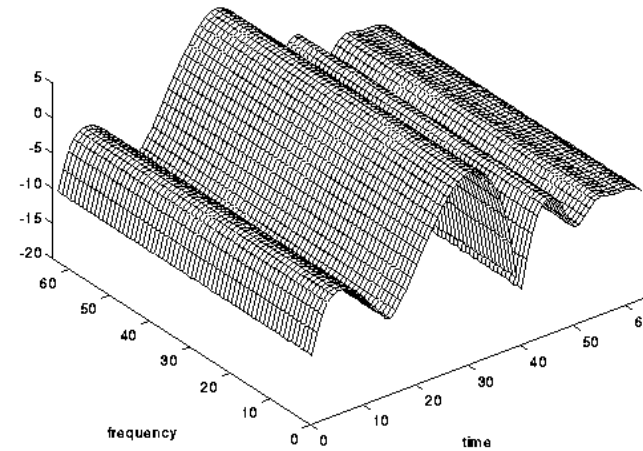
- Oltre a fluttuazioni per frequenze diverse, il fatto che gli oggetti su cui si riflettono i segnali si muovono, causa variazioni temporali della risposta in frequenza.
- Nel caso di oggetti che si muovono molto velocemente, si ha “fast fading”
  - In frequenza: doppler spreading dei segnali:  
Lo spettro dei segnali viene allargato dal canale a cause delle mobilità degli oggetti nell’ambiente  
→ Problema per FDM e FDMA
- Nel caso di oggetti che si muovono più lentamente, si hanno “slow fading”:  
semplicemente la risposta in frequenza varia nel tempo → i protocolli di scheduling devono tenerne conto

# Esempi

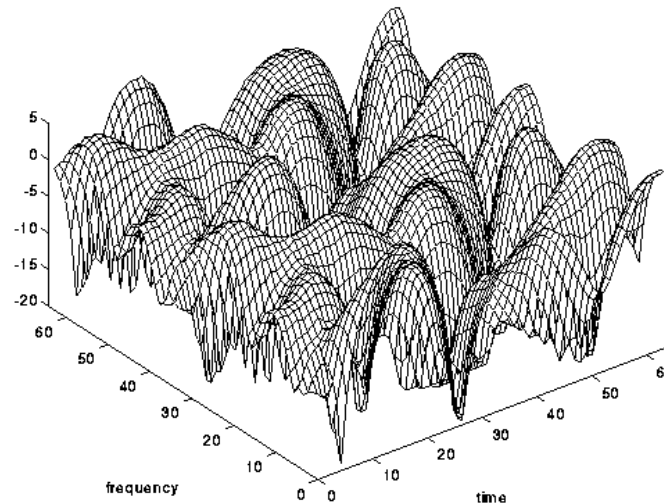
Frequency selective, slowly varying channel



Frequency flat, time selective channel



Both time and frequency selective



# Trasmissione di segnali digitali tramite modulazione

---

- In tempo, il multipath fading tende a far sovrapporre segnali trasmessi in intervalli differenti
  - Limite inferiore alla durata degli impulsi
- In frequenza: doppler spreading dei segnali, associato a “fast fading”  
Lo spettro dei segnali viene allargato dal canale a cause delle mobilità degli oggetti nell’ambiente. Segnali in bande adiacenti ma separate in trasmissione, vengono sovrapposti in ricezione.
  - Limite inferiore alla separazione di diversi segnali in frequenza

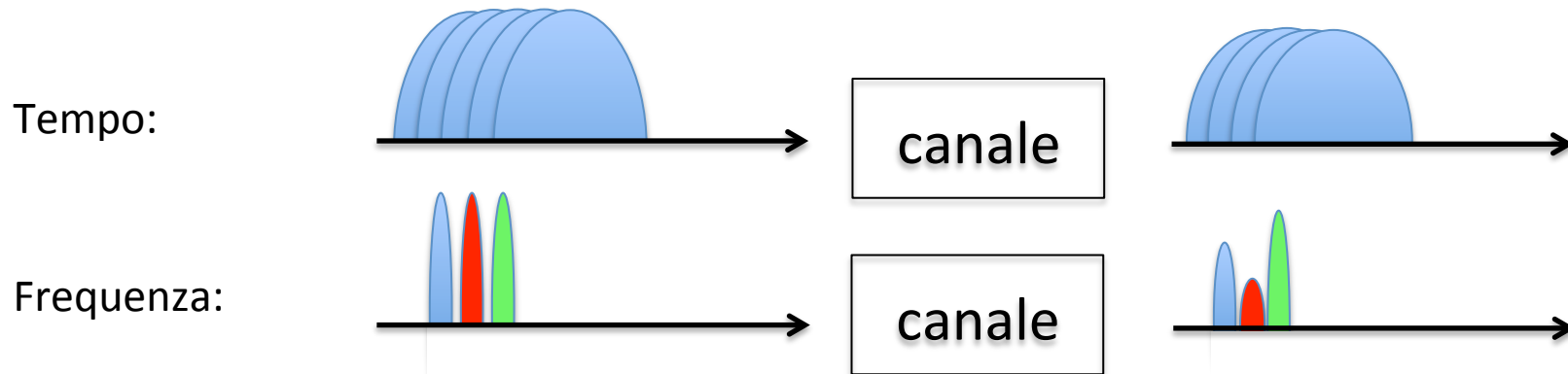
Come si può ovviare a questi fenomeni volendo comunque ottenere data rate + alti?

# Evoluzione nelle reti cellulari

## Approccio **GSM** – formato di modulazione **PCM-GMSK**

- Idealmente si vorrebbe che il ricevitore ricevesse una sola replica, attenuata non distorta di ogni impulso -> in frequenza questo corrisponde ad un canale piatto nella banda dell'impulso. Più è larga la banda, cioè più l'impulso è breve, più è difficile ottenere un canale piatto tramite equalizzazione al ricevitore.
- Banda segnale = 200 KHz – durata impulso circa 50 microsecondi

Impulsi molto lunghi (-> banda stretta) ma sovrapposti:  $T_p \gg T_s$ , ISI indotta in trasmissione



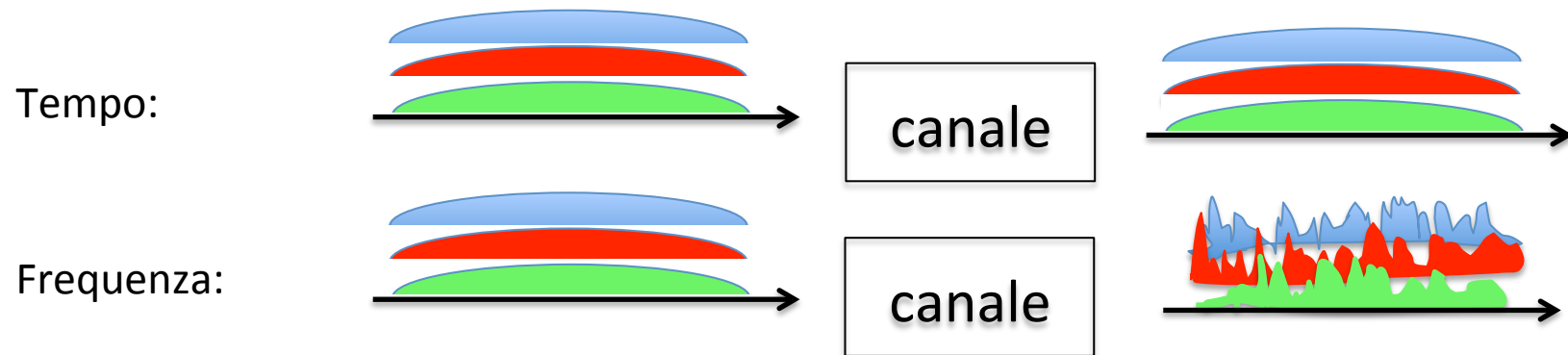
Utenti (colori) diversi vengono allocati su frequenza e time slot diversi (TDMA e FDMA)

- Problema: il canale è piatto ma il segnale può essere fortemente attenuato, quindi il segnale, nel tempo, viene fatto saltare da una frequenza all'altra (**frequency hopping**)

# Evoluzione nelle reti cellulari

## Approccio **3G - formato di modulazione UMTS**

- Impulsi  $p(t)$  lunghi ma (tramite moltiplicazione per delle particolari sequenze di impulsi molto brevi chiamate “codici”) anche a banda larga.



- L'apparente sovrapposizione di segnali sovrapposti (sia in tempo che in frequenza) in ricezione viene risolta con la moltiplicazione per i diversi codici associati agli utenti, che consente di separare i segnali relativi.
- L'interferenza residua viene superata con l'utilizzo di tecniche di cancellazione dell'interferenza, allineando le fasi delle repliche dei segnali utili.
- Il vantaggio maggiore nel passaggio da 2G a 3G si è avuto in termini di data rate e nella gestione degli handover tra celle, con l'introduzione del concetto di soft handover. Inoltre, si è passati al concetto di rete “all-IP” (sia per i segnali voce che dati).

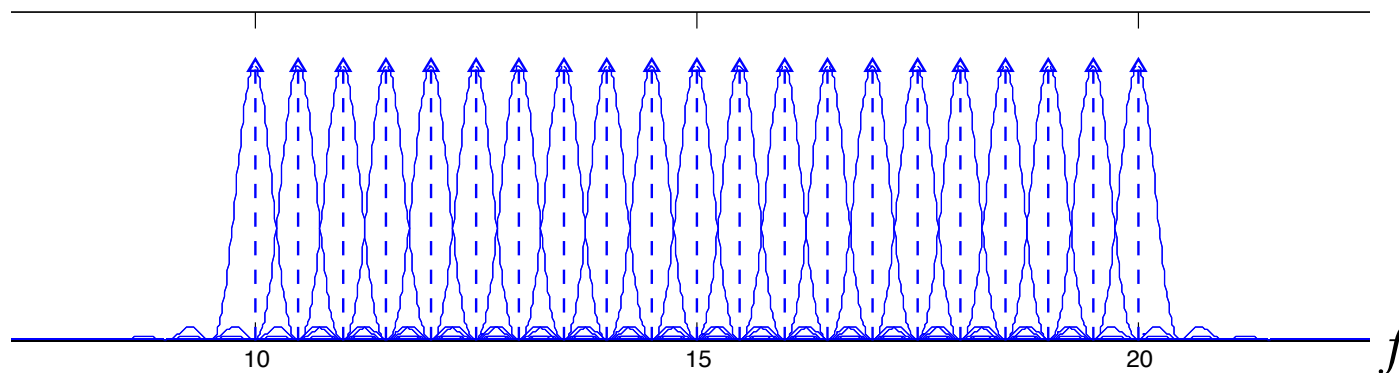


# Evoluzione nelle reti cellulari

## Approccio **4G (LTE) - formato di modulazione OFDM**

**Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)** - E' possibile trasmettere bit dello stesso flusso in parallelo nel dominio della frequenza ma, diversamente da FDM, senza ricorrere alle bande di guardia, ma addirittura sovrapponendo parzialmente gli spettri. ...riuscendo a mantenere l'ortogonalità!

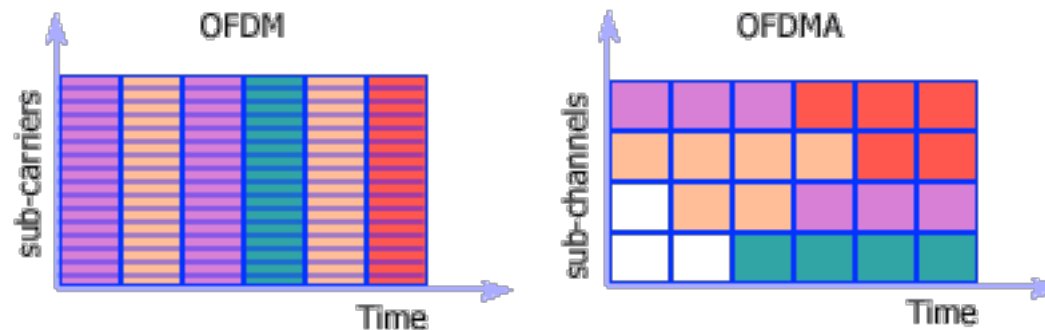
- E' richiesta perfetta **sincronizzazione in fase** al livello di sotto-portanti. Il sistema inoltre deve essere dimensionato sulle caratteristiche di dispersività in frequenza del canale (doppler spread).
- Stima del canale in ricezione.
- Stesso discorso vale per flussi appartenenti a utenti diversi



Questo tipo di trasmissione, consente di ottenere un alto data rate (banda larga) tramite flussi paralleli. Ciascuna sottoportante vede un canale (quasi) piatto nella sua banda.

# Evoluzione nelle reti cellulari

- L'elaborazione del segnale viene fatta quasi totalmente nel dominio digitale. **Bit rate diversi**, sia dello stesso utente che di utenti diversi possono essere inviati su differenti sottoportanti.
- Nuovi challenge per il design dello scheduling: deve adattarsi a condizioni mutabili in termini di velocità di variazione nel tempo del canale, selettività in frequenza.
- Unico pool di risorse tempo/frequenza. Il problema dello scheduling diventa centrale, e il legame con i protocolli di strato superiore (in particolare applicativo) sempre più importante. LTE, WiMAX. Come/quando assegno i canali agli utenti?



Sistemi multi-user, multi-service, multi rate, diventano effettivamente possibili, si possono avere **canali logici riconfigurabili facilmente**.

# Evoluzione nelle reti cellulari

---

## **2G**

Banda di sistema: 25MHz uplink, 25MHzs downlink

Segnale 200KHz – FDMA + TDMA (ogni utente utilizza i 200KHz per 1/8 del tempo)

## **3G**

Banda di sistema: 75 MHz uplink, 75MHz downlink

Segnale 5MHz

## **4G LTE**

Banda di sistema: 100MHz uplink, 100MHz downlink

Segnale 180KHz divisi in 12 sottoportanti + carrier aggregation – allocazione per utente flessibile

## **4G LTE**

**Vantaggi:** flessibilità del sistema e larghezza di banda. Semplicità computazionale dei ricevitori (a parità di banda)

**Svantaggi:** requisiti importanti in termini di sincronizzazione. Sistema flessibile ma con molto overhead di segnalazione

# Reti 5G

---

Sviluppo degli standard previsto nei prossimi 6 anni (primi deployment previsti per il 2019)

- Architettura 4G ha raggiunto risultati eccellenti (fino ad 1Gbit/s) sul data rate del singolo link. In 5G, per andare oltre questi limiti, si punta più alla diversificazione e flessibilità degli utilizzi al livello di sistema, che alla tecnologia trasmissiva del singolo link.

In 5G: aumento di 10 volte del numero di dispositivi connessi (IoT) e di 10-100 volte del traffico generato da ogni dispositivo

- Aumento ulteriore efficienza spettrale rispetto alle tecniche 4G
- Bande multiple gestite in parallelo
- Mm-waves: utilizzo di bande intorno ai 15, 30, 60, 90 GHz
- Densificazione estrema delle celle
- Utilizzo massiccio di MIMO beamforming
- Utilizzo di accesso concorrente secondo approcci Cognitive radio

# Reti 5G

---

## **Aumento efficienza spettrale rispetto alle tecniche 4G (1/3)**

- Superamento della necessità di implementare l'intera gestione delle sotto-portanti in digitale
- Sono allo studio nuovi formati di modulazione che prevedono l'utilizzo di filtri multipli al livello di sottobande o addirittura di singola sottoportante
- In OFDM si filtra fisicamente l'intera banda, e poi tutto avviene in digitale
- Nuovi formati come Filterbank Multi-Carrier (FBMC) e UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier) sono resi attraenti dai progressi fatti nel design dei transceivers

# Reti 5G

---

## Aumento efficienza spettrale rispetto alle tecniche 4G (2/3)

- In LTE, i dispositivi modulano e demodulano l'intera banda di sistema (fino a 20 MHz) e devono utilizzare una parte delle sottoportanti per assicurare l'ortogonalità in ricezioni (→ overhead).
- Per 5G sono allo studio nuove tecniche che rinunciano all'ortogonalità
- **+ complessità:** reintroduzione in un sistema Multi-Carrier di concetti di ISI indotta nello stesso stream di simboli
- Possibile grazie all'avanzamento dei chip
- FBMC – ogni sottoportante viene modulata e filtrata (fisicamente) separatamente dalle altre (mentre in OFDM l'intera banda viene filtrata)
- UFMC – le sottoportanti vengono modulate a gruppi
- Riduzione dell'overhead dovuto al prefisso ciclico

# Reti 5G

---

## **Aumento efficienza spettrale rispetto alle tecniche 4G (3/3)**

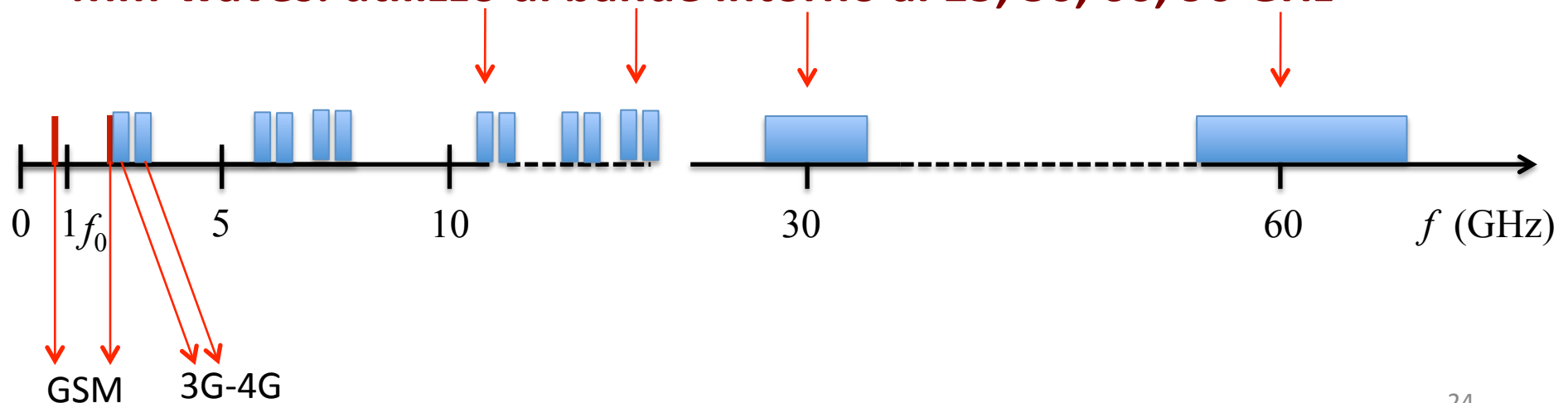
- Il filtraggio analogico presenta una attenuazione fuori banda molto maggiore di quello ottenibile con il filtraggio digitale  
→ sottoportanti più vicine.
- FBMC, UFMC, GFDM - Se da un lato la complessità è maggiore, dall'altro vi è una diminuzione di requisiti in termini di sincronizzazione
- Formati di modulazione ancora più flessibili, adatti a diversi tipi di traffico, da applicazioni ad alto data rate (video streaming, tactile internet), ad applicazioni di tipo IoT-MMC, con pacchetti molto piccoli inviati in burst anche da migliaia di dispositivi, cosa impensabile con schemi strutturati tipo OFDM

# Reti 5G

## Bande multiple gestite in parallelo

I sistemi 5G sono pensati come una rete versatile e composita, in grado di gestire modalità di accesso multiple sia come tecnologia (multi-RAT) che come licenza (ISM, operatore).

- Nuove bande sia licenziate ad operatori che di tipo ISM faranno parte del sistema
- Sviluppo degli strumenti tecnologici per utilizzare le nuove bande
- **Mm-waves: utilizzo di bande intorno ai 15, 30, 60, 90 GHz**





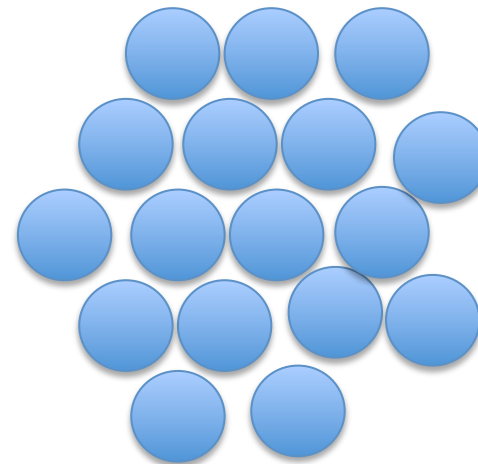
# Reti 5G

---

## Densificazione delle celle

Utilizzo pervasivo delle “small-cells”, celle con raggio di 10-20 metri

- Paradigma già introdotto con le femto-celle limitatamente alla banda LTE
- In 5G, questo concetto troverà maggiore diffusione grazie all’utilizzo di mm-waves.
- Aumento dell’efficienza spaziale nell’uso dello spettro: riducendo la tratta radio si possono **riusare le stesse frequenze** a distanze molto inferiori → effetto moltiplicatore sulla già maggiore disponibilità di banda



# Reti 5G

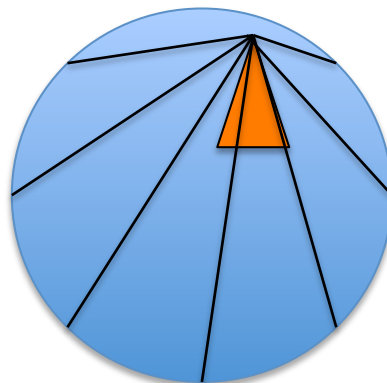
## Densificazione delle celle

- Ulteriore aumento del riuso grazie alle tecnologie MIMO-beamforming
- La possibilità di trasmettere in una specifica direzione è determinata dalla lunghezza d'onda.
- Maggiore è il rapporto tra dimensione dell'antenna (o array di antenne) e la lunghezza d'onda , maggiore è la precisione con cui si riesce ad indirizzare una trasmissione

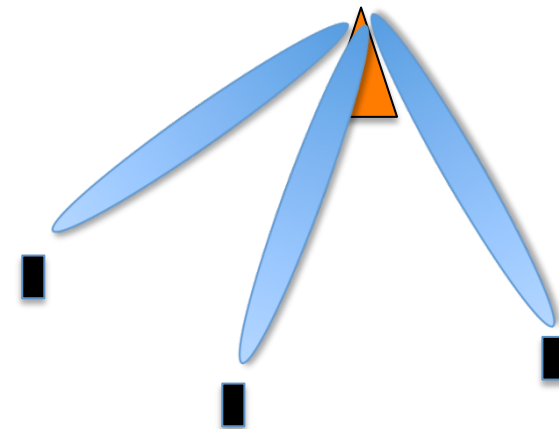
• Lunghezze d'onda:

- 900 MHz  $\rightarrow \lambda = 33\text{cm}$
- 10 GHz  $\rightarrow \lambda = 3\text{cm}$
- 60 GHz  $\rightarrow \lambda = 5\text{mm}$

Copertura omnidirezionale



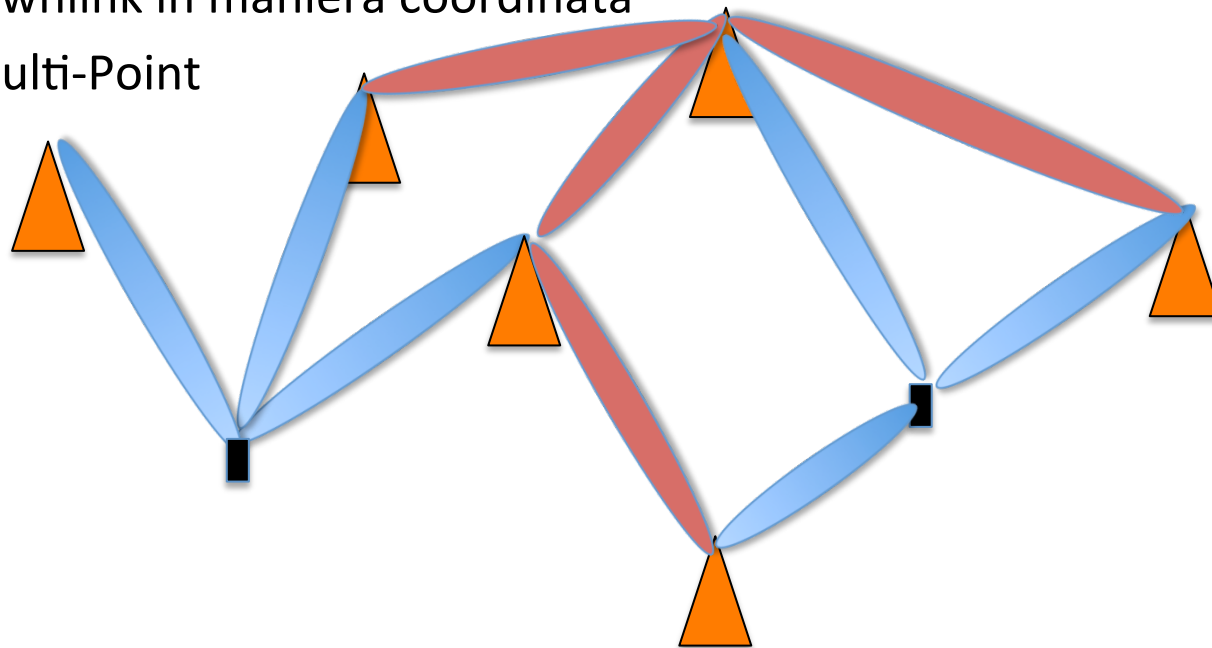
Copertura con beamforming



# Reti 5G

## Densificazione delle celle

- Il beamforming viene utilizzato non solo tra BS e UE, ma anche tra diverse BS
- La topologia stessa della parte backhaul della rete cambia da topologia ad albero e tutta su cavo ad una **topologia mesh** mista che utilizza connessioni dirette tra gli Access Points
- Ogni utente può essere coperto nello stesso momento da diversi APs, che trasmettono in downlink in maniera coordinata
- → Coordinated Multi-Point



# Reti 5G

---

## Effetto combinato di:

- Aumento di efficienza spettrale (sul singolo link): KPI = bits/sec/Hz
  - Riutilizzo spaziale: KPI = parallel spatial links per unit area
  - Utilizzo di tecniche basate su Unlicensed e Licensed Shared Access (LSA) basate su cognitive radio e dynamic spectrum access
- **Fino a 60x rispetto a LTE** dell'efficienza spettrale per metro quadro: bits/sec/Hz/m<sup>2</sup>