

Sistemi di Telecomunicazione
ale-cci
2^o Semestre 2018/19

Contents

1 Guadagno in potenza	4
1.1 Attenuazione di tipo Radio	4
1.2 Tramissioni Cablate	5
1.3 Formule di Friis	5
1.4 Dominio Frequenziale	5
2 Modello ISO-OSI	6
2.1 Livello 1	6
2.2 Livello 2	6
2.3 Livello 3	6
2.4 Livello 4	6
2.5 Livello 5	6
2.6 Livello 6	6
2.7 Livello 7	7
3 TCP/IP	7
4 Struttura generale di un sistema di comunicazione	7
5 Modulazione	7
5.1 Amplitude modulation (AM)	8
5.2 Frequency modulation FM	8
5.3 Phase Modulation PM	8
5.4 Phase Shift Keying (PSK)	9
5.5 Binary Phase Shift Keying (BPSK)	9
5.6 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)	9
5.7 Multi-? Phase and Amplitude modulation	9
5.8 Capacitá di Canale AWGN (Additive White Gaussian Noise)	9
5.9 Calcolo Errore su BPSK	10
5.10 Determinare Simbolo ricevuto da QPSK	10
6 Wired vs Wireless	11
6.1 FDMA	11
6.1.1 FDD	11
6.1.2 TDD	11
6.2 TDMA	11
6.3 CDMA	12
6.4 DSSS Modulation	12
6.5 Vantaggi del CDMA	12
6.5.1 Numero utenti supportati dal CDMA	13
7 Rumore Termico	13
8 Confronto fra T/F/C-DMA	14
8.1 Handoff comparison	14
9 Random Access Protocols	15
9.1 Algoritmo ALOHA	15
9.1.1 Aloha Pure	15
9.1.2 Aloha Slotted	15
10 Protocollo Ethernet CSMA/CD	17
10.1 Struttura di un frame Ethernet	17
10.2 Ethernet (Standard IEEE 802.3)	17

10.3 Collision Detection	17
10.4 Binary Exponential Backoff	17
10.5 Efficenza	17
10.6 Ricezione dei Frame	18
11 WiFi CSMA/CA 802.11	18
11.1 Hidden and Exposed Terminal Problems	18
11.2 Wi-Fi Trivia	18
11.3 Standard 802.11b	19
11.4 Standard 802.11g	19
11.5 Standard 802.11a	19
12 Personal Area Network (PAN)	20
12.1 Bluetooth 802.15.1	20
12.1.1 Architettura del Protocollo	20
12.2 Formato pacchetto bluetooth	20
12.3 Possibili stati di un dispositivo bluetooth	20
13 ZigBee 802.15.4	21
13.1 Topologia rete	21
13.2 Struttura pacchetto	21
13.3 Network Topologies	21
14 Cellular Network Dimensioning	22
14.1 Handover/Handoff	22
14.2 Dimensionamento rete cellulare	22
14.3 Interferenza tra celle adiacenti	23
14.4 Calcolo C/I Uplink	23
14.5 Considerazioni Finali	24
15 GSM	24
15.1 Architettura rete GSM	25
15.2 Struttura di uno slot GSM	25
15.3 Gerarchia di Segnalazione GSM	26
16 EDGE 2.7G	27
17 UMTS	28
17.1 Tasso di trasmissione	28
17.2 Differenze tra W-CDMA e GSM	28
17.3 frequenza di controllo	28
17.4 Controllo qualità	28
17.5 Diversità di frequenza	29
17.6 dati e pacchetto	29
17.7 Diversità di trasmissione in downlink	29
17.8 Classi di QoS di UMTS	30
17.9 Interfacce Considerate nello Standard	31
18 LTE (4G)	32
18.1 Motivation for LTE	32
18.2 LTE performance requirements	32
18.3 3 principali limitazioni del 3G	33
18.4 LTE/SAE Key features	33
18.5 Key Features	34
18.6 LTE key parameters	34

19 Protocollo LoRa	35
19.1 livello fisico	35
19.1.1 Composizione frame LoRa	35
19.1.2 Capture Effect	35
19.2 Livello MAC (LoRaWAN)	36
19.3 Architettura di rete e Sicurezza	36
19.4 Concludendo	36
20 OFDM	37
20.1 Pulse shaping and spectrum	37
20.2 Multi Carrier Modulation	38
20.3 OFDM	38
20.4 OFDM ad accesso multiplo	38
21 5G	39
21.1 Advanteges over 4G	39

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
- α : coefficiente d'attenuazione $\frac{dB}{Km}$

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

Da fisica

$\cdot < 1$ Siccome α 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	α
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
- λ : Lunghezza d'onda
- α : 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

Φ : 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 $\frac{Hz}{V}$

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 è la metà della BPSK

Può 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) Più i punti sono vicini, più sono sensibili al rumore

5.8 Capacità di Canale AWGN (Additive White Gaussian Noise)

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

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

$$\begin{cases} C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{in}}{BN_0} \right) \\ R \leq C \end{cases}$$

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

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

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

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

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

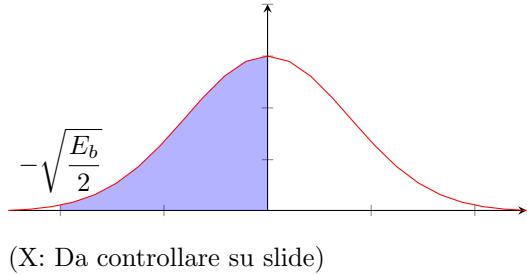
5.9 Calcolo Errore su BPSK

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 $p_k(t)$

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

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)

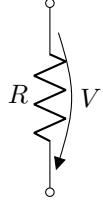
N_{max} é il massimo numero di utenti attivi contemporaneamente, é possibile migiorare le prestazioni del CDMA, modificando la disposizione delle antenne trasmetttrici

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

- H_0 Interferenza antenne vicine
- G_A Sectorization Gain factor
- G_ν Voice activity factor ≈ 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:

$$P = \frac{1}{2} B \frac{N_0}{2} = B N_0 = K T_0 B$$

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

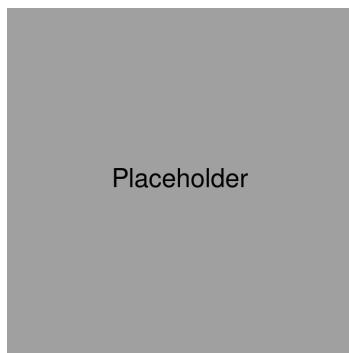


Figure 1: Slotted aloha

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/CD

CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access, Collision Detection

Si basa sul fatto che le collisioni tra pacchetti vengono riconosciute ed individuate in poco tempo. Quando ne avviene una, la trasmissione del pacchetto viene interrotta.

Dato che il segnale si propaga su un cavo, per determinare le collisioni basta confrontare l'energia del cavo ricevuta, con la potenza di un segnale trasmesso, per poter identificare facilmente un interferenza.

Questo metodo è molto efficiente soprattutto se le dimensioni del pacchetto sono molto più lunghe rispetto ai tempi di propagazione.

Purtroppo, non è possibile utilizzare lo stesso sistema di error-detection nelle reti wireless, dato che la potenza del segnale ricevuto dipende molto dalla distanza tra gli utenti e la sorgente del segnale, quindi non sempre una bassa potenza di segnale implica l'assenza di collisioni.

10.1 Struttura di un frame Ethernet

Struttura frame livello 2:

- **Preamble:** [8 byte] 7 con pattern 10101010, ed 1 con 10101011; Utilizzati per sincronizzare il ricevitore e trasmettitore
- **Destination & Source Address:** [6 byte] Target machine / Broadcast & 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.

In caso di errore tutto il frame viene scartato

10.2 Ethernet (Standard IEEE 802.3)

CSMA/CD 1 Persistent:

Aspetta fino a quando il canale è libero, dopo trasmette immediatamente (*1 Persistent*). Quando si verifica una collisione, viene trasmesso un segnale ad alta energia chiamato *Segnale di JAM (JAM Signal)*.

10.3 Collision Detection

Per assicurarsi che le collisioni vengano individuate, è richiesto che $2T$ (*Round Trip Time*) sia al più $51.2\mu s$. Da cui, supponendo che si trasmetta a $10Mbps$, la lunghezza di un pacchetto minima deve essere $64b$.

In questo modo ci si assicura che tutti gli host notino la collisione.

10.4 Binary Exponential Backoff

In caso di N collisioni consecutive viene generato un numero casuale K compreso tra 0 e 2^N , chiamata T_s l'unità di tempo, prima di trasmettere di nuovo un pacchetto vengono aspettati KT_s secondi.

$T_s = 51.2\mu s$ per il protocollo Ethernet 802.3

10.5 Efficacia

In condizioni di saturazione:

t_{prop} : Tempo massimo di propagazione tra due Nodi nella rete (T_s)

t_{trans} : Tempo di trasmissione massima di un frame ($1.2ms$), calcolato come $t_{trans} \frac{D_p}{R}$ (D_p dimensione pacchetto, R bit rate).

$$Eff \approx \frac{1}{1 + 5 \frac{t_{prop}}{t_{trans}}} \approx 82.6\%$$

10.6 Recezione dei Frame

Ethernet controller card si occupa di filtrare i frame destinati all'host rispetto a tutti i pacchetti nella rete

Transceiver (Utilizzato nelle reti con topologia a bus) si occupa di:

- Carrier detection
- Collision detection
- Jamming

Nelle reti con topologia ad hub (stella), i singoli host si occupano di Carrier detection, l'hub centrale di:

- Collision detection
- Jamming

11 WiFi CSMA/CA 802.11

Collision Sense Multiple Access/Collision Avoidance

1. Se il canale è occupato e devo trasmettere un frame, Cronometro quanto il canale ci impiega a tornare libero, chiamo questo tempo T .
2. Appena il canale si libera, prima di trasmettere il frame aspetto lo stesso tempo T
3. Se il canale torna occupato prima che finisce il mio ‘countdown’, interrompo il ‘countdown’ e lo riprendo appena il canale torna libero.
4. Altrimenti trasmetto il frame immediatamente

11.1 Hidden and Exposed Terminal Problems

Avviene nel caso in cui due o più nodi riescono a trasmettere alla base station, ma il loro segnale non è abbastanza forte da individuarsi a vicenda. Per questo motivo, se uno dei due fa *Carrier Sense*, non individua l'altro, e, trasmettendo contemporaneamente generano interferenza alla base station.

Soluzioni:

- Busy Tone Multiple Access (BTMA): la banda viene divisa in due, una sottobanda viene utilizzata per la trasmissione dati, l'altra per capire quando trasmettere
- Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS): coppia di messaggi di handshake tra device e base station, utilizzati per ‘detect’ di trasmissioni vicine.

11.2 Wi-Fi Trivia

Wi-Fi: Wireless Fidelity

Wi-Fi Alliance: Organizzazione non-profit che ha creato il brand “Wi-Fi”, di cui sono parte molte aziende. Il logo garantisce la compatibilità dei dispositivi con i protocolli ethernet e Wi-Fi.

11.3 Standard 802.11b

Utilizza la banda a $2.4GHz$, soggetta ad interferenze da altri device (come microonde, telefoni cordless..), suddivisa in 11 canali, di cui solo 3 non sovrapposti.

Supporta un data rate massimo idealmente da 1 a $11Mbps$, ma realisticamente da $4 - 5Mbps$ al massimo.

Utilizza il protocollo *DSSS*

11.4 Standard 802.11g

Utilizza sempre la banda a $2.4GHz$, ma ha un raggio di trasmissione più corto rispetto a $802.11b$. È compatibile ancora con lo standard $802.11b$.

È più flessibile siccome canali multipli possono essere combinati per aumentare il throughput, ma rimane limitato ad un unico access point.

Idealmente ha un massimo di $54Mbps$, ma realisticamente $20 - 25Mbps$ e $14Mbps$ se associato con $802.11b$

Utilizza FDD

11.5 Standard 802.11a

Come $802.11g$ più canali possono essere utilizzati per aumentare il throughput, ma non rimane limitato ad un unico access point.

Il raggio di trasmissione è più corto degli altri due protocolli precedenti.

Utilizza FDD con banda a $5GHz$, ed ha 12 canali, di cui 8 non sovrapposti. Raggiungendo una velocità ideale dai 6 ai $54Mbps$ (Realisticamente $\approx 25Mbps$)

12 Personal Area Network (PAN)

Rete di device disposti a distanza ridotta ($\approx 1 - 10m$), può essere

- Cablata: Connessa attraverso USB o BUS
- Wireless: Connessa utilizzando protocolli come Bluetooth, ZigBee, IrDA, etc.

Ha come vantaggio principale quello di richiedere poca energia.

Utilizza sempre la frequenza portante di $2.4GHz$

12.1 Bluetooth 802.15.1

Ha come vantaggi principali:

- ridotto costo
- Connessioni ad hoc
- Ideale per trasmissione di dati vocali in tempo reale
- Rimuove la necessità di numerose porte, utilizzate per connessioni cablate

12.1.1 Architettura del Protocollo

Interfaccia **Audio** comunica direttamente con la banda base.

Banda base a 79 portanti, utilizza CDMA con hopping sequences, per minimizzare il danneggiamento del segnale provocato dal canale di comunicazione (Interferenza da cammino multiplo).

Nel caso non venga utilizzata l'interfaccia audio, il Link Manager Protocol si occupa dell'autenticazione e crittografia del segnale trasmesso

SDP, Service Discovery Protocol, si occupa di individuare altri dispositivi che utilizzano bluetooth.

Ogni nodo ha un *Bluetooth Device Address (BD_ADDR)*. Il nodo Master determina tutte le frequenze di hopping dei nodi Slave.

Network topology organizzate in:

- Piconet: Insieme di nodi bluetooth sincronizzati con un unico master
- Scatternet: Insieme di piconet

All'interno di una rete, Master e Slaves possono invertirsi i ruoli

12.2 Formato pacchetto bluetooth

- **Access Code:** [72bit]
- **Packet Header:** [54bit] Contiene MAC Address, ed altri bit di controllo
- **Payload:** [0 – 2745bit] Dati effettivi trasmessi

12.3 Possibili stati di un dispositivo bluetooth

- ACTIVE: Unicamente identificato da un AM_ADDR, e sta trasmettendo
- SNIFF: partecipa alla piconet nello SNIFF interval
- HOLD: Tiene solamente attiva la connessione
- PARK: (low-power): Rilascia il suo AM_ADDRM, rimanendo però sincronizzato col master

BlueTooth device addressing:

- BD_ADDR [48bit]
- AM_ADDR [3bit]: ACTIVE, HOLD or SNIFF
- PM_ADDR [8bit]: PARK MODE address, scambiato con AM_ADDR quando si entra in PARK MODE
- AR_ADDR [8bit]: usato quando si passa dallo stato PARK a ACTIVE

13 ZigBee 802.15.4

Ideato specialmente per low-rate low-power PANs.

Basato sul ‘*Garantire time slot ai device nella rete*’

Beacon-Enabled Mode: La sincronizzazione tra nodi si effettua tramite pacchetti *beacon*, il tempo disponibile viene suddiviso in superframe. Maggiore complessità nei singoli nodi.

Beaconless Mode: Nessuna sincronizzazione tra nodi, minore complessità nei singoli nodi ma meno efficiente rispetto a beacon-mode.

13.1 Topologia rete

I nodi sono raggruppati in PAN, identificate da un *PAN ID*.

Almeno uno dei nodi presenti in ogni PAN, ha il ruolo di coordinatore: Organizza l’inizializzazione dell’intera pan (es. Configurazione del PAN ID), l’associazione dei nodi e delle trasmissioni dei beacon.

Nodi aggiuntivi della rete sono chiamati *end-devices*.

Tutti i nodi sono divisi logicamente in FDD (Full Function Devices) e RFD (Reduced Function Devices). FFD implementano tutte le funzionalità ZigBee e possono comunicare con tutti gli altri nodi nel range trasmissivo

Tutte le topologie messe in evidenza contengono almeno un Coordinatore di rete, e gli RFD, possono essere solamente foglie del grafo, mentre gli FFD possono essere rami o foglie.

Viene utilizzato una low-transmission rate: 20 – 40 kbps

13.2 Struttura pacchetto

- Beacons: usato dal PAN coordinatore
- Data: Usato dai livelli più alti per trasferire dati
- Acknowledgement: Usato per confermare la corretta ricezione del pacchetto
- MAC command: manage all control information

Utilizza il protocollo CSMA/CA unslotted. Tempo d’attesa generato casualmente sull’intervallo $[0, 2^{BE} - 1]$

13.3 Network Topologies

- Star: no router solo un padre
- Tree: Coordinatore della PAN è la radice, i router possono diramarsi in router o end device. (energy efficient)
- Mesh: Tutti i nodi possono comunicare, (non applicabile beacon mode)

14 Cellular Network Dimensioning

Aumentare K ha un impatto sul numero di risorse frequenziali assegnate ad ogni cella.

Le risorse frequenziali sono strettamente legate al numero di utenti gestibili. $+K$ a parità di area di cella, meno densità geografica degli utenti

14.1 Handover/Handoff

Handover non assistito: gestito da BTS adiacenti

Handover assistito da Mobile station: Mobile Station genera informazioni di controllo per una gestione migliorata dell'handover.

14.2 Dimensionamento rete cellulare

A_{cella} := Area di una singola cella

Tutte le celle hanno la stessa dimensione. (Non vero per 5G)

Un Area coperta da una cella richiede maggiore potenza trasmittiva.

Supponendo che M_{cella} sia il numero di risorse frequenziali assegnate ad ogni cella, la densità geografica degli utenti è calcolata come:

$$u = \frac{M_{cella}}{A_{cella}}$$

Chiamato M il numero complessivo di risorse a disposizione, e K le dimensioni del Kluster:

$$M_{cella} = \frac{M}{K}$$

Chiamato R il raggio della cella associata dell'esagono.

$$A_{cella} = \frac{6}{2} R^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \rightarrow u = \frac{M}{K} \frac{2}{3\sqrt{3}R}$$

Maggiore è il numero di risorse a disposizione, maggiore è il numero di utenti gestibili per Km^2

Distanza di riuso (\mathcal{D}): Distanza tra centri di celle analoghe

Sperimentalmente i valori che K può assumere non sono arbitrari, ma devono rispettare la relazione

i	j	k
0	1	1
0	2	4
0	3	9
1	1	3
1	2	7
1	3	13
1	4	21
2	2	12
2	3	19
2	4	28
3	3	27

$K = i^2 + j^2 + ij$ $\begin{cases} i, j \in \mathbb{N} \\ i + j \neq 0 \end{cases}$

Partendo dal centro di una cella, si arriva ad una cella analoga seguendo i passaggi:

1. Muoversi i celle seguendo una direzione perpendicolare ad un lato dell'esagono di partenza
2. Ruotarsi di $\frac{2}{3}\pi$ in senso (anti)orario

3. Muoversi di j celle seguendo il verso della rotazione

La formula della distanza di riuso tra 3 celle, si calcola (utilizzando il Teorema di Carnot):

$$\begin{aligned}\mathcal{D} &= \sqrt{(i\sqrt{3}R)^2 + (j\sqrt{3}R)^2 - 2(i\sqrt{3}R)(j\sqrt{3}R) \cos(\frac{2}{3}\pi)} = \\ &= R\sqrt{3i^2 + 3j^2 + 3ij} = \sqrt{3R}\sqrt{i^2 + j^2 + ij} = \boxed{\sqrt{3KR}}\end{aligned}$$

14.3 Interferenza tra celle adiacenti

Siccome è schematizzata ad esagono, ci sono al massimo 6 segnali interferenti

$$I_i = \frac{\chi}{\mathcal{D}}$$

La distanza dipende dalla cella, $d_{i_{max}} = d_i + r$, mediamente $d_i \approx \mathcal{D}$

$I :=$ Potenza Interferenza complessiva

$$I \leq \sum_{i=1}^6 I_i = 6 \frac{\chi}{\mathcal{D}}$$

È uguale se tutte le celle analoghe di 1^a fascia stanno utilizzando la stessa risorsa. Minore se almeno una delle celle analoghe non utilizza la stessa risorsa

$$\frac{C}{I} \geq \frac{\frac{\chi}{R^n}}{6 \frac{\chi}{\mathcal{D}^n}} = \frac{1}{6} \left(\frac{\mathcal{D}}{R} \right)^n = \frac{1}{6} a^n = \frac{(\sqrt{3K})^n}{6}$$

$$a := \frac{D}{R}$$

Per aumentare SNR in downlink, considero invece di un antenna omnidirezionale, 3 antenne direttive, ognuna con diagramma di irradiazione di 120°. Ad ogniuna delle 3 antenne è assegnato $\frac{1}{3}$ delle risorse della cella.

In questo modo:

$$\left(\frac{C}{I} \right)_{down} \geq \frac{a^n}{2} = 3 \cdot \frac{a^n}{6}$$

In generale su celle tri-settoriali il rapporto aumenta di un fattore compreso tra 2 e 3. Ma comporta un handover sui settori della stessa cella. Al fine di evitare questi costi, si possono considerare siti 3-settoriali, ma richiedono che K sia multiplo di 3.

(X: Disegno Trisettoriale)

14.4 Calcolo C/I Uplink

Utilizziamo come **assunzione peggiorativa** che la Mobile Station è a distanza R dalla BTS.

(X: Disegno posizioni)

Inoltre (**assunzione peggiorativa**) la mobile station che può interferire è più vicina possibile alla BTS, è eattamente a distanza $\mathcal{D} - R$, questo implica che la retta che unisce i due centri delle BTS passa per uno spigolo.

$$I_i = \frac{\chi}{d_i^n}$$

considerando l' I_i legata ad una singola Mobile station nella cella

$$I = \sum_{i=1}^6 \approx 6 \frac{\chi}{(\mathcal{D} - R)^n}$$

$$C = \frac{\chi}{R^n} \quad , \quad \left(\frac{C}{I} \right)_{up} = \frac{1}{6} \frac{(\mathcal{D} - R)^n}{R^n} = \frac{1}{6} \left(\frac{\mathcal{D}^n}{R^n} - 1 \right) = \frac{1}{6} (a^n - 1)$$

14.5 Considerazioni Finali

	$R \uparrow$ e K cost	R cost e $K \uparrow$
Potenza trasmittiva	↑	-
Numero di Handoff	↓	-
Densità geografica	↓	↑
Rapporto C/I	-	↑

15 GSM

Global System for Mobile Communication. È organizzato in una struttura fortemente gerarchica.

Introduce per la prima volta sul mercato una trasmissione dati di tipo digitale. Portando enormi vantaggi rispetto ai precedenti sistemi cellulari.

- Più velocità di trasmissione grazie alle tecniche di compressione dei dati e codifica di sorgente.
- Introduzione delle funzioni di sicurezza e cifratura
- Introduce un grande numero di servizi grazie all'aumento della velocità di trasmissione (es. SMS)

MSS: *Mobile Station Subsystem*, Connessione alla rete via interfaccia radio

MMI: *Man-Machine Interface*

HMI: *Human-Machine Interface*

Access Network:

- BTS: Base Transceiver Station
- BSC: Base Station Controller (Gestisce Handover)

Core Network:

- MSC: Mobile Switching Center, comunicazione circuito
- SGSN: Interfaccia commutazione pacchetto

IMEI: *International Mobile Equipment Identity*

HLR: *Home Location Register*, Database su cui un gestore GSM memorizza permanentemente i dati relativi agli utenti sottoscritti (IMSI, MSISDN)

VLR: *Visitor Location Register*, Mantiene aggiornate le informazioni sulla mobile Station (IMSI, MSISDN, HLR, TMSI, Stato Mobile Station, Location Area Identity)

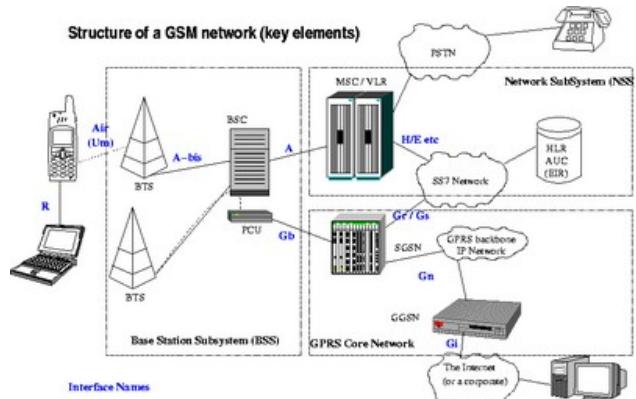


Figure 2: Architettura GSM

SIM:*Subscriber Identity Module*, ha come scopo principale quello di fornire l'autenticazione ed autorizzazione per accedere alla rete. Non contiene all'interno il numero di telefono, perché associato all' *IMSI*. Contiene:

- IMSI: *International Mobile Subscriber Identity*, Numero univoco associato ad ogni utente, mandato da un dispositivo della rete (molto raramente) a HLR e VLR. Composto da:
 - Utente
 - Operatore
 - Nazione

Per garantire riservatezza agli utenti viene inviato al suo posto un TMSI (*Temporary MSI*) casualmente generato.

- Chiave segreta utilizzata sia per autenticare il chiamante sia per cifrare i dati.
- Memoria interna (Consente al massimo 256 Numeri di telefono)

Mobile Station International Subscriber Directory Number (MSISDN): Identifica univocamente l'utente nel piano di numerazione della rete telefonica del gestore.

BSS:*Base Station Subsystem*

- BTS:*Base Transceiver Station*: Hardware per ricezione, antenne modem ed amplificatori
 - BSC:*Base Station Controller*: Gestisce canali radio delle BTS che controlla e mobile station collegate. Utilizza frequency hopping per prevenire trasmissione continua su canali 'cattivi'
- Gestisce Handoff tra:
- Celle Adiacenti
 - Stessa Cella

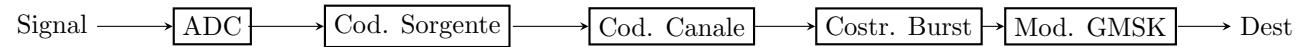
TRAU:*Transcoder Rate Adaptation Unit*, Adattatore codifica vocale usata con codice vocale in rete

Codifica sorgente vocale telefono (RPE-LTP), compongono la voce ed elimina la ridondanza, campionando il segnale.

PCM:*Pulse Code Modulation*

Voce campionata su smartphone, TRAU rigenera ridondanza

15.1 Architettura rete GSM



- ADC:*Analog Digital Converter*
- Codifica di sorgente: RPE-LTP (Regular Pulse Excitation Long Term Reduction)
- Codifica di Canale
- Codifica di Sorgente, Rate di codifica $\frac{1}{2}$: Ricevuto in ingresso 1 bit, inserisce ridondanza e manda 2 bit in uscita
- Costruttore di burst
- Destinazione

Bande in uplink: $\frac{890}{915} MHz \rightarrow$ Banda di coerenza $25MHz = B$

GSM lavora con sottobande di $200KHz$ (B_C) \rightarrow Numero di sottobande possibili: $\frac{B}{B_C} = \frac{25 \cdot 10^3 kHz}{200KHz} = 125$.
Per essere sicuri di non ‘sforare’ dalla banda a disposizione, ne vengono utilizzate solamente 124.

Ogni sottobanda viene indicata con un ARFCN (*Absolute Radio Frequency Channel Number*)

Ogni sottobanda può essere assegnata fino ad un massimo di 8 utenti. Viene utilizzato un TDMA a 8 slot per ogni sottobanda. Da cui il numero di utenti gestibili: $124 * 8 = 992$

Ogni time slot viene indicato con TSN

La coppia ARFCN-TSN indica univocamente una risorsa.

Se il ‘*Passo di Duplice*’ è costante, basta conoscere la sottobanda in uplink per identificare univocamente anche quella in downlink.

Il vantaggio di utilizzare l’ibrido FDMA/TDMA è la possibilità di utilizzare il frequency hopping nel TDMA: Ad ogni utente non viene assegnata solamente una risorsa, ma una serie di risorse \Rightarrow Riduzione danneggiamento comunicazione da sottobane danneggiate.

Per la modulazione del segnale viene utilizzata un GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*), Un formato di modulazione molto efficiente.

1. Efficacia spettrale superiore a $1symbol/Hz$
2. Robusta contro l’evanescenza
3. Ha un’ampiezza costante, viene gestito in modo efficiente amplificatori
4. Semplice come implementazione

15.2 Struttura di uno slot GSM

3	57	1	26	1	57	3	8.5
---	----	---	----	---	----	---	-----

Multiframe: Composto da 26 frame, dura 120ms

Ogni **Frame** è composto da 8 slot

Ogni **Slot** dura $577\mu s$, ed è composto da 156.25 bit. Gli 8.25 bit terminali non vengono utilizzati nel frame, per evitare problemi con la sincronizzazione, in questo modo lo slot è simmetrico.

- Bit di coda [3 bit]: principalmente utilizzati per consentire l’accensione e spegnimento dell’amplificatore di potenza.
- Campi dati [57 bit]: payload
- Stealing flag [1 bit]: quando vanno ad 1, i campi dati vengono utilizzati per il controllo.

Utilizzati nelle operazioni critiche (handover, cambio arfcn-tsn)

- Midambolo

Il **midambolo** è noto al trasmittitore ed al ricevitore.

$$\{x_K\}_{K=1}^{26} \longrightarrow [H(z)] \longrightarrow \{y_K\}_{K=1}^{26}$$

Per trovare h_k si usa la sequenza nota $y_k = x_k \oplus h_k$.

h_k : Channel Impulse Response

Dato che la risposta in frequenza del canale varia continuamente nel tempo, il modo migliore per stimarla è valutarla a metà del pacchetto.

$$T_s := \text{Tempo di simbolo} = \frac{\text{Durata slot}}{\text{Dimensione Pacchetto}} = \frac{577\mu s}{156.25} \approx 3.69\mu s$$

Banda di coerenza: $\frac{1}{5\sigma}$

$$\text{Banda del segnale} = \frac{1}{3} \gg \text{Banda di Coerenza} \approx \frac{1}{80}$$

Su $200KHz$ la risposta in frequenza potrebbe essere quella (figura).

Tempo di coerenza: Legato all'effetto doppler; f_D (Frequenza doppler) $\approx 100Hz$ nel GSM

$$T_{coer} \approx \frac{9}{16\pi f_D} \approx 1ms$$

$$T_{burst} = T_{slot} = 577\mu s = 0.57ms \approx T_{coer}$$

$$\text{Risposta Trasmissiva (Rb)} \approx \frac{114 \cdot 24}{120 \cdot 10^{-3}} = 22.8 \frac{Kb}{s}$$

15.3 Gerarchia di Segnalazione GSM

- Burst-Slot: $577\mu s$
- Frame (8 Slot): 4.65ms
- Multiframe (26 frame): 120ms
- SuperFrame (51 multiframe): 6.12 s
- HyperFrame (2048 superframe): 3h 24m 57.76s, passato questo intervallo di tempo, tutte le chiavi crittografiche vengono re-inzializzate

Tutti le repliche sono caratterizzate da fading, modellizzato con una distribuzione di Rayleigh

GSM era progettato per la trasmissione vocali, è altamente inefficiente per la trasmissione dati.

16 EDGE 2.7G

Enhanced Data rates for GSM Evolution

GPRS (2.5G): General Packet Radio Service, Consente ai telefoni di collegarsi a reti dati. Si appoggia alla rete di accesso GSM (TDMA/FDMA), per trasmettere dati con TCP/IP, ad un utente possono essere assegnati più slot di uno stesso sottocanale.

Asimmetria Uplink e Downlink

Miglioramento di trasferimento dati a comunicazione pacchetto (enhanced GPRS)

Si appoggia alla rete GSM

Intermedio fra GSM e wideband code division multiple access (W-CDMA) i.e. UMTS

Utilizza il formato di modulazione QAM16/QAM32 invece di *8-phase shift keying* (GSM). Aumenta l'efficienza spettrale ed il tasso di trasmissione da $171.2kbps$ a $473.6kbps$

17 UMTS

Universal Mobile Telecommunication System

Alla fine lo standard che doveva prendere piede era IMT-2000. Tutte le entità cercarono di spingere le proprie soluzioni significative rispetto alla 2^a 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 $\left(2\frac{Mb}{s}\right)$

- 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^a 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

17.1 Differenze tra W-CDMA e GSM

Wideband Code Division Multiple Access, lavora su coppia di canali a banda larga (5Mhz). Può essere utilizzato sia in modalità TDD che FDD.

- Maggiore spaziatura tra portanti
- Maggiore frequenza di controllo

Nel GSM non c'è bisogno di un controllo di potenza, siccome ogni utente ha la sua frequenza. Non accade lo stesso dal 3G, per questo motivo viene introdotta una frequenza di controllo

Generazione	Kb/s
GSM	36
GPRS	171.2
EDGE	473.6
UTRA	1920

Figure 3: Velocità trasmissioni

17.2 Controllo qualità

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

17.3 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**

17.4 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

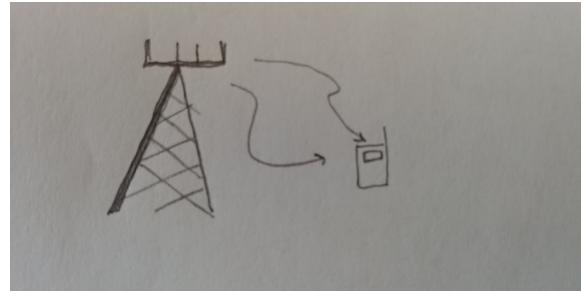


Figure 4: Diversità di cammino

17.5 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 trasmisivo
3. Tasso di errore massimo tollerabile

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

17.6 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

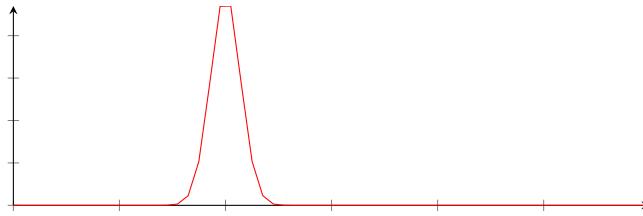


Figure 5: Classe Conversazionale

- 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

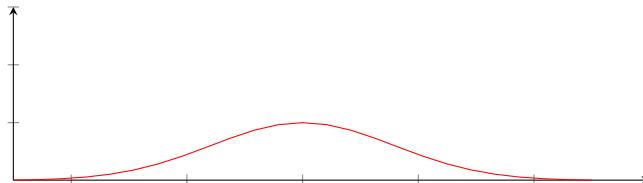


Figure 6: Grafico Streaming

- **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^a e 3^a generazione

Con la 3^a 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

17.7 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

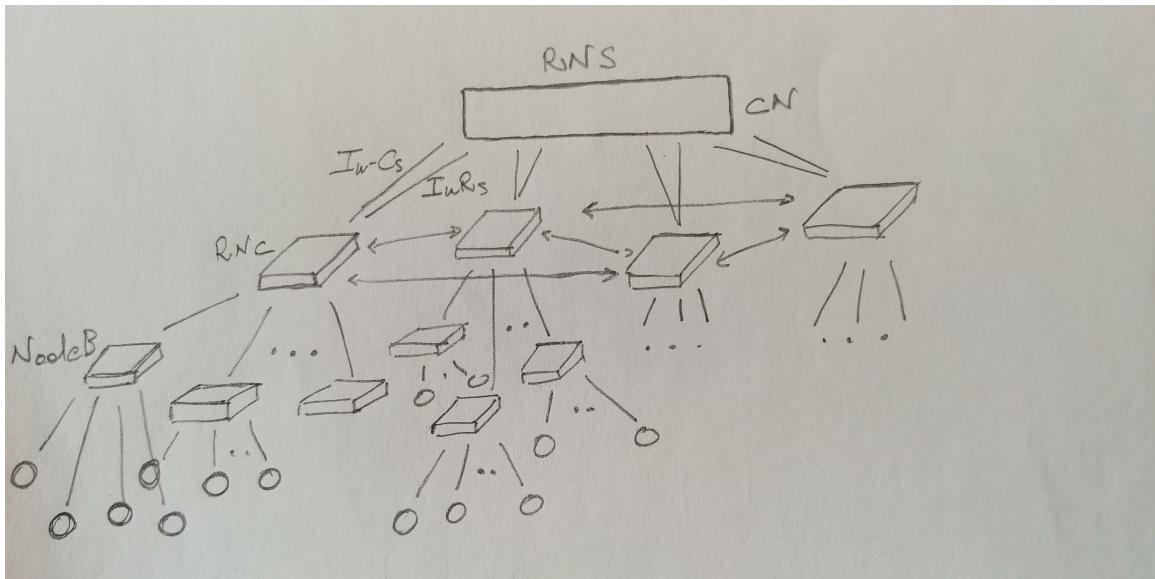


Figure 7: Architettura UTS

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

18 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^a generazione

18.1 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

18.2 LTE performance requirements

- Data rate con picchi di $100 \frac{Mb}{s}$, massima banda assegnabile ad un utente $20MHz$
 - Da 3^a 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

18.3 3 principali limitazioni del 3G

1. Massima bit rate
2. 3^a 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^a generazione

18.4 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

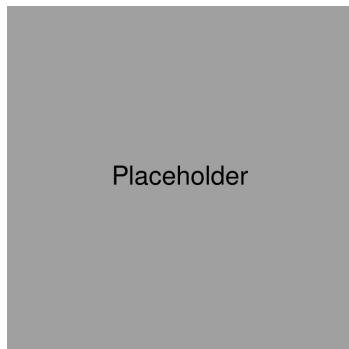


Figure 8: Architettura LTE

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

18.5 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

18.6 LTE key parameters

Ogni risorsa frequenziale prende il nome di **Resource Block**, e corrisponde ad una sottobanda di 180 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 Mbps

19 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

19.1 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

19.1.1 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

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

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

19.1.2 Capture Effect

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

19.2 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

19.3 Architettura di rete e Sicurezza

(X: Immagine slide 63)

Quando un nodo trasmette, tutti i gateway nel range trasmittivo 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

19.4 Concludendo

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

Scalabilitá ridotta

...

20 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 → 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

20.1 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^a 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

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

20.2 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

20.3 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)

20.4 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^a 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

21 5G

21.1 Advantages 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
- Maggiore numero di dispositivi connessi per km² (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 cars... (IOT, Industria 4.0)