

# Sistemi di Telecomunicazione

ale-cci

2<sup>o</sup> Semestre 2018/19

# 1 Guadagno in potenza

$$P_{out} = gP_{in} \xrightarrow{10 \log_{10}} P_{out_{db}} = g_{db} + P_{in_{db}}$$

- $g < 1$ : Perdita di Trasmisione
- $L$ : Transmission Loss :=  $g^{-1} = \frac{P_{in}}{P_{out}}$

## 1.1 Attenuazione di tipo Radio

Sistemi di telecomunicazione su cao (Dal nome, Segnale si propaga lungo un cavo)

- $l$ : lunghezza del cavo
- $\alpha$ : coefficiente d'attenuazione  $\frac{dB}{Km}$

$$P_{out} = 10^{-\frac{\alpha}{10}l} P_{in}$$

Da fisica

$\cdot < 1$  Siccome  $\alpha$  e  $l$  sono positivi

$$g = 10^{+\frac{\alpha}{10}l}$$

$$L = 10^{-\frac{\alpha}{10}l}$$

$$L_{dB} = 10 \log_{10} L = \alpha \cdot l$$

Esempi	Frequenza	$\alpha$
Doppino Telefonico	10kHz	2
	100kHz	3
	300kHz	6
Cavo Coassiale	100kHz	1
	1MHz	2
	3MHz	4
Guida d'onda rettangolare	10GHz	5
Cavo in fibra Ottica	$4 \cdot 10^{14} Hz$	10

Per "combattere" l'attenuazione vengono usati i ripetitori

**Trasmissione Radio:** Perdita di potenza dovuta all'irradiazione stessa

- $l$ : distanza
- $\lambda$ : Lunghezza d'onda
- $\alpha$ : path loss exponent

$$L = \left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right)^2$$

$$C = \lambda f_c \quad f_c \text{ frequenza portante}$$

$$L = \left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right)^\alpha$$

$f_c$  è solamente espressa in  $GHz$ , quindi si ha che:

$$L_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} l \right)^2 + 20 \log_{10} 10^9 + 20 \log_{10} f_{c_{GHz}} = 92.4 + 20 \log_{10} l + 20 \log_{10} f_{c_{GHz}}$$

## 1.2 Tramissioni Cablate

$$L_{dB} = \alpha l$$

**Antenna Radio:** Sono dette **direttive**, se concentrano la potenza su un'unica direzione

Più l'antenna è direttiva, più è alto il guadagno

Esercizio

## 1.3 Formule di Friis

$$P_{out} = P_{in} \frac{g_T g_R}{\left(\frac{4\pi d f_c}{C}\right)^\nu} \rightarrow K \left(\frac{1}{d}\right)^\nu$$

- **Shadowing:** Fluttuazione dovuta a cambiamento dell'ambiente
- **Short Term Fading:** Fluttuazione a breve distanza, distribuita come la *distribuzione di Rayleigh*

## 1.4 Dominio Frequenziale

$$S_y(f) = S_x(f) |H(f)|^2$$

$B_c$ : Banda di Coerenza → Intervallo frequenziale in cui la risposta in frequenza del canale varia di poco

$B_c > B$ : Canale **NON** selettivo di frequenza, La risposta del canale “non” cambia su  $T_s$  (Tempo di fading) lento ( $T_s < T_c$ )

$B_c < B$ : Canale Selettivo in frequenza fading veloce: risposta cambia su  $T_s$  ( $T_s > T_c$ )

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_D}$$

$T_s$ : Tempo di simbolo

$$T_c = \frac{6}{16\pi f_D}$$

$f_D$ : Frequenza Doppler

## 2 Modello ISO-OSI

1. Physical
2. Data-Link
3. Network
4. Transport
5. Session
6. Presentation
7. Application

**Tabelle di Routing** Protocollo IP Riesce a trovare il percorso tra utente ed endpoint

### 2.1 Livello 1

perso

### 2.2 Livello 2

Trasmette i frame al nodo successivo

- Controlla che il link sia attivo
- Fornisce informazione ai livelli superiori
- Correzione errore per frame

**MAC:** Medium Access Control

**LLC:** Logical Link Control → controlla che il link sia attivo

### 2.3 Livello 3

Si occupa solo del **percorso logico** tra due punti, non compe vengono trasferiti i dati

Nasconde i livelli inferiori ai layer superiori rendendoli hardware-independent

### 2.4 Livello 4

Consegna messaggio tra due processi

### 2.5 Livello 5

Abilita, Modifica, Termina sessioni tra applicazioni

Più connessioni possono essere viste come una singola sessione

distingue i dati che arrivano tra “application data” (dati usati dalle applicazioni) e “session control data”

Usa dati dei layer 3&4 per monitorare la comunicazione tra applicazioni

Translation for naming services (google.com → 8.8.4.4)

### 2.6 Livello 6

Translation, Compression, Description and Encapsulation of Data, (Es: Html, JPG, Ascii...)

## 2.7 Livello 7

Fornisce servizi di comunicazione alle applicazioni, esempi ne sono: Http e FTP

## 3 TCP/IP

Inizialmente suddiviso in 4 layer:

- Host to Network
- Internet
- Transport
- Application

Ma se confrontato al modello OSI ne si possono riconoscere 5:

- Application
- Transport
- Network
- Data Link
- Physical

In una rete TCP/IP vengono usati 4 livelli di indirizzi

- Physical
- Logical
- Port
- Application-Specific

## 4 Struttura generale di un sistema di comunicazione

**Capacitá di canale ( $C$ ):** Massima velocitá a cui possono essere trasmessi i dati

**Data rate (bps):** Dati effettivamente comunicati

**BandWidth ( $B$ ):** la grandezza di banda del segnale trasmesso

**Bit Error Rate (BER):** Frequenza con cui avvengono errori di trasmissione

## 5 Modulazione

Aggiungere informazioni al segnale portante  $x(t)$

$$x(t) = A \cos(2\pi f t + \Phi)$$

$A$ : Ampiezza

$f$ : Frequenza

$\Phi$ : Fase

Carrier signal:  $x(t)$  su cui sono state modulate le informazioni Analog to analog conversion: Needed only if a bandpass is available

- Aplitude modulation
- Frequency modulation
- Phase modulation

## 5.1 Amplitude modulation (AM)

- $m(t)$ : Information signal
- $A_c \cos(2\pi f_c t)$ : carrier
- $f_c$ : Carrier frequency

Total Bandwidth:  $2B$

$$S(t) = A_c(1 + K_o m(t)) \cos(2\pi f_c t)$$

$$\Downarrow \mathcal{F}$$

$$S(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c) + K_o M(f - f_c) + K_o M(f + f_c)]$$

## 5.2 Frequency modulation FM

$$S(t) = A_c \cos(\theta(t)) \quad m(t) := \frac{d\theta(t)}{dt} = 2\pi f_c + 2\pi K_f m(t)$$

$K_f$ : Frequency derivation constant  $\frac{\text{Hz}}{\text{V}}$

## 5.3 Phase Modulation PM

$$S(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + K_p m(t))$$

La variazione di fase si manifesta come una variazione istantanea di frequenza, (proporzionale alla derivata di  $m$ )

Total Bandwidth:  $6B$

Le modulazioni lineari occupano meno banda → utilizzate per accomodare più utenti

Se l'informazione da trasmettere non è Analogica ma digitale, la modulazione si chiama Keying

### Amplitude shift Keying ASK

- $f$  è costante
- low bandwidth
- weak against interference

### Frequency shift Keying FSK

$$FSK(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 t) \\ \sin(2\pi f_2 t) \end{cases}$$

- More bandwidth required

## 5.4 Phase Shift Keying (PSK)

$$\text{PSK}(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft) \\ \sin(2\pi ft + \pi) \end{cases}$$

- More complex
- Strong against interference

## 5.5 Binary Phase Shift Keying (BPSK)

$$\text{BPSK}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \delta_c) \\ \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi\delta_c) \end{cases} \quad \text{con } 0 < t < T_b$$

- $T_b$  Tempo di Bit
- $E_b$  Energia di Bit

## 5.6 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

La fase della portante assume 5 valori separati di  $\frac{\pi}{2}$ . Ogni fase corrisponde ad una coppia unica di bit

$$S_{\text{QPSK}}(t) = \sqrt{2E_b T_b} \cos(2\pi f_c t + i \frac{\pi}{2}) \quad \text{con } i \in 0..3$$

La larghezza di banda é la metá della BPSK

Puó essere espressa come 2 BPSK, il bit-error-rate rimane lo stesso ma la Banda utilizzata raddoppia  
(X: Diagramma a costellazione)

## 5.7 Multi-? Phase and Amplitude modulation

(X: 16Qam, 16psk 16apsk ) Piú i punti sono vicini, piú sono sensibili al rumore

## 5.8 Capacitá di Canale AWGN (Additive White Gaussian Noise)

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

$$P_N = B \dot{N}_0 \quad \rho := \frac{R}{B}$$

$$\begin{cases} C = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_{in}}{B N_0} \right) \\ R \leq C \end{cases}$$

$$\frac{R}{B} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{E_b \cdot R}{N_0 B} \right)$$

$$\frac{R}{B} \leq \log_2 \left( 1 + \frac{R}{B} \gamma_b \right)$$

$$\rho \leq \log_2 (1 + \rho \gamma_b)$$

- $P_{in}$ : Potenza Segnale in ingresso
- $B$ : Banda del Canale
- $P_N$ : Potenza del Rumore Bianco (Gaussiano)
- $N_0$ : Densitá spettrale di potenza del rumore
- $\rho$ : Efficacia Spettrale
- $R$ : Data Rate Utilizzato
- $\gamma_b$ : Signal Noise ratio :=  $\frac{E_b}{N_0}$

$$\text{Rumore Bianco} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \rightarrow n(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$$

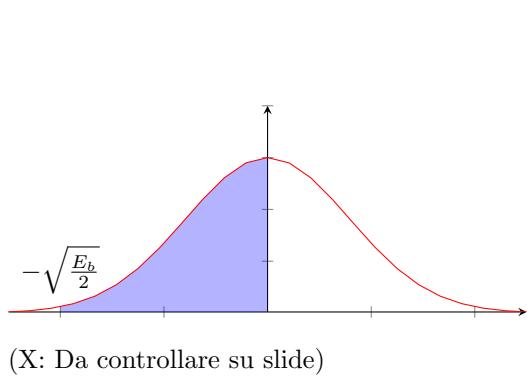
## 5.9 Calcolo Errore su BPSK

Ricordando che, da definizione:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2} dt$$

Calcolo l'errore come:



$$P_e = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n-\sqrt{E_b})^2}{2\sigma^2}} dn =$$

$$= \int_{-\infty}^{-\sqrt{E_b}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}} dn =$$

Per Simmetria  $\rightarrow = \int_{\sqrt{E_b}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}} dn =$

$$\begin{aligned} z &= \frac{n}{\sigma} \\ \sigma dz &= dn \end{aligned}$$

$$\rightarrow = \int_{\frac{\sqrt{E_b}}{\sigma}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz =$$

$$= \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2\sigma}} \right)$$

Per simmetria, stessi calcoli per  $-\sqrt{E_b}$ , Quindi:

- Trasmetto  $-\sqrt{E_b}$  ricevo  $+\sqrt{E_b}$ :

$$P_e|_{-\sqrt{E_b}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2\sigma}} \right)$$

- Trasmetto  $+\sqrt{E_b}$  ricevo  $-\sqrt{E_b}$ :

$$P_e|_{+\sqrt{E_b}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2\sigma}} \right)$$

Siccome sono due eventi indipendenti:

$$P_{-E_b} = P_{+E_b} = \frac{1}{2}$$

$$P_e = P_e|_{-E_b} \cdot P_{-E_b} + P_e|_{+E_b} \cdot P_{+E_b} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2\sigma}} \right)$$

## 5.10 Determinare Simbolo ricevuto da QPSK

(x: Grafico simbolo) Chiamato  $r$  il simbolo ricevuto

$$R = S + N$$

$$\text{con } S \in s_1, s_2, s_3, s_4 \quad PS = s_i = \sqrt{14}$$

$$N \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$$

Ricevuto  $R = r$ , il problema diventa trovare il simbolo  $(\bar{s})$  che minimizzi la probabilità d'errore

$$\bar{s} = s_i \quad \text{t.c.} \quad i = \underset{j \in 1 \dots 4}{\text{argmax}} P\{S = s_j | R = r\} =$$

Per la formula di Bayes Mista:

$$= \operatorname{argmax}_{j \in 1 \dots 4} \frac{f_R(r|S = s_j)P\{S = s_j\}}{f_R(r)} =$$

Dato che gli altri termini non dipendono da  $j$ :

$$= \operatorname{argmax}_{j \in 1 \dots 4} f_R(r|S = s_j) =$$

$R = S + N \rightarrow R$  é gaussiana a media  $s_j$

$$= \operatorname{argmax}_{j \in 1 \dots 4} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(r-s_j)^2}{2\sigma^2}}$$

Siccome exp é strettamente crescente:

$$= \operatorname{argmax}_{j \in 1 \dots 4} -(r - s_j)^2 = \boxed{\operatorname{argmin}_{j \in 1 \dots 4} |r - s_j|} \leftarrow \text{Distanza Euclidea}$$

## 6 Wired vs Wireless

Utilizzando gli stessi approcci di una rete cablata, su una rete wireless, si manifestano due principali problemi:

- Sul Wireless la Banda é molto piú ridotta
- Il canale é piú soggetto a fading che collision tra frame

Soluzioni:

- TDMA: Reserves time slots
- FDMA: Reserves Frequencies
- CDMA: Reserves Expansion Codes
- Random Access Techniques

### 6.1 FDMA

Frequency Division Multiple Access: Utenti suddivisi in frequenza

#### 6.1.1 FDD

Frequency division Duplex: Uplink e Downlink divisi in frequenze

(X: Grafico)

Piú suscettibile ad interferenze in frequenza

$$N_{max} = \frac{B}{B_c K}$$

#### 6.1.2 TDD

Uplink e Downlink divisi in intervalli di tempo

(X: Grafico)

### 6.2 TDMA

Time Division Multiple Access: Ad ogni utente é assegnato uno slot di tempo

(X: I due grafici)

### 6.3 CDMA

Code Division Multiple Access: Assegna ad ogni utente una sequenza di chip specifica e unica

Es: Maximal length sequences → Periodiche con periodo  $2^m - 1$

Chiamato  $x(n)$  un segnale (discreto) periodico

$$r_{xx}(l) = \sum_{n=0}^{2^m-1} x(n)x(n-l)$$

(X: Grafico coi punti)

$$r_{xx}(0) = \sum_{n=0}^{n-1} x^2(n) = 2^m$$

$r_{xx}(1) = 0$  Siccome mediamente il numero di +1 è uguale al numero di -1

### 6.4 DSSS Modulation

Direct Sequence Spread Spectrum

Chiamata  $m(t)$  la sequenza di bit da trasmettere

$$S(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} m(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) = \sqrt{E} m(t) \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

Schematizzato:

(X: Schema modulazione)

$$r(t) = m(t)p(t)\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t) + A_{int}(t)$$

$$p(t)r(t) = p(t)p(t)m(t)\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t) + p(t)A_{int}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t) + p(t)A_{int}(t)$$

Se N utenti vogliono trasmettere informazioni assegno ad ognuno id essi un codice di spreading unico

(Assumendo che tutti gli N codici di spreading siano quasi ortogonali tra di loro:  $r_{xy} = 0$  nell'autocorrelazione con  $x \neq y$ )

$S_N(t) = \sum_{i=1}^N = m_i(t)p_i(t)s(t)$ , Per ottenere  $m_k(t)$ , basta moltiplicare per il corrispettivo codice di spreading  $p_k(t)$

$$p_k(t)m_k(t) + \sum_{i \neq k}^N m_i(t) \cancel{p_i(t)p_k(t)} \approx 0$$

### 6.5 Vantaggi del CDMA

- Mis different users without any specific coordination
- Nodes doesn't need to be synchronized
- Strong against noise

### 6.5.1 Numero utenti supportati dal CDMA

$$\text{SNR} = \frac{P_S}{P_{th} + P_{int}}$$

- $P_S$ : Potenza di Segnale
- $P_{int}$ : Potenza Interferenza
- $P_{th}$ : Potenza termica =  $F K T_0 R_b$ 
  - F Noise figure
  - K Costante di Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-23}$
  - $T_0$  Temperatura Ambiente =  $290K$
  - $R_b$  Bit Rate

$$\text{SNR} \approx \frac{P_S}{P_{int}} = \frac{g P_r}{(N+1) P_r} \xrightarrow{N \gg 1} \frac{g}{N} = \frac{B}{R_b N}$$

Se viene richiesta una SNR minima

$$\begin{cases} \text{SNR} \geq \text{SNR}_{min} \\ \text{SNR} = \frac{B}{R_b N} \end{cases} \Rightarrow N_{max} = \frac{B}{R_b \text{SNR}_{min}}$$

- $N$ : Numero di interferenze
- $B$ : larghezza della banda =  $g R_b$
- $P_r$ : Potenza ricevuta
- $g$ : Spreading factor ( $> 1$ )

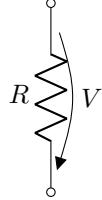
$N_{max}$  é il massimo numero di utenti attivi contemporaneamente, é possibile migiorare le prestazioni del CDMA, modificando la disposizione delle antenne trasmetttrici

$$N_{max} = \frac{B}{R_b \text{SNR}_{min}} K \quad \text{con} \quad K = \frac{G_A G_\nu}{H_0}$$

- $H_0$  Interferenza antenne vicine
- $G_A$  Sectorization Gain factor
- $G_\nu$  Voice activity factor  $\approx 2.5$  (pause nella conversazione)

## 7 Rumore Termico

Bianco, a media nulla



$$\bar{V} = 0$$

$$V^2 = \frac{2\theta^2 K^2 T^2}{3h} T$$

- $R$ : Resistenza
- $K$ : Costante di Boltzman  $1.37 \cdot 10^{-23} [\frac{W_s}{K}]$
- $h$ : Costante di plank  $6.62 \cdot 10^{-34} [Ws^2]$
- $T$ : temperatura [ $K$ ]

$V$  ha una distribuzione Gaussiana:

$$\bar{V} = 0$$

$$\bar{V}^2 = \text{VAR}[V]$$

$S_V(f)$ : (Densitá spettrale) é approssimabile ad una costante fino a valori di  $f \approx 10^{12} Hz$

Da un punto di vista ingegneristico:

$$S_V(f) \approx \frac{KT}{2} = \frac{N_0}{2}$$

Potenza di rumore:

$$P = \frac{1}{2} B \frac{N_0}{2} = BN_0 = KT_0 B$$

Banda di rumore equivalente su filtro con risposta  $H(f)$ :

$$P_{Noutput} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{N_0}{2} |H^2(f)| df$$

$B_{eq}$  := Banda di un filtro con risposta in frequenza rettangolare, ed in uscita la stessa potenza di rumore

$$P_{Nout} = B_{eq} \cdot \frac{N_0}{2}$$

Eguagliando le due espressioni otteniamo che:

$$B_{eq} \frac{N_0}{2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{N_0}{2} |H(f)| df$$

Temperatura Equivalente di Rumore: Varie sorgenti di rumore si comportano similmente al rumore termico

$$F(f) = \frac{S_{nf}(f)}{GS_{ni}(f)} \rightarrow F = \frac{P_{no}}{GP_{ni}}$$

$$\begin{cases} GP_{Ni}F = P_{No} \\ P_{No} = (P_{Ni} + kT_e B)G \end{cases}$$

$$\mathcal{G}P_{Ni}F = (P_{Ni} + KT_e B)\mathcal{G}$$

$$F = \frac{P_{Ni} + kT_e B}{P_{Ni}} = \frac{kT_0 \mathcal{B} + KT_e \mathcal{B}}{kT_0 \mathcal{B}} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} \leftrightarrow T_e = T_0(F - 1)$$

## 8 Confronto fra T/F/C-DMA

- **TDMA** è più flessibile del **FDMA**, siccome il numero di utenti non è fissato a priori
- **TDMA** ha problemi di sincronizzazione tra gli utenti che devono trasmettere
- **CDMA**, Numero di utenti non è prefissato, basta associare ad ognuno di essi una QoS (Quasi orthogonal Spread signal)
- **FDMA** lavora con bande molto strette → molto suscettibile a forti disturbi a breve frequenza
- **CDMA** più resistente alle forti interferenze su breve frequenza, siccome vengono “schiacciate” dalla sequenza di spreading

### 8.1 Handoff comparison

- **FDMA**: Brusco cambio di frequenza con la quale si trasmette
- **TDMA**: Mobile assisted Il client informa la BSC su come cambia il segnale
- **CDMA**: Entrambe le celle usano la stessa frequenza, se viene mantenuto lo stesso codice di spreading non ci sono problemi

## 9 Random Access Protocols

Tutti i protocolli ad accesso multiplo trasmettono su un unico canale.

Nel caso in cui due o più nodi trasmettano contemporaneamente avviene una collisione.

Per comunicare, i nodi possono utilizzare solamente il canale

In una rete tra computer, non tutti i nodi trasmettono continuamente, quindi partizionare equamente le risorse del canale renderebbe la rete non del tutto utilizzata

Idealmente: se il Broadcast channel ha una bit rate R

1. Quando M nodi vogliono trasmettere, lo fanno con bit-rate  $\frac{R}{M}$
2. Decentralizzata: Non ci deve essere uno a coordinare le trasmissioni; i nodi non dovrebbero essere sincronizzati

### 9.1 Algoritmo ALOHA

#### 9.1.1 Aloha Pure

Pros:

- No synchronization needed

Procedure:

1. When new frame is received transmit it immediately
2. on collision retry after a random interval

#### 9.1.2 Aloha Slotted

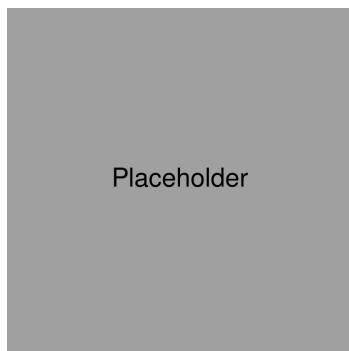


Figure 1: Slotted aloha

Assumptions:

1. All frames have the same size
2. Time is divided in equal slots
3. Nodes transmit frames only at the beginning of a slot
4. synchronization is needed
5. Collision are always detected

Procedure:

1. New frame received transmit

2. while no collisions are detected send next slot
3. If collision: start transmission in the next slot with probability P until success

## 10 Protocollo Ethernet CSMA

Se il pacchetto é molto lungo rispetto ai tempi di propagazione termina la trasmissione per non intasare la rete.

Con il protocollo ethernet é possibile misurare l'energia in un cavo, confrontarla con quella ricevuta per poter identificare facilmente i casi di interferenza

Principali problemi con il protocollo Wifi:

- Non é possibile utilizzare lo stesso sistema di error-detection siccome la potenza del segnale ricevuto dipende dalla distanza e dalla vicinanza dagli altri utenti
- Il segnale ethernet é quasi sempre a bus condiviso

Struttura frame livello 2:

- **Preamble** 8 byte, 7 con 10101010 1 con 10101011; Utilizzati per sincronizzare il ricevitore con il trasmettitore
- **Destination Address**: Target machine / Broadcast
- **Source Address**: Source machine MAC address
- **Type**: Protocollo di livello 3 (ex: IP)
- **CRC**: Cycling Redundance Check; Controlla solo se si sono verificati errori, non si occupa della correzione

### 10.1 Ethernet (Standard IEEE 802.3)

CSMA/CD 1 Persistent

## 11 5G

### 11.1 Advanteges over 4G

- Maggiore disponibilità di banda
- Bassa latenza: da 9 a 10 ms; Dovuta alla minore distanza cloud-server  
Multiaccess Edge Computing: Place more computing resource closer to the point of data creation  
Very useful for AR/VR
- Maggior numero di dispositivi connessi per km<sup>2</sup> (1 mln)
- Peak data rate from 1Gbs to 20Gbs
- Available spectrum from 3GHz to 30GHz
- Higher data traffic; from 7.2 Exabyte/Month to 50 Exabyte/Month

Non ancora pienamente utilizzato, verrà utilizzato maggiormente con *IOT*

5G will become the backbone of Smart Cities, driverless car... (IOT, Industria 4.0)

## 12 UMTS

La terza generazione GSM in europa IS-95 negli Stati uniti, Capirono che la telefonia cellulare era un fenomeno di massa. Discussero per avere una terza generazione unica.

Alla fine lo standard che doveva prendere piede era IMT-2000. Tutte le entità cercarono di spingere le proprie soluzioni significative rispetto alla 2<sup>a</sup> generazione → dovevano reggere applicazioni multimediali.

Il sistema doveva supportare la commutazione di circuito (telefono) e pacchetto (tipo internet) ed il tasso di trasmissione in continuo aumento ( $2 \frac{Mb}{s}$ )

- 1G → Vari sistemi sparsi
- 2G → Sistemi cellulari e il GSM e IS-95 anche se ci sono stati altri sistemi come per esempio IRIDIUM (costellazione di satelliti) o global
  - ⇒ Fornire connettività connessione di satellite geostazionario anche se la gestione ed i costi erano assurdi

Con la 3<sup>a</sup> Generazione si vuole arrivare ad una famiglia di standard, applicabile in tutti i continenti

**UMTS:** (Standard Principale) e poi **MC CDMA** (portanti multiple)

Per coordinare gli sforzi di tante entità è stato creato un associazione 3GPP Era una partnership per uno standard comune, ne facevano parte: ZTSI, ARIB ed ANSI

Alla fine degli anni 90 è stato introdotto la rete di accesso terrestre **UTRA** Interfaccia radio **WCDMA** → Bande più larghe del CDMA classico e poteva funzionare sia in modalità TDD sia una modalità FDD

È più facile allocare una banda in uplink e downlink

Con il TDD c'è più flessibilità

### 12.1 Tasso di trasmissione

- **GSM** → traffico dati  $36 \frac{Kb}{s}$
- **GPRS** → Potenziale a livello fisico che arrivava fino a  $171.2 \frac{Kb}{s}$  (teorico)
- **EDGE** →  $553.6 \frac{Kb}{s}$
- **UTRA** (a livello teorico) →  $1920 \frac{Kb}{s}$

### 12.2 Differenze tra W-CDMA e GSM

- Maggiore spaziatura tra plrtanti
- Maggiore frequenza di controllo

### 12.3 frequenza di controllo

nel GSM non importa la potenza relativa delle trasmissioni, perché ognuno ha la sua frequenza → non ci sono interferenze

Con la 3<sup>a</sup> generazione viene introdotto un controllo in potenza

### 12.4 Controllo qualità

legato alla pianificazione delle reti (dipende dal numero di celle per kluster e come vengono distribuite le risorse) Con la 3<sup>a</sup> generazione nascono gli algoritmi di gestione delle risorse

## 12.5 Diversità di frequenza

Serve per prevenire Fading nel canale;

- **GSM** utilizzava frequency hopping
- **W-CDMA** siccome il canale è molto grande la banda non viene completamente distrutta (notch); Vengono sfruttati con ricevitori **Rake**

## 12.6 dati e pacchetto

- GSM può assegnare all'utente più time slot successivi
- con 3g viene potenziato lo scheduling per la trasmissione dei pacchetti → il sistema assegna più risorse per aumentare la velocità di trasmissione in downlink

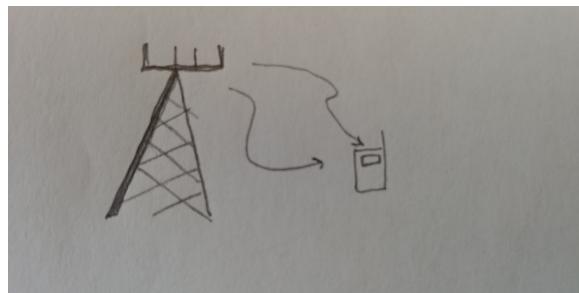


Figure 2: Diversità di cammino

## 12.7 Diversità di trasmissione in downlink

Antenne multiple in trasmissione ed antenna unica in recezione → diversità di trasmissione

Usando antenne multiple in recezione, aumenta la velocità di canale esponenzialmente; (Con **5G** verranno utilizzate almeno 2 antenne per device)

Per garantire l'ottimizzazione dell'assegnazione delle risorse → 4G introduce il concetto di "negoziazione" delle risorse attraverso *Radio Bearer* → Canale di trasporto che consente di negoziare dati (data bearer) o caratteristiche a livello fisico (Signal bearer)

Gli attributi definiti da questi pacchetti di controllo riguardano:

1. throughput
2. Ritardo trasmissivo
3. Tasso di errore massimo tollerabile

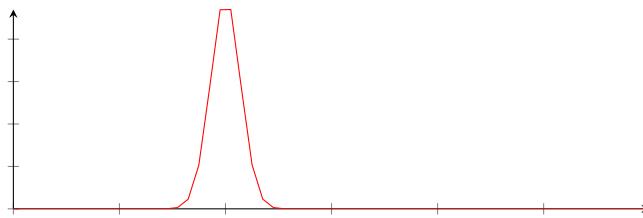


Figure 3: Classe Conversazionale

⇒ Tutto questo porta all'introduzione del concetto di classe di **QoS Quality of Service**

## 12.8 Classi di QoS di UMTS

- **Conversazionale:** applicazione principale per voce, videogiochi e videotelefonia;
  - deve essere preservata l'interazione temporale tra le informative del flusso
  - Bassa varianza dei ritardi
  - è sopportabile la perdita di alcuni frame, ma non il ritardo eccessivo dell'arrivo di ogni frame
- **Streaming:** Streaming multimediale
  - no vincoli su ritardi
  - perservazione temporale tra i frame

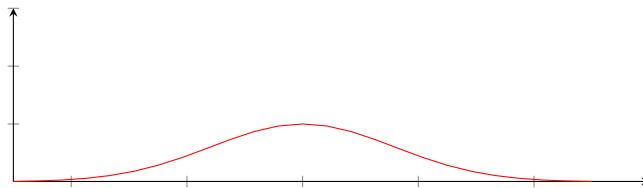


Figure 4: Grafico Streaming

- **Interattiva:** Cadono i requisiti delle entità informative, siccome non è più presente un flusso di dati
  - ottenere risposta da entità remota
  - preservare integrità dei dati
- **Background:** Chiede solo di preservare l'integrità dei dati, (Es: Download delle email in background)
 

Hanno la minore priorità rispetto alle altre classi di traffico

Sistema UMBS è di fatto formato da 2 sottoinsiemi (che sono l'evoluzione del BSS e NSS)

**NSS** → *Core Network* (CN) → autenticazione utenti connessi, commutazione autenticazione connessione, interconnessione verso reti esterne (di altri provider o internet)

**BSS** → *UMTS Radio Access Network (UTRAN)*

Nella fase iniziale del 3G coesistenza di sistemi di 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> generazione

Con la 3<sup>a</sup> generazione si inizia ad affiancare la rete d'accesso con la rete d'accesso *UTRAN*

**CS:** Circuit switching

**PS:** Packet Switching

**RNC:** Radio network Controller → novità introdotta dalla 3G, Collegati con interfaccia **Iur**, idealmente sono tutti connessi tra loro

Idea del 3G: Delegare all'esterno più responsabilità ed intelligenza, mentre lascia all'interno della core Network la tariffazione

**UTRAN** → formata da vari RNS, ognuno dei quali è formato da diversi Node B. Ogni Node B gestisce un certo numero di celle (da 3 a 6)

In ogni cella è supportato FDD e TDD

## 12.9 Interfacce Considerate nello Standard

- **UU** → Interfaccia telefono e Node B, ha il compito di
  - trasportare i servizi per l'utente
  - Gestione della mobilità: Trasporto delle informazioni necessarie
- **IU** → Interfacciamento tra *UTRAN* e *Core Network*
  - **Iu-CS** Circuit Switching → per traffico vocale
  - **Iu-PS** Packet Switching → per traffico dati
- **Iub** → Interfaccia di collegamento fra Node B ed il proprio RNC
- **Iur** → Collega RNC appartenenti a diversi RNS

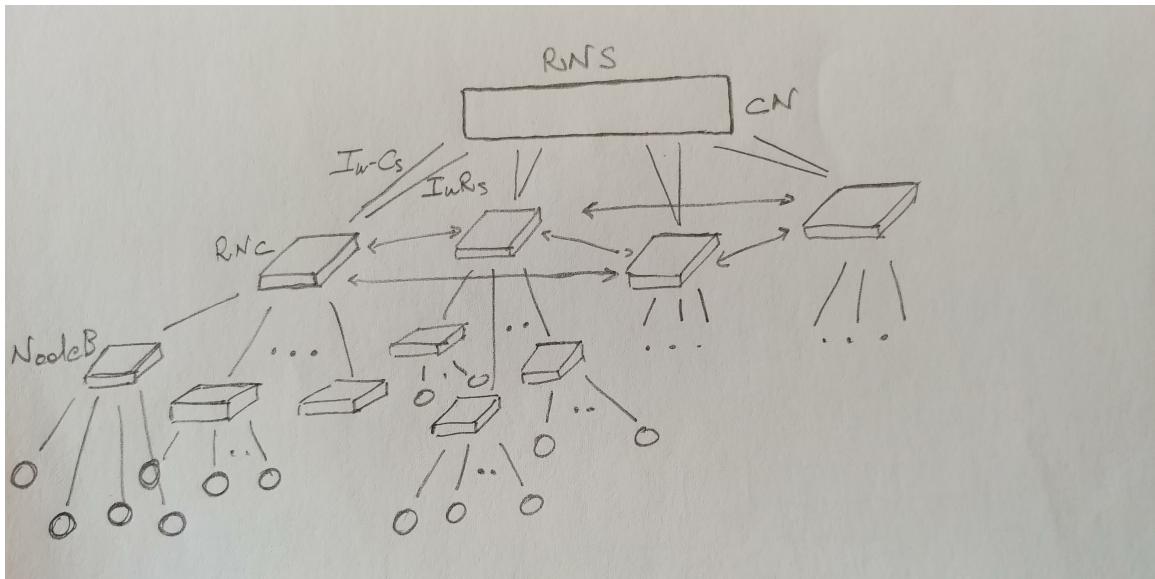


Figure 5: Architettura UTS

La novità a livello architetturale dell'UMTS è la presenza degli RNC nella *UTRAN* ⇒ RNC gestisce tutte le funzionalità lato utente:

- Mobilità
- Assegnazione risorse

Senza passare da core network

Node B

- Realizza le trasmissioni radio (modulazione, potenza trasmissiva, gestire il controllo di potenza)
- Riceve dal proprio RNC le indicazioni sulle risorse da assegnare agli utenti
- Effettuare misure sulla potenza e QoS

**HSPA** High Speed Packet Access

Dispositivi di generazioni successive devono garantire il funzionamento delle generazioni precedenti fino a quando non vengono dismesse

## 13 LTE (4G)

Machine to machine legata ad IOT (dovrebbe rimanere piccola siccome i dati trasmessi sono pochi)

Con LTE le comunicazioni dati iniziano ad essere deflesse sulla comunicazione dati

Obiettivo **LTE**: supportare sempre più traffico dati

3GPP creata per generare un potenziale standard per la 4<sup>a</sup> generazione

### 13.1 Motivation for LTE

- Higher data rates  $\Rightarrow$  More spectral efficiency
- Sistema completamente ottimizzato per packet switching non *Commutazione per circuito*
- Higher quality service
  - Aumentare l'esperienza di always on
  - Suddivisione logica tra *User Plane* e *Control Plane* (Non visibile all'utente)
- Infrastruttura più economica
  - Semplificazione architettura con riduzione elementi in rete

### 13.2 LTE performance requirements

- Data rate con picchi di  $100 \frac{Mb}{s}$ , massima banda assegnabile ad un utente  $20MHz$ 
  - Da 3<sup>a</sup> Generazione ci si è accorti che il traffico è asimmetrico, downlink è molto più utilizzato rispetto all' uplink, per questo motivo, l'efficienza spettrale dell'uplink è la metà rispetto a quella del downlink
- Cell range ideale di qualche Km, idealmente si puntava ad avere celle di 30 e 100Km di raggio
- Cell Capacity fino a 200 utenti attivi per cella
- Mobilità (Sistema ottimizzato per basse mobilità)
- Latency
  - User Plane (nell'ordine di pochi millisecondi  $\approx 5ms$ ), essenziale per AR & VR
  - Control Plane
- Improved Spectral efficiency
- Broadcasting: Tutte le applicazioni legate al Digital Video Broadcasting, (es Eventi in diretta)
- Ottimizzato verso l'IP, per essere direttamente compatibili con Internet
- Bande scalabili (Attraverso **OFDMA** consente assegnazioni flessibili di risorse frequenziali)
- Co-esistenza con precedenti versioni delle reti cellulari

### 13.3 3 principali limitazioni del 3G

1. Massima bit rate
2. 3<sup>a</sup> gen non era stata progettata per tenere conto dei vincoli sulla latenza, diventa difficile utilizzare applicazioni interattive  
Interazioni ancora peggiori con il resource assignment
3. 3G richiedeva dei terminali complessi, per funzionare bene c'era bisogno utilizzare dei ricevitori RAKE (molto complessi), i quali richiedevano un grande consumo di batteria

Latenza := Round trip delay

Struttura 4G: Core Network + parte di controllo; Scompare l'RNC → Prima semplificazione rispetto alla 3<sup>a</sup> generazione

### 13.4 LTE/SAE Key features

SAE := System Architecture Evolution

**E-UTRAN:** Evolved UTRAN, parte d'accesso

**eNB:** Evolved Node B, parlano direttamente con un Gateway

Esistono due tipologie di Gateway

**P-GW:** Packet Data Network Gateway

**EPC:** Evolved Packet Core

Architettura semplice dal punto di vista dell'user plane: 3 passi per raggiungere l'esterno

A livello di controllo gli eNB si collegano all'MME *Mobility management entity*

HLR (Home location register) e VLR vengono integrati nell'HSS

PCRF, si occupa della tariffazione

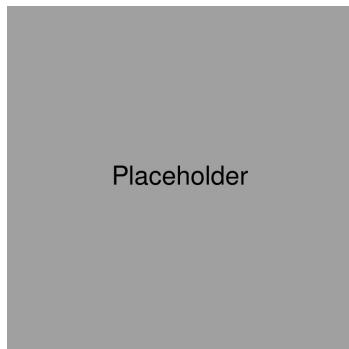


Figure 6: Architettura LTE

Si può notare la suddivisione tra più livelli nell'architettura dell'LTE (Figura 6)

LTE in uplink viene utilizzato SC-FDMA, in downlink OFDMA

HARQ: Garantisce ritrasmissione selettiva di pacchetti persi

Da punto di vista dell'accesso, si concentra tutto sugli eNB

Ruoli delegati all'eNB

- Resource Scheduling

- QoS Aware
- Autoconfigurante, idea: installare eNB e lui doveva autoconfigurarsi rispetto alla sua posizione nella rete
- Scompare completamente il CS domain, viene tutto orientato al Packet Switching
- IETF: Internet Engineering Task Force, si occupa di standardizzare qualsiasi protocollo legato ad internet,  
fondamentalmente libera, per proporre qualcosa di nuovo vengono richiesti degli RFC (Request For Comments)
- Si occupano di sviluppare i protocolli, non di come vengono trasmessi i dati
- Entra lo standard (MIP-v6, i.e. IPv6)
- 4G considerava già di supportare protocolli per “IP in mobilità”
- Prepared for Non-3GPP Access  
ePC deve essere in grado di gestire flussi informativi non necessariamente legati a rete cellulare, ma anche da access point WiFi

### 13.5 Key Features

- al posto di NodeB arriva eNB
- Scompare RNC Delegando le capacità gestionali all'eNB, il sistema diventa più semplice e reattivo
- Transport Layer (trasporto informazione): tutto diventa orientato all'IP
- Resource Scheduling in Uplink e Downlink

eNB Contiene uno scheduler che assegna le risorse a tutti gli utenti connessi

Idea fondamentale per rendere possibile assegnazione dinamica delle risorse

**Sistemi multiportante** Con CDMA veniva assegnata tutta la banda e si sperava che i notch fossero pochi rispetto alla grandezza di banda,

⇒ approccio più efficiente, dividere banda in più bande piccole ed assegnarne un diverso numero ad un unico utente: Vengono assegnate solo quelle dove il canale ha una ‘buon’ risposta, in modo da utilizzare al massimo possibile ogni porzione di banda

**OFDM:** Orthogonal Frequency Division Modulation

**HARQ** (H, H+): Hybrid Automatic Retransmission reQuest Cercare di accelerare il più possibile la trasmissione, non interrompendo il flusso

### 13.6 LTE key parameters

Ogni risorsa frequenziale prende il nome di **Resource Block**, e corrisponde ad una sottobanda di  $180\text{ KHz}$ . Vengono assegnati tra i 6 ed i 100 blocchi di risorse in base al tipo di richiesta

Protocolli di accesso multiplo e modelli di scheduling sono identici,

**OFDMA** legato all'OFDM, Include anche il livello fisico

In Uplink, anche se ognuno ha una singola antenna, nel caso di Cooperazione viene creata una *Antenna Array* → Multiuser Collaborative MIMO (Mai implementata)

Uplink max:  $75\text{ Mbps}$

## 14 Protocollo LoRa

Tecnologia (LPWAN: Low Power Wide Area Network), Bassto su modulazione CSS nel 2014

Utilizzato a livello industriale per connettere dispositivi (IoT),

Da tenere conto per protocolli utilizzati nell'IoT

- batteria
- larga copertura
- sicurezza
- costo

LPWAN: come reti cellulari ma ottimizzate per *IoT/M2M*, (topologia a stella)

Caratteristiche:

- Wide range
- Low power
- Low cost
- Low data-rate
- Unlicensed bands

LoRa é il livello fisico su cui LoRaWAN lavora; LoRa é il livello fisico

Comunicazione device-gateway in lora, gateway-network via ip

### 14.1 livello fisico

Modulazione basata su Chirp Spread Spectrum (CSS): Frequenza Aumenta Progressivamente

Spreading Factor: Quanto un simbolo viene “allargato” nel tempo, ogni volta che viene incrementato di 1, raddoppia il tempo di trasmissione ed il consumo di energia

#### 14.1.1 Composizione frame LoRa

1. Preamble, serve a stimare la frequenza utilizzata e la qualità del canale
2. Inizio della data Unit di livello fisico: Il dispositivo comunica la fine del preamble per iniziare a trasmettere i dati
3. dati

Air Time: Quanto deve stare acceso il chip per trasmettere dei dati

$T_{off}$  Duty Cycle: Tempo che ‘devo stare zitto’ dopo aver trasmesso (Duty Cy

$$T_{air} = T_S(n_{preamble} + n_{payload} + 4.25)$$

$$T_{off} = T_{air} \left( \frac{1}{d} - 1 \right)$$

#### 14.1.2 Capture Effect

Fenomeno associato con FM reception, dove solo il segnale più forte ( o più vicino) sarà demodulato

## 14.2 Livello MAC (LoRaWAN)

TTN: Server di rete

Esistono 3 tipi di classi

- **A:** Sensori alimentati a batteria (A sta per supportati da all devices) piú efficienti dal punto di vista energetico, uplink regolato da Aloha
- **B:** (Attuatori alimentati a batteria) Beacon, sincronizzazione tra nodi e gw tramite beaco
- **C:** Attuatori alimentati a rete elettrica in Continuous listening

Per i dispositivi di classe A c'è una finestra di downlink dopo ogni trasmissione; Dopo  $t_1$  secondi, apre una receiving slot a stessa frequenza e spreading factor della trasmissione

Se riceve un pacchetto di downlink finisce la trasmissione col gateway

Se non lo riceve, dopo  $t_1+1$  secondi apre una nuova frequenza di trasmissione con SF e altro prestabilito

Siccome utilizza Slotted Aloha ci deve essere una perfetta sincronizzazione tra end-device e gateway

Tra i messaggi piú importanti trasmessi ci sono i MAC Commands, utilizzati per impostare potenza, spreading factor ...

Adaptive Data Rate: Cambia Spreading factor per ottimizzare l'energia consumata, algoritmo attuale si basa su una stima dell'SNR dagli ultimi pacchetti ricevuti

## 14.3 Architettura di rete e Sicurezza

(X: Immagine slide 63)

Quando un nodo trasmette, tutti i gateway nel range trasmisivo ricevono un pacchetto; é il server che sceglie quale pacchetto prendere in considerazione, in base alla potenza del segnale ricevuto

...

Network server:

- Gestisce le join
- Controlla che non ci siano pacchetti duplicati
- Decide a quale gateway inviare messaggio di downlink

Application Server: Riceve i pacchetti, schedula le risposte e decripta il payload

Per identificare i nodi univocamente:

- DeviceEUI: Indirizzo a 64 bit come mac address
- DevAddr: indirizzo 32 bit generato da Network (Parallelo dell'IP)
- AppEUI: identificato univocamente
- Fport: Identifica univocamente (App/server) parallelo di TCP/IP

## 14.4 Concludendo

- Lunghe distanze
- Lunga durata della batteria
- cheap devices
- infrastruttura semplice

Scalabilitá ridotta

...

## 15 OFDM

Consente di avere portanti multiple → Combatte in maniera efficace l'evanescenza da cammini multipli

Efficiente per assegnazione spettrale

Nell'LTE la distanza tra le portanti é di circa  $15kHz$

Schema dell'OFDM a slide 291:

- Sorgente di dati
- Modulatore
- Parallelizzatore ( $1:N \rightarrow$  flusso entrante viene scomposto in  $N$  flussi paralleli, creando  $N$  stream di simboli)
- Invers FFT (Evoluzione della trasformata di fourier): Avendo in ingresso  $N$  stream di dati, IFFT porta in un dominio di simboli OFDM

Avendo una spaziatura di portanti di  $15kHz$ , quando si passa attraverso  $1:N$ , Ogni flusso di dati 'spaccato' ha una sua sottobanda

- Deparallelizzatore (Da  $N$  a 1)
- Prefisso ciclico

### 15.1 Pulse shaping and spectrum

Slide 293

Segnale piú facile da trasmettere sinc, trasmettendo un impulso rettangolare → sync

Da slide 294: Una serie di impulsi, ricevuti in maniera diversa con diversi ritardi.

A livello temporale si riceve la somma dei segnali ritardati, i quali possono interferire tra di loro (Interferenza da commino multiplo)

Ricevitori **RAKE** Sfruttano l'evanescenza da cammini multipli per potenziare il segnale

1<sup>a</sup> soluzione intuitiva (296): Aggiungere un periodo di guardia (GP): Ritardo tra trasmissione dei simboli Risolve solo interferenza intersimbolica, non danneggia simboli successivi

L'elaborazione dei segnali diventa molto piú semplice, ma é lento, siccome il periodo di Guardia é tempo non utilizzato → Non efficiente

Un altro problema lo si ha se si manifestano ritardi piú alti del periodo di guardia

Supponendo di utilizzare comunque questo approccio, per proteggersi dalle interferenze residue: Una delle repliche ricevute é più forte delle altre. Supponendo che l'interferenza avvenga solamente all'inizio del simbolo: Prefisso e Suffisso ciclico (298)

Prefisso ciclico: Prendere l'ultima parte del simbolo e la mette all'inizio

Suffisso ciclico: Lo stesso solo che prende la prima parte e la mette alla fine del simbolo

**Limitazione modulazione a singola portante** La percentuale del tempo in cui viene trasmesso un simbolo di dati

$$E = \frac{T_{SYMBOL}}{T_{SYMBOL} + T_{CP}}$$

## 15.2 Multi Carrier Modulation

Generalizzazione FDMA

Esistono ancora le sottobande, ma vengono assegnate tutte ad un unico utente, su ogni sottobanda viene trasmesso un segnale

Per evitare di perdere risorse, si cercano di fare le sottobande più vicine possibili, ma se sono troppo vicine si rischia l'interferenza da portanti adiacenti

## 15.3 OFDM

Impulso utilizzato: Rettangolare

Densità spettrale in potenza  $\propto$  al quadrato della sinc

Idea OFDM: Impacchettare densità spettrali di potenza mantenendo ortogonalità e sfruttando gli zeri delle sinc (305)

## 15.4 OFDM ad accesso multiplo

Diversi approcci:

1. slide 309 (Un unico trasmettitore)
2. TDMA (Trasmettitori multipli)

Limitato: Se solo uno deve trasmettere, molte risorse rimangono inutilizzate

Introdotto il concetto di blocco di risorse: Posso assegnare le risorse in modo diverso in base alle esigenze degli utenti (Slide 311)

12 sottoportanti formano un blocco di risorse

Le sottoportanti vengono assegnate in base alla risposta dei vari utenti sul canale di comunicazione

(slide 319): Superficie gialla presa in un istante temporale (proiezione su asse z-frequenza): Come cambia la risposta in frequenza del canale all'avanzare del tempo, cambia in modo regolare

Blu: per un altro utente (non sono uguali giallo-blu)

La base station ad un certo istante guarda le risposte in frequenza ed in base ad esse sceglie a quale utente assegnare le sotofrequenze

(Scheduling utilizzato nei sistemi di 4<sup>a</sup> generazione, tipicamente funzionano in modalità TDD, (Trasmissioni suddivise in Uplink e Downlink). Tra le due fasi c'è una fase di negoziazione, dove vengono riassegnate le risorse per il successivo Uplink/Downlink

Utilizza efficientemente le risorse del canale

LTE utilizza OFDMA in Downlink; Per l'Uplink SC-FDMA

### SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access

Funziona molto bene per valori relativamente bassi di PAPR

PAPR: Peack to Average Power Ratio (Rapporto di potenza fra picco e media), Caratterizza la qualità del segnale trasmesso

(Slide 318) Come viene implementato l'OFDMA nell'LTE

5G Inizierà a funzionare utilizzando l'OFDMA come formato di modulazione

(323) Durata di uno slot in base alla grandezza del prefisso ciclico

LTE modalità FDD (325)

LTE modalità TDD (326) Configurazione

- Downlink
- Sincronizzazione
- Uplink
- Uplink
- Downlink
- Sincronizzazione
- Uplink
- Uplink
- Uplink

In basso a sinistra (sempre 326) Configurazioni personali per ogni utenti, assegnate automaticamente tenendo conto dello stato dell'utente

In un blocco di risorse non è detto che venga utilizzato lo stesso formato di modulazione