

IEEE 802.11

Lo standard per Wireless LAN

1

S. Olivieri

Chi sono

- Istruzione
 - Master in Tecnologia dell'Informazione al CEFRIEL – Milano
 - Laurea in Ingegneria Elettronica a Bologna
- Esperienze Professionali
 - Attualmente in R&D ST Microelectronics
 - Progettazione radio digitale per reti WLAN, WMAN
 - Studio e sviluppo di applicazioni video multimediali su reti UMTS
 - Breve periodo in H3G (Tre)
 - Specifiche e debugging di applicazioni multimediali per i telefoni 3G
 - 5 anni in R&D Philips
 - Progettazione radio digitale per sistemi wireless IEEE 802.11, Bluetooth
 - Progettazione sistemi di codifica video (H.263, MPEG-4)
- Professore a contratto per il corso di Teoria della Trasmissione
- Contatti: olivieri@dico.unimi.it

2

S. Olivieri

Argomenti del corso IEEE 802.11

- **Parte 1**

- Cenni di teoria della trasmissione numerica

- **Parte 2**

- Definizione e caratteristiche delle WLAN
- Architettura, topologie di rete e servizi di IEEE 802.11
- Tecnologie e protocolli dello strato fisico

- **Parte 3**

- Tecnologie e protocolli dello strato MAC
 - Struttura dei frame
-

3

S. Olivieri

Parte 1- Cenni di teoria della trasmissione

- I sistemi di trasmissione numerica

- I segnali

- Trasformata di Fourier, spettro e banda

- Il canale di comunicazione

- Modelli di canale
- Caratteristiche del canale radio

- La modulazione numerica e la codifica di canale

4

S. Olivieri

Parte 1- Cenni di teoria della trasmissione

- ☞ I sistemi di trasmissione numerica
 - I segnali
 - Trasformata di Fourier, spettro e banda
 - Il canale di comunicazione
 - Modelli di canale
 - Caratteristiche del canale radio
 - La modulazione numerica e la codifica di canale

5

S. Olivieri

Lo strato fisico

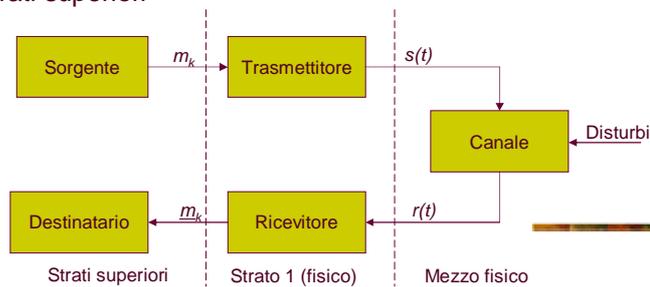
- In un'architettura di rete, lo strato fisico può essere visto come un **sistema di trasmissione numerica**, responsabile dell'invio di bit attraverso un **canale** di comunicazione
- Gli aspetti di progetto dello strato fisico riguardano i meccanismi per garantire che un bit 1 trasmesso da un'estremità venga ricevuto come bit 1 (e non come 0) all'altra estremità

6

S. Olivieri

Sistemi di trasmissione numerica

- La sorgente, situata negli strati superiori, consegna i **messaggi** m_k (gruppi di bit) al trasmettitore residente nello strato fisico
- I bit vengono trasmessi attraverso il canale di comunicazione sottoforma di **segnali** $s(t)$
 - Onde elettromagnetiche nel caso di trasmissione su canale radio
- Tali segnali, tipicamente corrotti da **disturbi** introdotti nel canale, sono poi rilevati dal ricevitore ed inviati al destinatario situato negli strati superiori



S. Olivieri

Sorgente di messaggi

- Supponiamo che i bit siano raggruppati in messaggi m_k , ciascuno di N bit, e che ciascun messaggio venga emesso ad ogni intervallo temporale T (**tempo di simbolo**)
- Ciascun messaggio emesso nell'istante temporale k può assumere uno degli possibili valori $\{m_i\}$, $i = 1, 2, \dots, M$, con $M = 2^N$
- Ad esempio, per $M = 4$ si ha
 - $m_1 = (0,0)$ $m_2 = (0,1)$
 - $m_3 = (1,0)$ $m_4 = (1,1)$

8

S. Olivieri

Generazione dei segnali

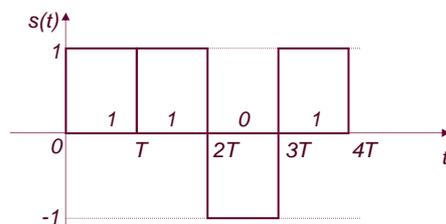
- Il trasmettitore genera, in corrispondenza della sequenza di messaggi m_k , un segnale $s(t) = \sum_k s_k(t)$, costituito dalla sequenza di segnali $s_k(t)$ atto ad essere trasmesso sul canale di comunicazione disponibile
- Supponiamo che ciascuna forma d'onda $s_k(t)$ abbia durata limitata e pari alla durata T del messaggio m_k

9

S. Olivieri

Trasmissione binaria

- I messaggi m_k sono costituiti da singoli bit ($N = 1$)
- Scegliamo come forma d'onda $s_k(t) = a_k g(t - kT)$, dove $g(t)$ è il rettangolo di ampiezza $A = 1$ e durata T
- Associamo poi
 - $m_k = 1 \rightarrow a_k = 1$
 - $m_k = 0 \rightarrow a_k = -1$

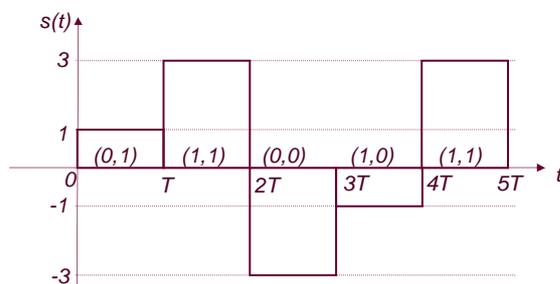


10

S. Olivieri

Trasmissione multilivello

- I messaggi m_k sono costituiti da coppie di bit ($N = 2$)
- Scegliamo come forma d'onda $s_k(t) = a_k g(t - kT)$, dove $g(t)$ è il rettangolo di ampiezza $A = 1$ e durata T
- Associamo poi
 - $m_1 = (0,0) \rightarrow a_k = -3$ $m_2 = (0,1) \rightarrow a_k = 1$
 - $m_3 = (1,0) \rightarrow a_k = -1$ $m_4 = (1,1) \rightarrow a_k = 3$



11

S. Olivieri

Ritmo di trasmissione

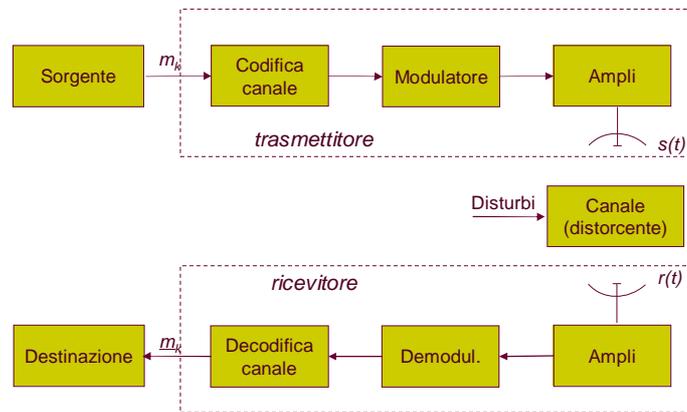
- Ciascun messaggio contiene $\log_2 M$ bit di informazione
- Ciascuna forma d'onda $s_k(t)$ trasporta $N = \log_2 M$ bit
- Se T è la durata in secondi di ciascun segnale trasmesso in sequenza, il **ritmo** R di trasmissione dell'informazione, o **bit-rate**, vale

$$R = \frac{\log_2 M}{T} \text{ bit / sec}$$

12

S. Olivieri

Schema di trasmissione/ricezione



13

S. Olivieri

Funzioni del trasmettitore

- Il trasmettitore è in genere costituito da
 - Un *codificatore di canale* per proteggere l'informazione dagli errori che i disturbi presenti sul canale potranno causare
 - Un *modulatore* che mappa l'informazione in segnali adatti alle caratteristiche trasmissive del canale disponibile
 - Un *blocco di emissione* costituito da
 - un amplificatore, che amplifica il segnale modulato
 - L'eventuale antenna trasmittente per la trasmissione in aria del segnale sottoforma di onda elettromagnetica

14

S. Olivieri

Funzioni del ricevitore

- Il ricevitore è in genere costituito da
 - Un *blocco di ricezione* costituito da
 - L'eventuale antenna ricevente per rilevare in aria il segnale
 - un amplificatore, che amplifica il segnale ricevuto
 - Un *demodulatore* che estrae i messaggi numerici (codificati) dal segnale ricevuto
 - Un *decodificatore di canale* per decodificare i messaggi numerici

15

S. Olivieri

Corruzione dell'informazione sul canale

- Il segnale $s(t)$ trasmesso attraverso il canale è affetto da
 - **Distorsione**
 - Ad esempio nel canale radio le onde elettromagnetiche sono soggette a riflessioni sui vari ostacoli che si interpongono tra le stazioni in comunicazione, e si sovrappongono in modo casuale
 - **Rumore**
 - Segnali spuri presenti all'interno della circuiteria dei dispositivi
 - Interferenze provenienti dall'esterno, ad esempio altre stazioni che trasmettono contemporaneamente sulle stesse tratte radio

16

S. Olivieri

Probabilità d'errore

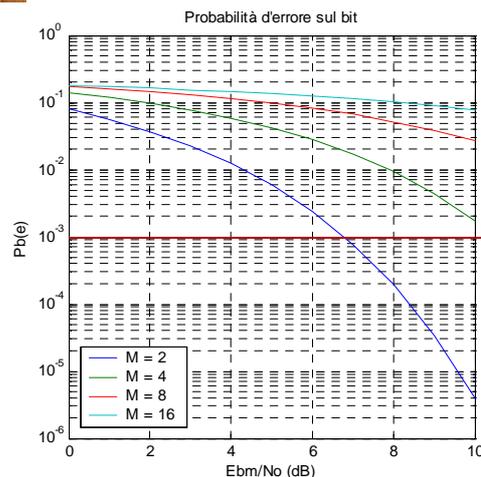
- A causa della corruzione, il segnale trasmesso potrà essere ricostruito in ricezione (il segnale $r(t)$) solo imperfettamente
- È quindi possibile che il ricevitore prenda la decisione sbagliata in merito al messaggio trasmesso
- Per via della natura casuale dei disturbi (e quindi degli errori), è possibile valutare le prestazioni del sistema calcolando la **probabilità di errore sul bit** $P_b(e)$, cioè la probabilità che il ricevitore prenda la decisione sbagliata in merito ai bit che costituiscono il messaggio trasmesso
 - La probabilità d'errore si valuta in funzione del **rapporto segnale-rumore**, che costituisce un indice di qualità del canale

17

S. Olivieri

Grafico delle prestazioni

- A parità di $P_b(e)$, aumenta il valore del rapporto segnale-rumore (E_b/N_0) all'aumentare della dimensione M dell'insieme dei messaggi, cioè all'aumentare del numero di bit N contenuti in ciascun messaggio



18

S. Olivieri

Parte 1- Cenni di teoria della trasmissione

- I sistemi di trasmissione numerica
- ☞ I segnali
 - Trasformata di Fourier, spettro e banda
- Il canale di comunicazione
 - Modelli di canale
 - Caratteristiche del canale radio
- La modulazione numerica e la codifica di canale

19

S. Olivieri

I segnali

- I **segnali** (detti anche **forme d'onda**) rappresentano in generale il comportamento di grandezze fisiche (ad es. tensioni, temperature, pressioni,...) come variabili dipendenti di una o più variabili indipendenti (ad es. il tempo, lo spazio,...)
- Nei sistemi di trasmissione l'informazione viene trasmessa sul mezzo fisico mediante la variazione di una qualche proprietà fisica (come ad es. l'ampiezza di una tensione elettrica), ed è possibile anche in questo caso rappresentare questa proprietà come un segnale

20

S. Olivieri

I segnali per le comunicazioni

- I segnali relativi ai sistemi di comunicazione sono solitamente descritti come funzioni di una sola variabile (segnali **monodimensionali**) che può essere
 - Il **tempo**
 - La **frequenza**
- Si parla quindi rispettivamente di rappresentazione nel **dominio dei tempi** e delle frequenze (in quest'ultimo caso tramite la **trasformata di Fourier**)

21

S. Olivieri

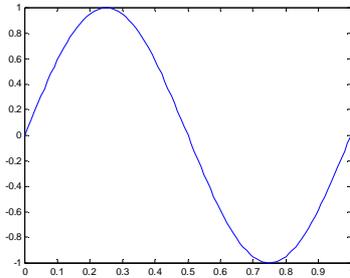
Rappresentazione nel dominio dei tempi

- Consideriamo ad esempio il segnale cosinusoidale
$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$$
 - La grandezza A esprime l'**ampiezza** della cosinusoide
 - φ è la **fase iniziale**
 - La variabile $f_0 = 1/T_0$ (T_0 è il periodo) è detta **frequenza**
 - Dimensionalmente è l'inverso di un tempo e viene misurata in **Hertz** (Hz), cioè periodi (cicli) al secondo
 - Esprime il numero di oscillazioni che la sinusoide compie nel periodo $[0, 2\pi]$, cioè per t (variabile temporale) che va da 0 ad 1

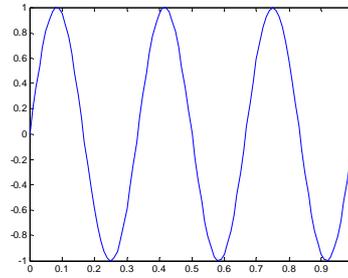
22

S. Olivieri

I segnali sinusoidali



■ Caso di $f_0 = 1$



■ Caso di $f_0 = 3$

23

S. Olivieri

La trasformata di Fourier

- Si definisce **trasformata di Fourier** (TDF) di un segnale $s(t)$ (reale o complesso) la funzione $S(f)$, generalmente complessa, della frequenza f ($-\infty < f < +\infty$) data da

$$S(f) = \mathfrak{F}[s(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt = |S(f)| e^{j\varphi(f)}$$

- $|S(f)|$ e $\varphi(f)$ rappresentano il modulo e la fase della trasformata di Fourier
- Vale inoltre la formula di trasformata inversa (o **antitrasformata**) di Fourier

$$\mathfrak{F}^{-1}[S(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df = s(t)$$

24

S. Olivieri

Significato della trasformata di Fourier

- Considerando un segnale $s(t)$ reale si può far vedere che

$$s(t) \equiv 2 \sum_{k=0}^{+\infty} |S(k\Delta f)| \Delta f \cos[2\pi\Delta f t + \varphi(\Delta f)]$$

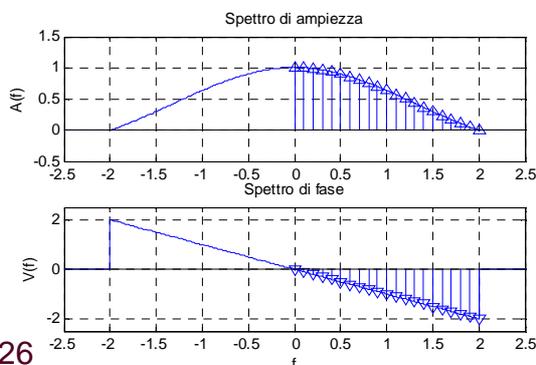
- **Importante:** tale equazione ci dice che il segnale $s(t)$ è dato dalla sovrapposizione nel tempo di infiniti segnali sinusoidali alla frequenza f , di ampiezza pari a $2|S(f)|df$ e fase $\varphi(f)$
- La trasformata di Fourier di un segnale reale può essere quindi interpretata come la **scomposizione** del segnale $s(t)$ in somma di infiniti sinusoidi, alle frequenze tra 0 e $+\infty$, ciascuna di ampiezza $2|S(f)|df$ e fase $\varphi(f)$

25

S. Olivieri

Spettro di ampiezza e fase

- Dato un segnale reale $s(t)$, $2|S(f)|$ ed $\varphi(f)$ esprimono quindi rispettivamente l'ampiezza e la fase della cosinusoide alla frequenza f che compone il segnale
 - $A(f) = 2|S(f)|$ è detto **spettro di ampiezza** del segnale
 - $V(f) = -\varphi(f)$ è detto **spettro di fase** del segnale



26

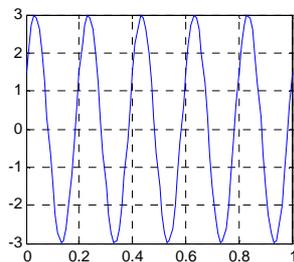
S. Olivieri

Spettro di ampiezza e fase

- Ricordiamo che ampiezza, frequenza e fase sono i parametri che caratterizzano i segnali cosinusoidali

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$$

- La figura mostra ad esempio una cosinusoide con $f = 5$, $A = 3$ e $\varphi = -\pi/3$



27

S. Olivieri

Definizione di banda del segnale

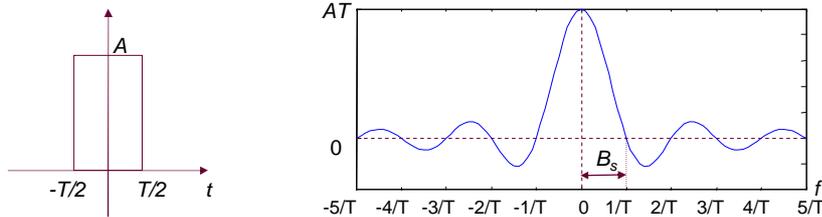
- L'intervallo di frequenze, nel semiasse positivo, per cui lo spettro d'ampiezza del segnale è diverso da zero rappresenta la **banda** del segnale $s(t)$
- La banda del segnale esprime quindi l'insieme delle cosinusoidi che danno contributo non nullo alla scomposizione del segnale $s(t)$
- Osserviamo che in pratica la banda si riferisce alle frequenze per le quali $A(f)$ è **significativamente** diversa da zero
- Infatti nella realtà spesso lo spettro d'ampiezza si estende su tutto l'intervallo delle frequenze da $-\infty$ a $+\infty$, ma con contributo che diventa via via trascurabile all'aumentare della frequenza
- Un esempio tipico è quello dei segnali di durata finita, si può dimostrare infatti che non esistono forme d'onda con durata finita e banda teorica limitata

28

S. Olivieri

Trasformata di Fourier del rettangolo

- La banda occupata dal rettangolo
 - Non dipende dall'ampiezza del rettangolo
 - È teoricamente infinita, essendo il segnale di durata finita T
 - Si può ad esempio fissare convenzionalmente a $B_s = 1/T$

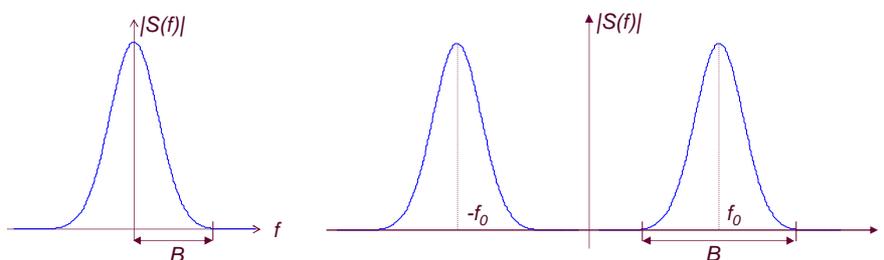


29

S. Olivieri

Classificazione nel dominio delle frequenze

- In generale, sulla base della banda, si possono considerare due classi di segnali
 - Segnali **in banda base**, con spettro centrato intorno a $f = 0$
 - Segnali **in banda passante**, con spettro centrato intorno a $f = \pm f_0$



30

S. Olivieri

A cosa serve la trasformata di Fourier

- Alcune operazioni sui segnali nel dominio del tempo possono risultare più agevoli se eseguite nel dominio delle frequenze
- È uno strumento utile per comprendere l'effetto di un canale, rappresentabile nel dominio delle frequenze, sul segnale che vi transita
 - Vedremo infatti che confrontando lo spettro del segnale con il comportamento in frequenza del canale, è possibile capire se il segnale subisce o meno distorsioni
- Dà un'idea della velocità di un sistema di trasmissione
 - la banda occupata da un segnale in generale aumenta al diminuire della sua durata T

31

S. Olivieri

Parte 1- Cenni di teoria della trasmissione

- I sistemi di trasmissione numerica
- I segnali
 - Trasformata di Fourier, spettro e banda
- ☞ Il canale di comunicazione
 - Modelli di canale
 - Caratteristiche del canale radio
- La modulazione numerica e la codifica di canale

32

S. Olivieri

I canali di comunicazione

- Nella comunicazione a distanza la trasmissione dell'informazione avviene attraverso due classi di canali mediante **onde elettromagnetiche guidate o irradiate**
 - Le **linee fisiche di trasmissione** (ad esempio la linea telefonica, il cavo coassiale o la fibra ottica) che guidano, cioè confinanano all'interno di esse le onde elettromagnetiche che trasportano il segnale fino a destinazione
 - Lo **spazio libero**, sul quale le onde si irradiano in tutte le direzioni in modo più o meno direttivo, cioè con una concentrazione più o meno accentuata della potenza trasmessa in una direzione preferenziale

33

S. Olivieri

Segnali in banda base o banda passante

- I segnali trasmessi nelle linee di trasmissione possono essere
 - In banda base, come nel caso delle LAN
 - In banda passante, ad esempio la trasmissione di segnali numerici su linea telefonica
- I segnali trasmessi in spazio libero sono sempre in banda passante per via delle sue proprietà fisiche che, come vedremo successivamente, non consente la trasmissione di segnali con frequenze concentrate intorno alla frequenza nulla

34

S. Olivieri

Trasmissione su linea telefonica

- Lo spettro del segnale vocale copre, per la parte significativa, una banda compresa tra 300 e 3400 Hz, quindi una banda traslata rispetto alla frequenza nulla
- La rete telefonica analogica è stata originariamente progettata per convogliare questo segnale, ed utilizza opportuni filtri dimensionati sulla banda del segnale vocale
- Per trasmettervi quindi un segnale numerico occorre mappare la sequenza di messaggi su forme d'onda con spettro nella banda della rete telefonica

35

S. Olivieri

Il canale di comunicazione

- Il canale di comunicazione può essere rappresentato schematicamente come un sistema che, a fronte di un segnale $s(t)$ associato all'informazione da trasmettere, restituisce il segnale $r(t)$ in generale diverso da $s(t)$
- Infatti, le caratteristiche trasmissive dei canali sono tali da modificare l'andamento del segnale al suo ingresso



36

S. Olivieri

Descrizione dei canali di comunicazione

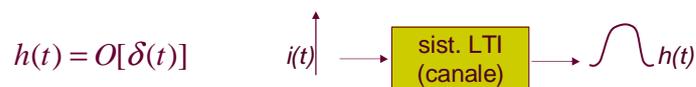
- Come visto per i segnali, anche i canali di comunicazione sono rappresentabili
 - Nel dominio dei tempi, tramite la **risposta all'impulso**
 - Nel dominio delle frequenze, tramite la **funzione di trasferimento**
- Come già anticipato, vedremo che confrontando lo spettro del segnale con il comportamento in frequenza del canale, è possibile capire se il segnale subisce o meno distorsioni

37

S. Olivieri

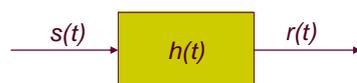
Risposta all'impulso

- Si definisce **risposta all'impulso** $h(t)$ la funzione all'uscita del sistema ottenuta in risposta al Delta di Dirac



- Tale funzione caratterizza completamente il sistema LTI *nel dominio dei tempi*

$$r(t) = O[s(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)h(t - \tau)d\tau = s(t) * h(t)$$



38

S. Olivieri

L'impulso di Dirac

- L'impulso di Dirac $\delta(t)$ può essere pensato come un rettangolo di base T ed altezza $1/T$ quando T tende a zero

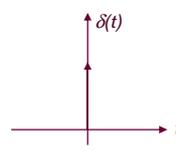
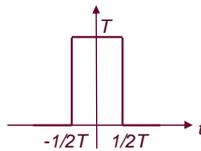
$$\delta(t) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$$

- L'impulso è cioè interpretabile come un segnale simmetrico localizzato nell'origine con base infinitesima, ampiezza infinita, ed area unitaria

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0$$

$$\delta(t) = \delta(-t)$$

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$



39

S. Olivieri

Risposta in frequenza dei sistemi LTI

- La **risposta in frequenza** o **funzione di trasferimento** di un sistema LTI è una funzione complessa $H(f)$ della frequenza che dipende solo dalla risposta all'impulso $h(t)$ del sistema
- Per definizione, la risposta in frequenza $H(f)$ è la trasformata di Fourier della risposta impulsiva $h(t)$

$$H(f) = |H(f)| e^{j\psi(f)} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

- Anche la $H(f)$ è una funzione molto importante perché descrive il comportamento dei sistemi LTI *nel dominio delle frequenze*



40

S. Olivieri

Calcolo della risposta in frequenza

- Osserviamo che è abbastanza complicato ricavare la $H(f)$ sulla base della definizione (bisognerebbe rilevare la risposta del sistema all'impulso e poi calcolarne la TDF)
- In realtà, per i sistemi reali ha il vantaggio di essere facilmente ricavabile sperimentalmente tramite opportune misure basate sull'analisi dell'uscita del sistema al cui ingresso si inviano segnali sinusoidali che spaziano l'intervallo di frequenze di interesse

41

S. Olivieri

Proprietà della funzione di trasferimento

- Si può far vedere che la trasformata di Fourier $R(f)$ del segnale $r(t)$ all'uscita del canale è data da
- È quindi possibile risalire al segnale ricevuto $r(t)$ utilizzando la formula di antitrasformazione di Fourier

$$R(f) = S(f)H(f)$$
$$r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f)H(f)e^{j2\pi ft} df$$

42

S. Olivieri

Effetto del canale sul segnale ricevuto

- Il comportamento in **frequenza** del canale è importante perché ci aiuta a capire l'effetto, nel dominio del **tempo**, sul segnale in ricezione
- Esprimendo la funzione di trasferimento come

$$H(f) = |H(f)|e^{j\psi(f)}$$

si può far vedere che in corrispondenza di una certa frequenza

- Il modulo $|H(f)|$ indica l'attenuazione subita dalla componente alla frequenza f del segnale all'ingresso del sistema
- La fase $\psi(f)$ indica lo sfasamento subito dalla componente del segnale alla frequenza f

43

S. Olivieri

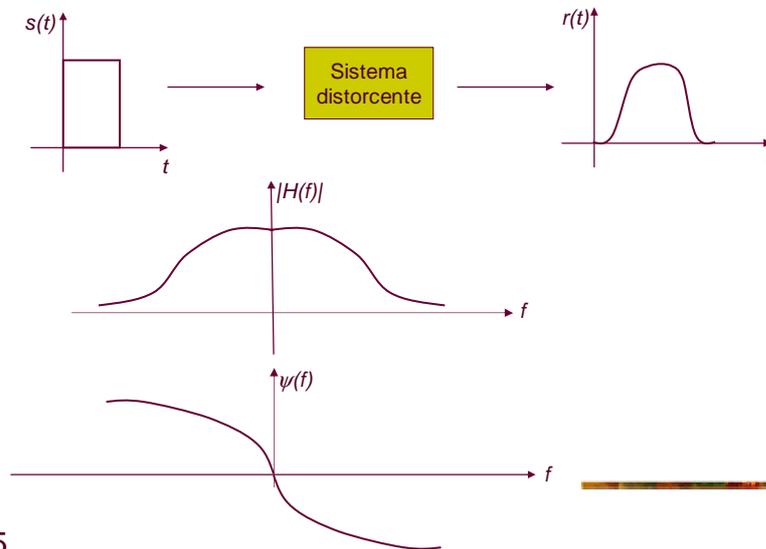
Canale distorcente

- Nel caso generale in cui $|H(f)|$ e $\psi(f)$ sono funzioni qualunque della frequenza, le varie componenti sono ridotte e ritardate in misura diversa
- Ne deriva una distorsione sul segnale ricevuto, con conseguente aumento della probabilità di errore
- In questo caso il canale è detto **distorcente**

44

S. Olivieri

Effetto di canale distortore



45

S. Olivieri

Canale ideale

- Un canale è **ideale** quando il modulo della funzione di trasferimento è costante e la fase è funzione lineare della frequenza, cioè

$$H(f) = |H(f)|e^{j\psi(f)} = Ce^{-j2\pi f\tau}$$

- In questo caso il segnale in uscita risulta

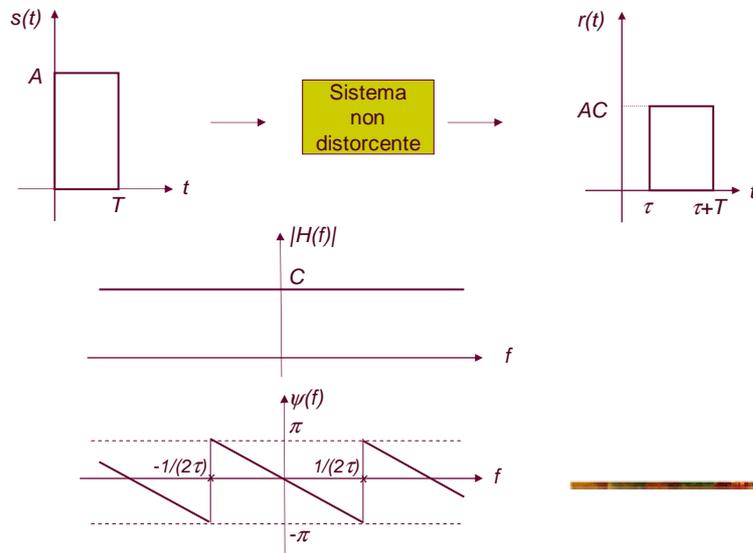
$$r(t) = \mathcal{S}^{-1}[H(f)S(f)] = \mathcal{S}^{-1}[CS(f)e^{-j2\pi f\tau}] = Cs(t - \tau)$$

cioè ha stessa forma d'onda del segnale trasmesso $s(t)$, a meno di una riduzione di ampiezza pari a C

46

S. Olivieri

Effetto di canale ideale



47

S. Olivieri

Canale ideale a banda limitata

- Un canale è **ideale a banda limitata** quando
 - È non distortente in un intervallo di frequenze $[f_{c1}, f_{c2}]$
 - Ha $H(f)$ arbitraria altrove
- L'intervallo $[f_{c1}, f_{c2}]$ rappresenta la **banda B** del canale
 - Le componenti del segnale in ingresso in corrispondenza della banda B non subiscono distorsione, mentre tutte le componenti di frequenza al di fuori di tale intervallo sono distorte
- Ne consegue che, se la banda B_s del segnale $s(t)$ in ingresso al canale è tutta compresa nella banda B , il sistema risulta essere non distortente per il segnale $s(t)$
- I canali di comunicazione reali possono essere spesso rappresentati in questo modo

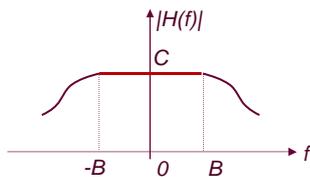
48

S. Olivieri

Canali ideali passabasso e passabanda

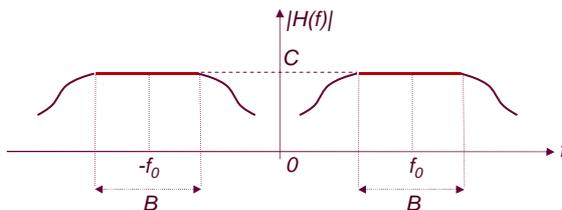
■ Canale ideale passabasso

- La condizione di non distorsione è soddisfatta per $|f| \leq B$



■ Canale ideale passabanda

- La condizione di non distorsione è soddisfatta per $\left(f_0 - \frac{B}{2}\right) \leq f \leq \left(f_0 + \frac{B}{2}\right)$



49

S. Olivieri

Trasmissione radio

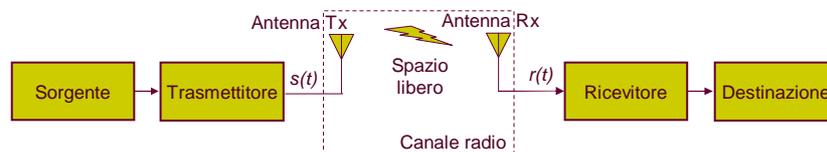
- Un esempio classico di trasmissione di tipo passabanda è la **trasmissione radio**
- Nei sistemi radio il segnale $s(t)$ con spettro centrato attorno alla frequenza f_c , generato dal trasmettitore, eccita l'antenna
 - Per semplicità possiamo immaginare che il segnale $s(t)$ sia una sinusoide alla frequenza f_c
- In tal modo l'antenna *irradia onde elettromagnetiche* (OEM) che hanno le stesse caratteristiche spettrali del segnale $s(t)$, e che si *propagano* nell'atmosfera alla velocità della luce c
- L'antenna ricevente capta le onde elettromagnetiche e le riconverte nel segnale $r(t)$ che viene consegnato al ricevitore
- La propagazione delle onde elettromagnetiche consente quindi di trasportare l'informazione dalla sorgente alla destinazione

50

S. Olivieri

Il canale radio

- È costituito da
 - Il mezzo fisico trasmissivo (lo spazio libero)
 - I dispositivi di interfaccia tra il mezzo e gli apparati di trasmissione e ricezione (le antenne)



51

S. Olivieri

Le onde elettromagnetiche

- Allo stesso modo delle onde acustiche o meccaniche, le onde elettromagnetiche hanno un andamento periodico, e sono quindi caratterizzate dalla frequenza di oscillazione f_c (che coincide con la frequenza del segnale che eccita l'antenna) e dalla **lunghezza d'onda** λ , che misura la dimensione dell'onda che si ripete periodicamente
- Il legame tra frequenza f_c , lunghezza d'onda λ e velocità della luce c , è dato da $\lambda = c/f_c$

λ	f_c
$3 \cdot 10^5$ km	1 Hz
300 km	1 kHz
300 m	1 MHz
30 cm	1 GHz

52

S. Olivieri

Banda della trasmissione radio

- Per poter irradiare efficacemente l'energia elettromagnetica che porta l'informazione, l'antenna deve avere dimensioni dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda in gioco
- Tenendo conto che 1 kHz corrisponde ad una lunghezza d'onda di 300 Km (in virtù della relazione $\lambda = c/f_c$), è chiaro che è necessario disporre di segnali per la trasmissione con banda ad alta frequenza in modo da poter utilizzare antenne di dimensioni ragionevoli

53

S. Olivieri

Fenomeni fisici legati alla propagazione

- La propagazione elettromagnetica comporta un'attenuazione (detta da **spazio libero**) del segnale trasmesso che è proporzionale
 - Al quadrato della distanza tra le stazioni remote
 - Al quadrato della frequenza centrale f_c dello spettro del segnale
- La presenza dell'atmosfera implica una **disomogeneità** nella densità e nella composizione del mezzo di propagazione
- Sono inoltre presenti oggetti o materiali che rappresentano degli **ostacoli** per la propagazione delle onde lungo il loro percorso
 - Agenti atmosferici (pioggia, neve, nebbia)
 - Suolo terrestre o superfici acquatiche
 - Montagne e colline
 - Infrastrutture
 - Vegetazione

54

S. Olivieri

Effetti della disomogeneità del mezzo

- *Assorbimento*: trasformazione di energia elettromagnetica in termica (mezzo assorbente)
- *Diffusione*: dispersione dell'energia elettromagnetica in varie direzioni (mezzo non omogeneo)
- *Rifrazione*: cambiamento della direzione di propagazione (variazioni dell'indice di rifrazione)

- Tali fenomeni provocano in generale un'**attenuazione supplementare** delle onde che si aggiunge all'attenuazione da spazio libero

55

S. Olivieri

Attenuazione dovuta a fenomeni atmosferici

- I fenomeni atmosferici e meteorologici che hanno impatto sulla propagazione sono
 - Gas atmosferici (ossigeno, vapor acqueo, ecc.)
 - Precipitazioni (pioggia, neve, grandine)
 - Cristalli di ghiaccio in sospensione
 - Turbolenza atmosferica

56

S. Olivieri

Effetti degli ostacoli

- Negli ambienti reali (come nel caso dei sistemi radiomobili) ci sono varie superfici riflettenti, attenuanti ed opache rispetto alle quali le onde radio si comportano in modo del tutto simile alla luce (di per se è un'onda elettromagnetica) che attraversa il vetro, si riflette sugli specchi ed è bloccata da certi ostacoli
- Il segnale che raggiunge un ricevitore può quindi arrivare
 - Da direzioni diverse a causa delle riflessioni dell'ambiente
 - Con intensità diverse a seconda dell'attenuazione subita

57

S. Olivieri

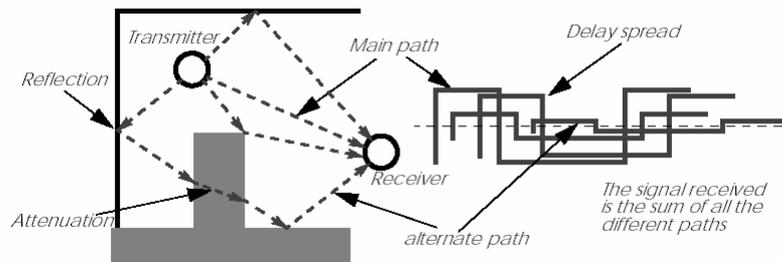
Il fenomeno del multipath

- Le varie componenti (eco) del segnale attenuate e riflesse percorrono, alla velocità della luce, cammini di lunghezza diversa (i **cammini multipli** o **multipath**), e si sovrappongono poi al ricevitore
- Il segnale risultante è quindi generalmente variabile nella forma e nell'intensità in modo imprevedibile tale per cui bisogna ricorrere ad una rappresentazione di tipo statistico
- Uno degli effetti del multipath sul segnale in ricezione è noto come **delay spread**, che si manifesta in un'interferenza sul segnale utile in ricezione

58

S. Olivieri

Multipath e Delay Spread



59

S. Olivieri

Parte 1- Cenni di teoria della trasmissione

- I sistemi di trasmissione numerica
- I segnali
 - Trasformata di Fourier, spettro e banda
- Il canale di comunicazione
 - Modelli di canale
 - Caratteristiche del canale radio
- ☞ La modulazione numerica e la codifica di canale

60

S. Olivieri

La modulazione numerica

- La generazione di forme d'onda con spettro traslato in frequenza si realizza **modulando**, cioè variando, i parametri di un'onda sinusoidale (detta **portante**) ad una data frequenza f_0 in accordo con la sequenza di messaggi m_k da trasmettere
- Il parametro modulato può essere l'ampiezza, la fase, la frequenza o una combinazione di essi
- La modulazione produce un segnale **modulato** il cui spettro risulta centrato attorno alla frequenza f_0 della portante
- Il trasmettitore/ricevitore che compie l'operazione di modulazione/demodulazione è anche noto come **modem**

61

S. Olivieri

Tipi di modulazione numerica

- Modulazione d'ampiezza
- Modulazione d'ampiezza in quadratura
- Modulazione di fase
- Modulazione di frequenza

62

S. Olivieri

Modulazione d'ampiezza

- È detta **Amplitude Shift Keying** ad M livelli (**M-ASK**)
- Si costruisce innanzitutto un segnale in banda base $m(t)$ (detto segnale **modulante**) come sequenza di forme d'onda $g(t)$ distanziate di T (ad esempio rettangoli di durata T)

$$m(t) = \sum_k a_k g(t - kT)$$

- In funzione del messaggio da trasmettere, a_k assume uno degli M livelli di ampiezza $\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)$, dove M coincide con il numero di possibili messaggi
- Si moltiplica poi il segnale modulante per l'onda portante (la cosinusoide), ottenendo così il segnale modulato

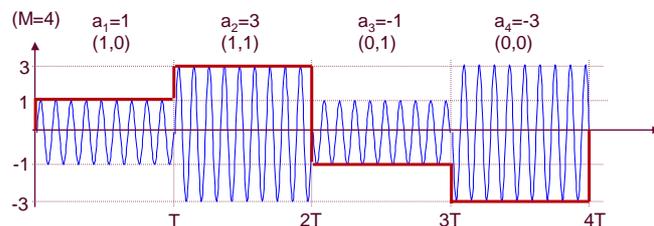
$$s(t) = m(t) \cos 2\pi f_0 t = \sum_k a_k g(t - kT) \cos 2\pi f_0 t$$

63

S. Olivieri

Caratteristiche nel tempo dell'M-ASK

- Il segnale M-ASK è una successione di sinusoidi di durata T le cui ampiezze variano in funzione di a_k

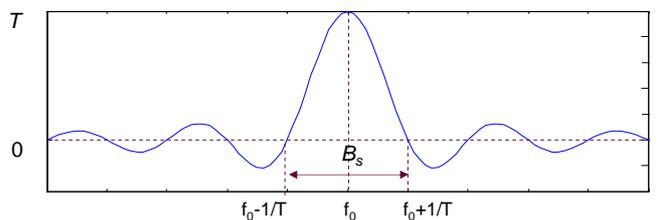


64

S. Olivieri

Caratteristiche in frequenza dell'M-ASK

- La trasformata di Fourier della cosinusoide di durata T è la stessa del segnale $g(t)$ (il rettangolo) traslata intorno alla frequenza f_0 della cosinusoide
- **Nota:** l'occupazione in banda ($B_s=2 \times 1/T$) è doppia rispetto al caso banda base per effetto della traslazione in frequenza



65

S. Olivieri

Modulazione d'ampiezza in quadratura

- È detta **Quadrature Amplitude Modulation** ad M livelli (**M-QAM**)
- Si costruiscono due segnali in banda base $a(t)$ e $b(t)$ come sequenze di forme d'onda $g(t)$ distanziate di T (ad esempio rettangoli di durata T)

$$a(t) = \sum_k a_k g(t - kT); \quad b(t) = \sum_k b_k g(t - kT)$$
 - Questi due segnali derivano dalla suddivisione in due flussi paralleli di un unico flusso dati proveniente dalla sorgente
- a_k e b_k assumono uno degli \sqrt{M} valori $\pm 1, \pm 3, \dots, \pm (\sqrt{M} - 1)$ dove M coincide con il numero di possibili messaggi
- Si moltiplicano poi i segnali rispettivamente per $\sin 2\pi f_0 t$, $\cos 2\pi f_0 t$ cioè due sinusoidi isofrequenziali sfasate di 90° , ottenendo così il segnale

- **Nota:** la modulazione QAM è utilizzata ad esempio nei modem (56k o ADSL) per la trasmissione di dati su linea telefonica

$$s(t) = a(t) \cos 2\pi f_0 t - b(t) \sin 2\pi f_0 t$$

66

S. Olivieri

Modulazione di fase

- È detta **Phase Shift Keying** ad M livelli (**M-PSK**)
- L'informazione è trasportata dalla fase di un'onda portante di frequenza e ampiezza costanti
$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \vartheta_k + \varphi), \quad \vartheta_k = (2n+1) \frac{\pi}{M}, \quad n = 0, \dots, M-1$$
- Anche per il segnale M-PSK, la banda risulta $B_s = 2 \times 1/T$
- **Nota:** In IEEE 802.11 si adotta la modulazione PSK **differenziale** (DPSK), che trasmette l'informazione sul cambiamento di fase $\theta_k - \theta_{k-1}$ tra un segnale ed il successivo
 - In questo modo si elimina l'incertezza sulla fase iniziale φ , non nota al ricevitore

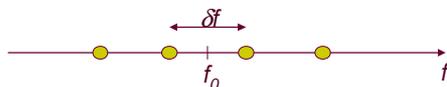
67

S. Olivieri

Modulazione di frequenza

- È detta **Frequency Shift Keying** ad M livelli (M-FSK)
- La frequenza dell'onda sinusoidale, di durata T , varia in funzione del simbolo da trasmettere

$$s_i(t) = A \cos \left[2\pi \left(f_0 + a_i \frac{\delta f}{2} \right) t + \phi_i \right], \quad a_i = \pm 1, \pm 3, \dots, \pm (M-1)$$



- Il calcolo della banda del segnale FSK è piuttosto complesso e dipende dalla specifica scelta dei parametri

68

S. Olivieri

Scelta della modulazione

- Va fatta in base ai seguenti criteri
 - Compromesso tra velocità di trasmissione e probabilità d'errore
 - Complessità
 - Comportamento in presenza di eventuali distorsioni dovute al canale
- **Nota:** in generale per ragioni di realizzabilità pratica del demodulatore, è richiesto che per la banda B_s del segnale modulante in banda base si abbia $B_s \ll f_0$
 - Ciò giustifica il fatto che ci sia maggiore disponibilità di banda all'aumentare della frequenza della portante

69

S. Olivieri

La codifica di canale

- Mediante i **codici di canale** è possibile accrescere la protezione contro i disturbi presenti nel canale
- La **codifica di canale** consiste in una trasformazione della sequenza di bit di informazione in una sequenza di bit di codice scelti in modo opportuno per una minore vulnerabilità dell'informazione rispetto al rumore del canale

70

S. Olivieri

Strategie di codifica

- Correzione degli errori (Forward Error Correction, FEC)
- Rivelazione degli errori e richiesta di ritrasmissione (Automatic Repeat Request, ARQ)
- Strategie miste di correzione e rivelazione (Hybrid FEC – ARQ)

71

S. Olivieri

Famiglie di codici

- Esistono numerose famiglie di codici, di varia complessità, ideati per fronteggiare vari tipi di disturbi presenti sul canale e per garantire un ampio spettro di prestazioni in termini di potere rivelatore e correttore
 - **Codici a blocco**
 - K cifre d'informazione sono seguite da $N - K$ cifre di parità, calcolate in modo deterministico dalle K cifre d'informazione
 - **Codici convoluzionali**
 - bit d'informazione e di parità si susseguono in modo alternato
 - Ogni bit di parità dipende da un numero prefissato di bit d'informazione precedenti
 - **Codici composti**
 - Codici concatenati, codici prodotto e turbo-codici (con decodifica iterativa)

72

S. Olivieri

Esempio: codice a controllo di parità

- È il codice a blocco a rilevazione più semplice
- Aggiunge ai bit di informazione b_i ($i=0, \dots, k-1$) un bit b_p , detto di **parità**, tale che si abbia un numero pari di 1

$$b_p = \sum_{i=0}^{k-1} b_i$$

- In ricezione è possibile rilevare un solo errore (o un numero dispari), incluso l'errore sul bit di parità
- Il rate di questo codice è pari a $k/(k+1)$
- **Nota:** i codici Cyclic Redundancy Check (CRC), utilizzati tipicamente per il controllo della conformità dei pacchetti scambiati in 802.11, si basano su un principio del tutto simile a quello del controllo della parità

73

S. Olivieri

Esempio: codici convoluzionali

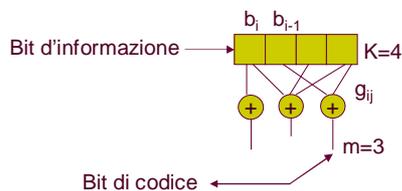
- È una tecnica di codifica FEC in cui si stabilisce una relazione lineare di tipo convoluzionale tra i bit d'informazione b_i ed i bit di codice c_{ij}
- La decodifica dei codici convoluzionali, piuttosto complessa, si basa su un algoritmo per la ricerca della sequenza più probabile, detto *algoritmo di Viterbi*

74

S. Olivieri

Generazione dei codici convoluzionali

- I bit d'informazione entrano e scorrono in un registro a scorrimento di lunghezza K
 - Gli m sommatori (modulo 2) generano m bit di codice
- $$c_{ij} = \sum_{l=1}^K g_{lj} b_{i-l+1} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad g_{lj} = (0, 1)$$
- I bit di codice c_{ij} dipendono non solo dai bit di informazione b_i , ma anche dai precedenti $b_{i-1}, b_{i-2}, \dots, b_{i-K+1}$, e quindi ogni bit d'informazione influenza il valore di $K \times m$ bit di codice
 - Il rate del codice convoluzionale è pari a $1/m$



75

S. Olivieri

Riferimenti bibliografici

- Copia dei lucidi presentati
- Per approfondimenti
 - Homepage del corso di Teoria della Trasmissione
<http://homes.dico.unimi.it/~olivieri>
 - Bibliografia
 - G. Tartara, "Introduzione ai sistemi di comunicazione", EtasLibri
 - L. Calandrino, M. Chiani, "Lezioni di Comunicazioni Elettriche", Pitagora Editrice Bologna

76

S. Olivieri