



**Politecnico
di Milano**

**Dipartimento di
Elettronica e
Informazione**

Reti di Telecomunicazione

Trasmissione dati

Principi



Sommario

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

- **Segnali**
- **Mezzi trasmissivi**

Fondamenti di trasmissione

- 2 -

Achille Pattavina



Sommario

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

- **Segnali**
 - ▶ Segnali periodici
 - ▶ Trasmissione su un canale
 - ▶ Segnali analogici
 - ▶ Conversione A/D
- **Mezzi trasmissivi**

Fondamenti di trasmissione

- 3 -

Achille Pattavina



Segnali periodici

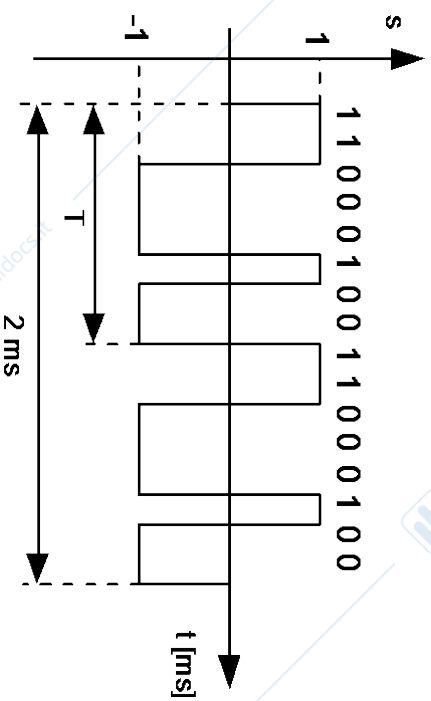
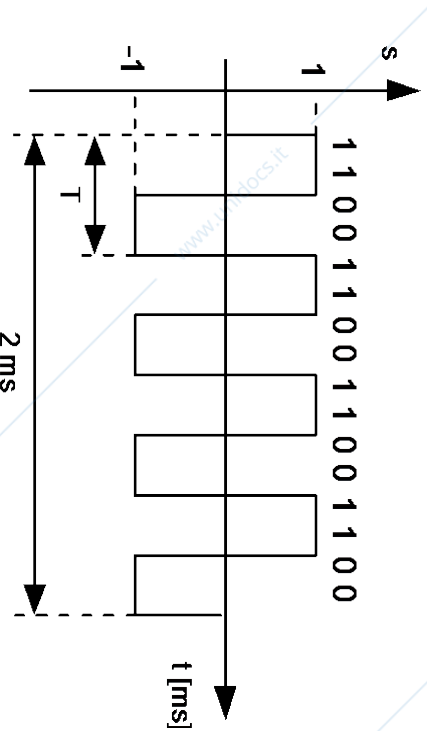
Fondamenti

- **Segnali periodici**

$$s(t + T) = s(t) \quad t \geq 0$$

- **Esempi**

- ▶ $C = 8 \text{ kbit/s}$
- ▶ $T_1 = 500 \text{ }\mu\text{s}$
- ▶ $T_2 = 1 \text{ ms}$





Segnali periodici Componenti

- **Serie di Fourier**

$$s(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

- **Coefficienti**

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

- **Esempio: onda quadra con periodo T e ampiezza A , $-A$**

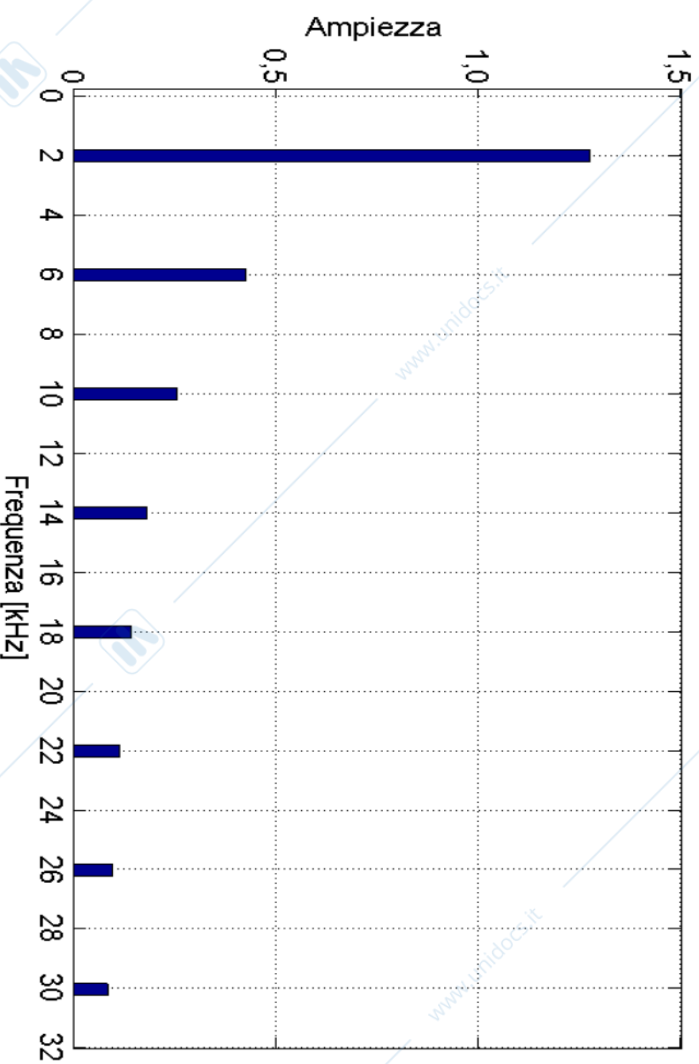
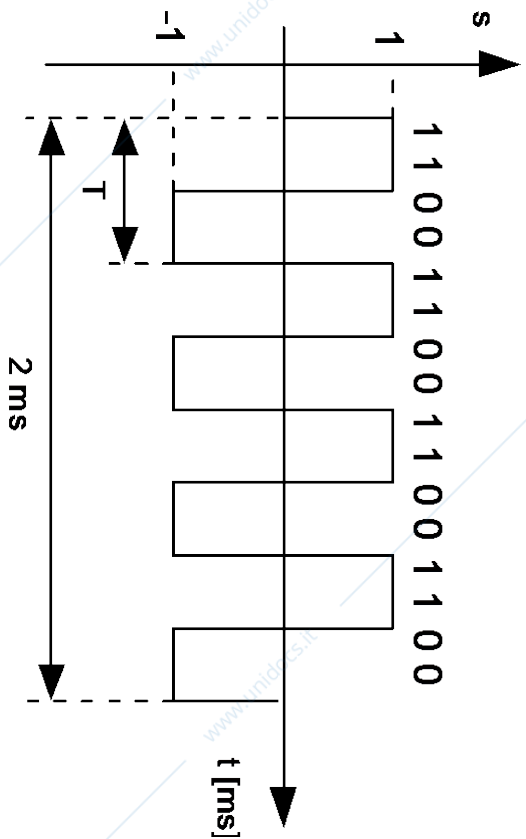
$$\rightarrow s(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots,\infty} \frac{\sin(2\pi n f_0 t)}{n}$$

- ▶ Armonica fondamentale ($f_0 = 1/T$) a tutte le armoniche dispari (in questo caso)

- **In generale possono essere presenti armoniche sia dispari che pari**

Spettro di un segnale

Esempio 1

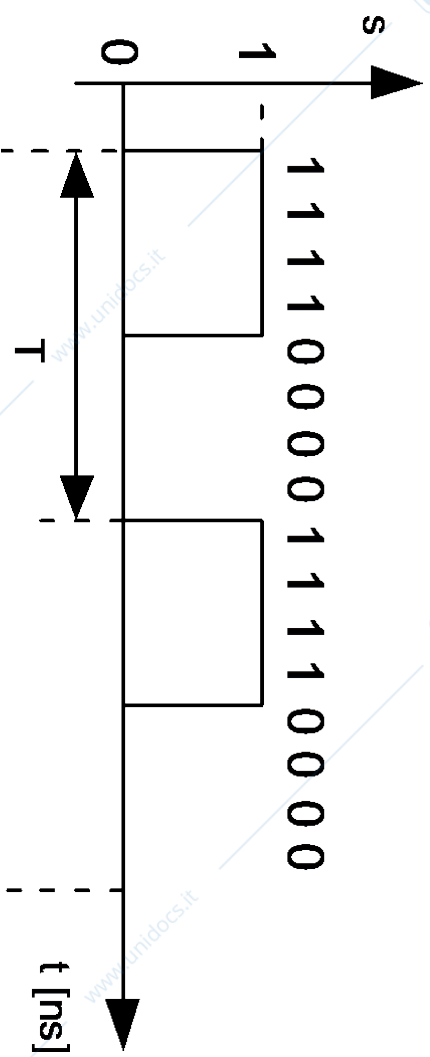


- Spettro con armoniche dispari
- La forma dello spettro dipende
 - ▶ Dalla frequenza di bit del segnale (→ determina le frequenze delle armoniche)
 - ▶ Dalla forma dell'impulso che rappresenta il singolo bit (→ determina il valore dei coefficienti)



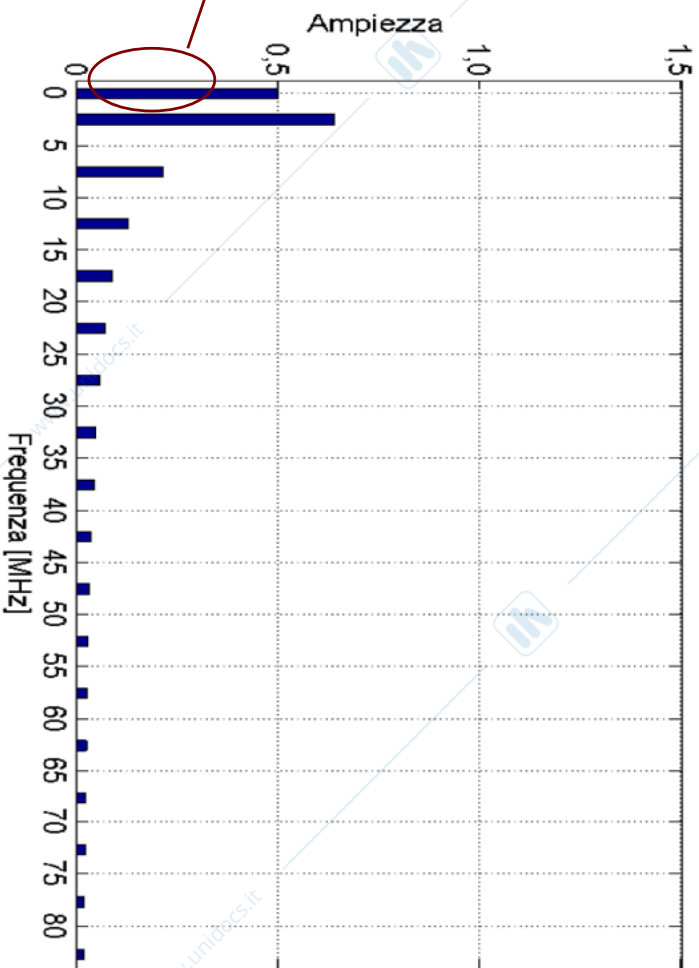
Spettro di un segnale

Esempio 2



- **Segnale periodico**
 - ▶ $C = 20$ Mbit/s
 - ▶ $T = 400$ ns
 - ▶ $F = 1/T = 2,5$ MHz
- **Spettro con componente continua**

Componente continua

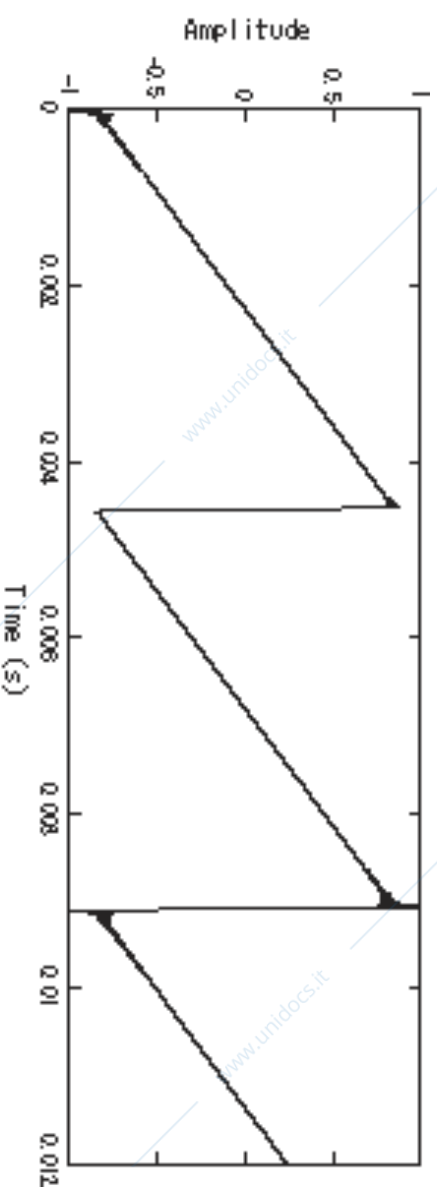




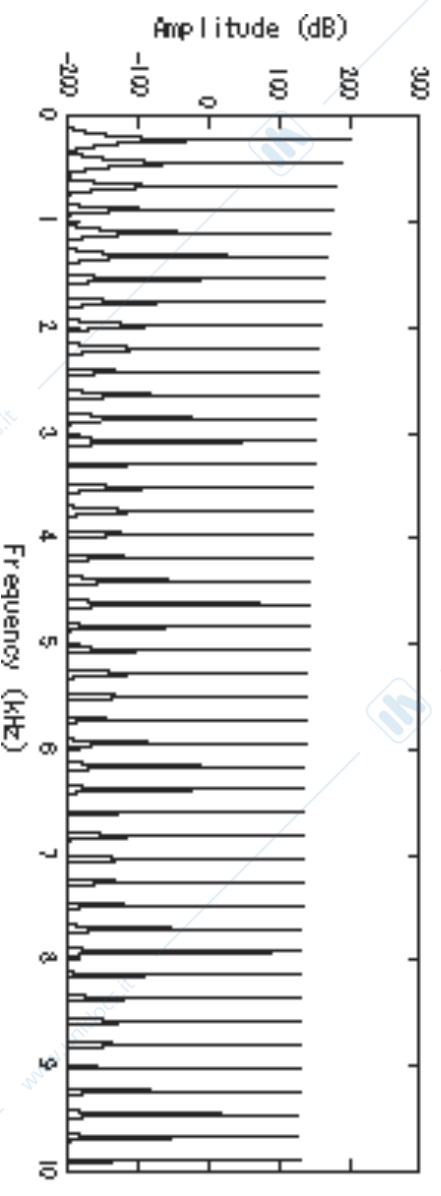
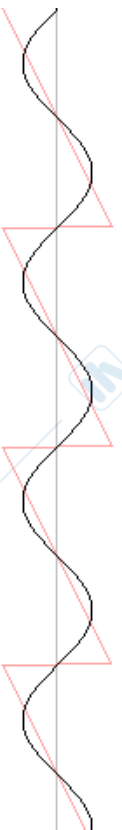
Spettro di un segnale

Esempio 3

- **Onda a dente di sega**
- **Spettro con armoniche sia pari che dispari**
 - ▶ $f_0 = 220 \text{ Hz}$
 - ▶ $T = 4.545 \text{ ms}$

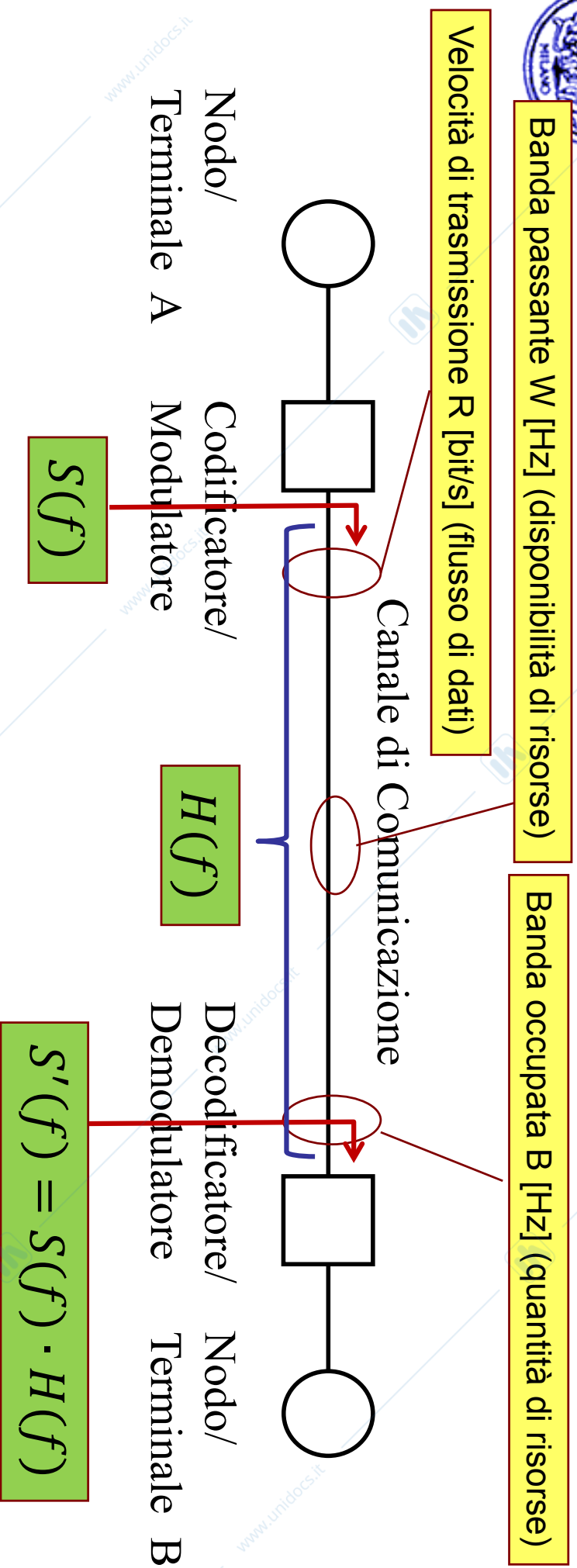


harmonics: 1





Banda occupata / banda passante



- L'estensione nelle frequenze dello spettro del segnale corrisponde alla banda occupata
- Canale di comunicazione lineare → Spettro del segnale ricevuto = spettro del segnale trasmesso \times funzione di trasferimento del canale
- Per evitare distorsioni il canale deve modificare lo spettro il meno possibile
 - ▶ Banda passante del canale > banda occupata dal segnale

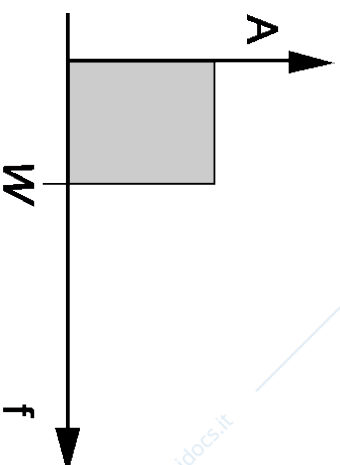


Canale di comunicazione

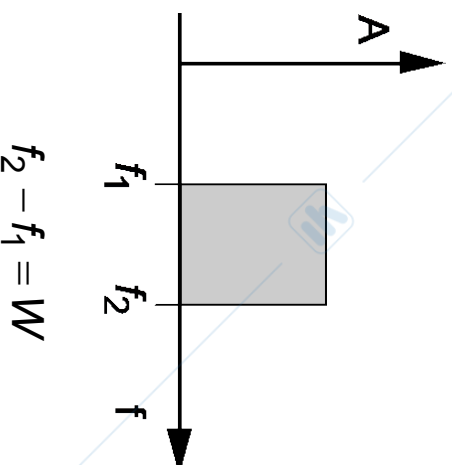
Larghezza di banda

- Canale a banda limitata W

▶ Passa-basso



▶ Passa-banda

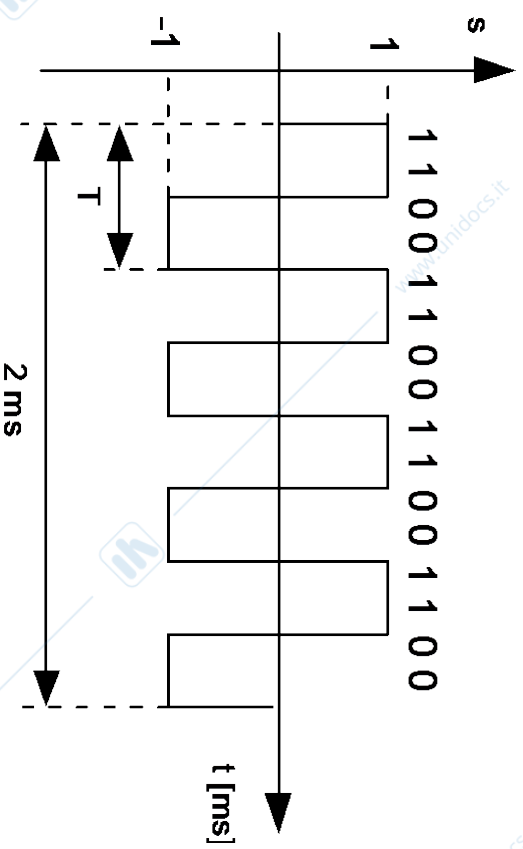




Attraversamento di canale Passa-basso di larghezza W

- **Segnale periodico**

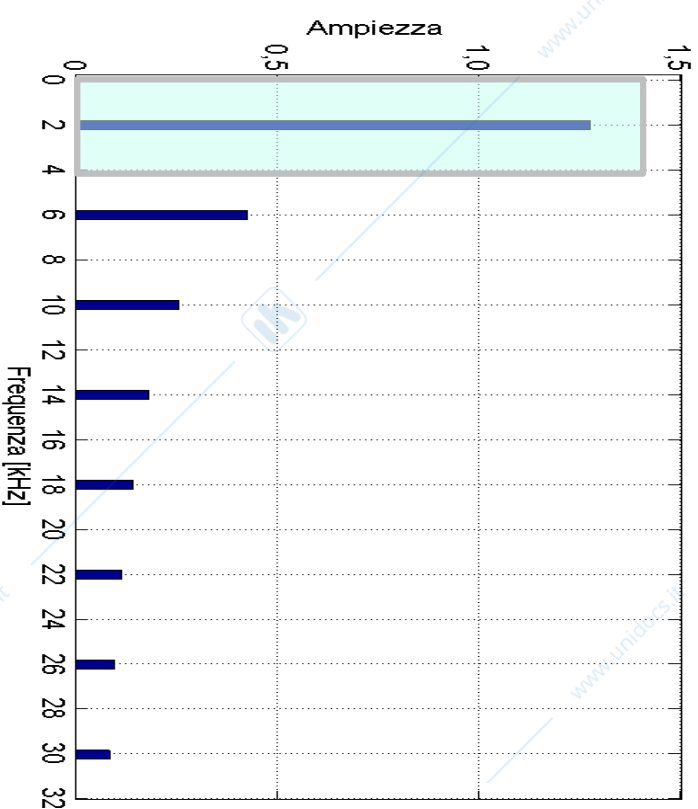
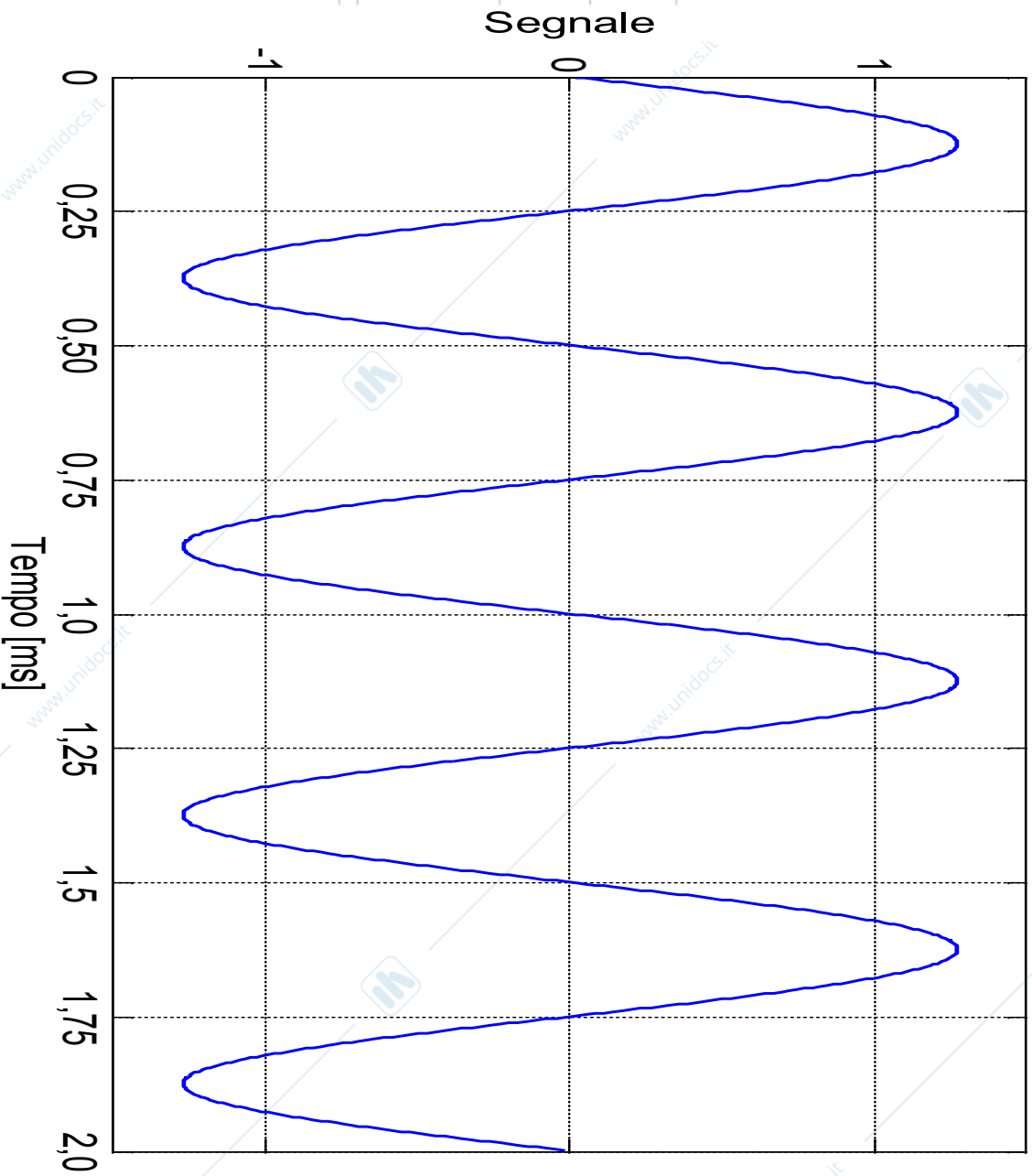
- ▶ $C = 8 \text{ kbit/s}$
- ▶ $T = 500 \text{ ms}$
- ▶ $F = 1/T = 2 \text{ KHz}$





Segnale in uscita

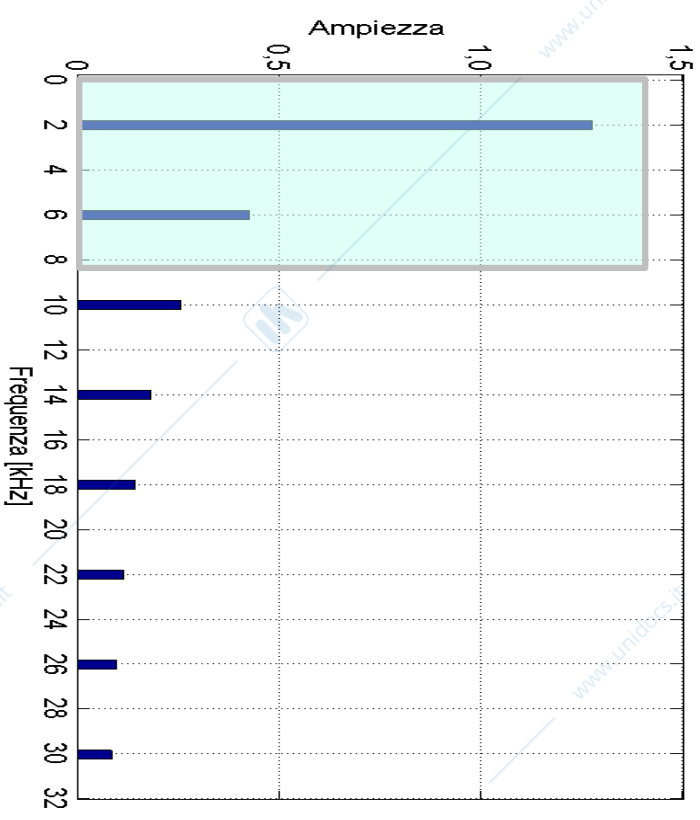
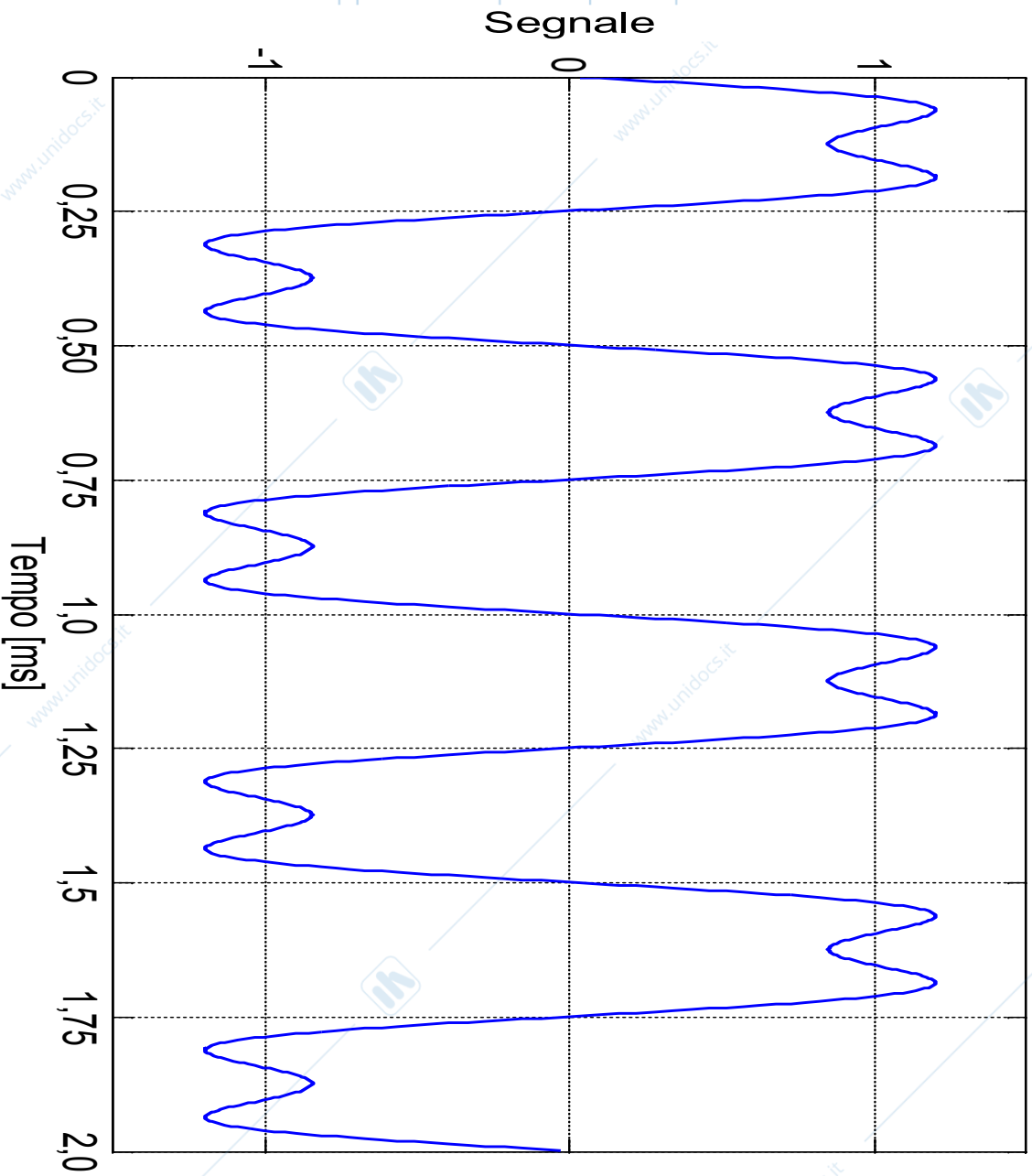
$W = 4 \text{ KHz}$





Segnale in uscita

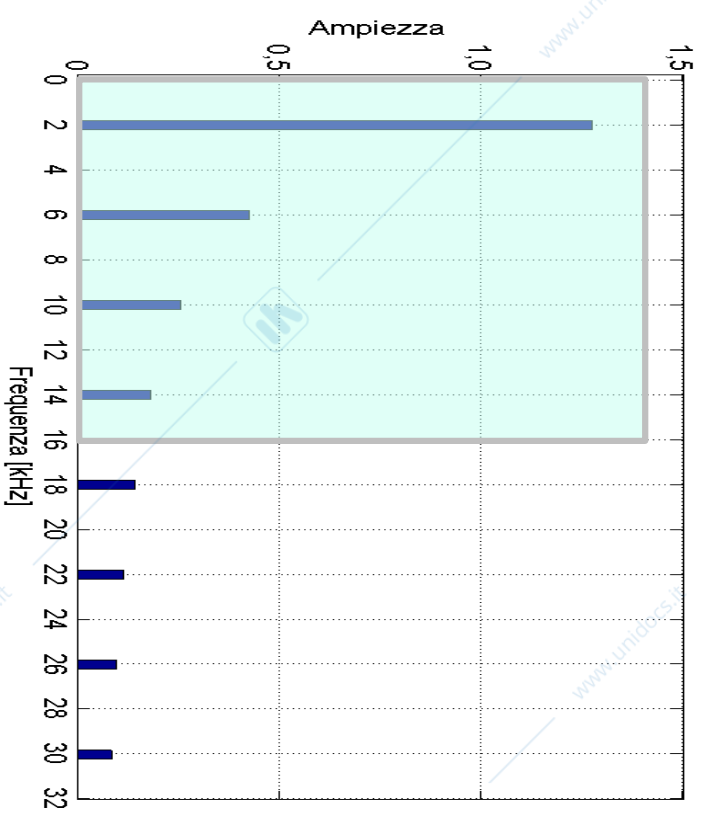
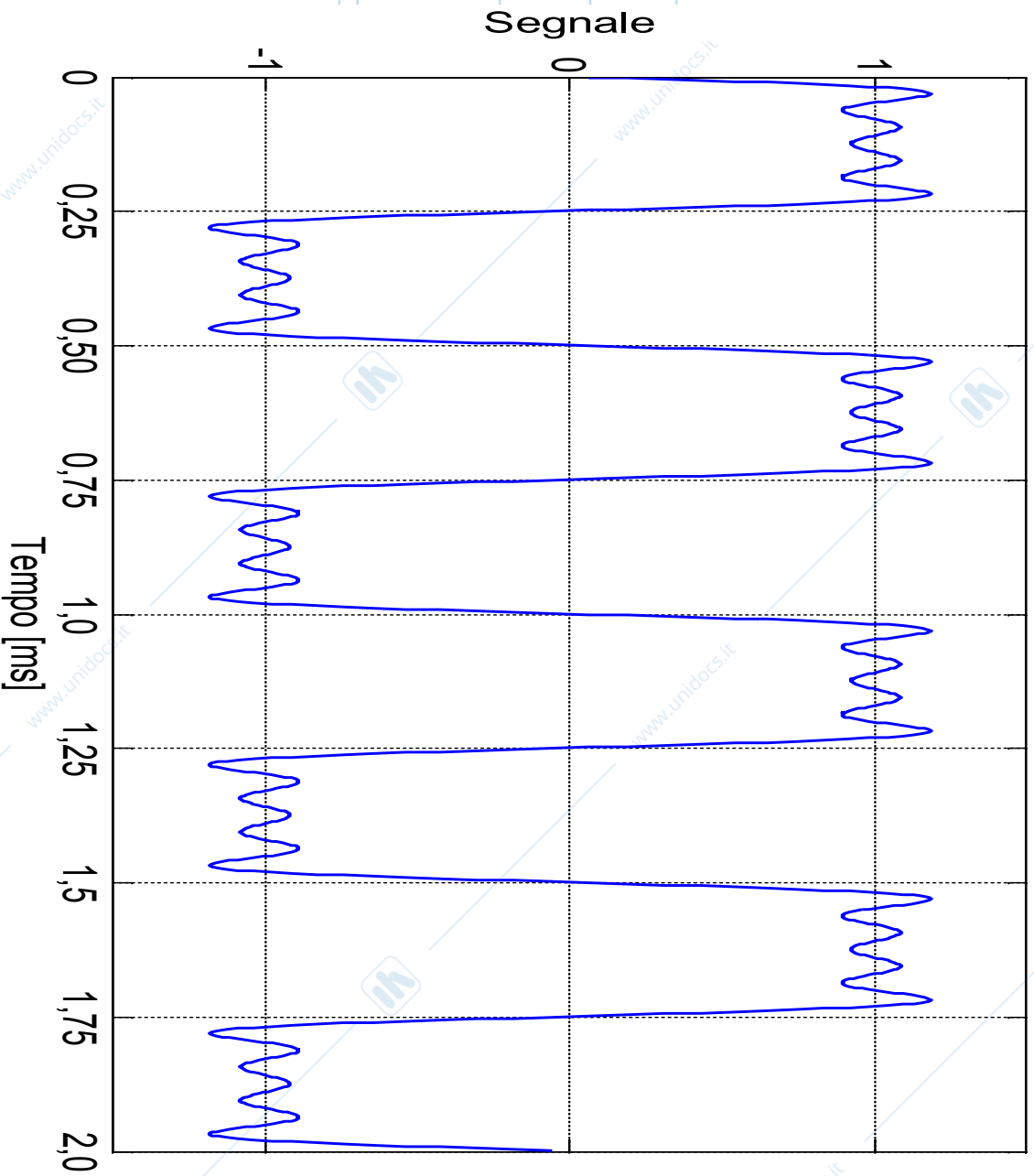
$\omega = 8 \text{ KHz}$





Segnale in uscita

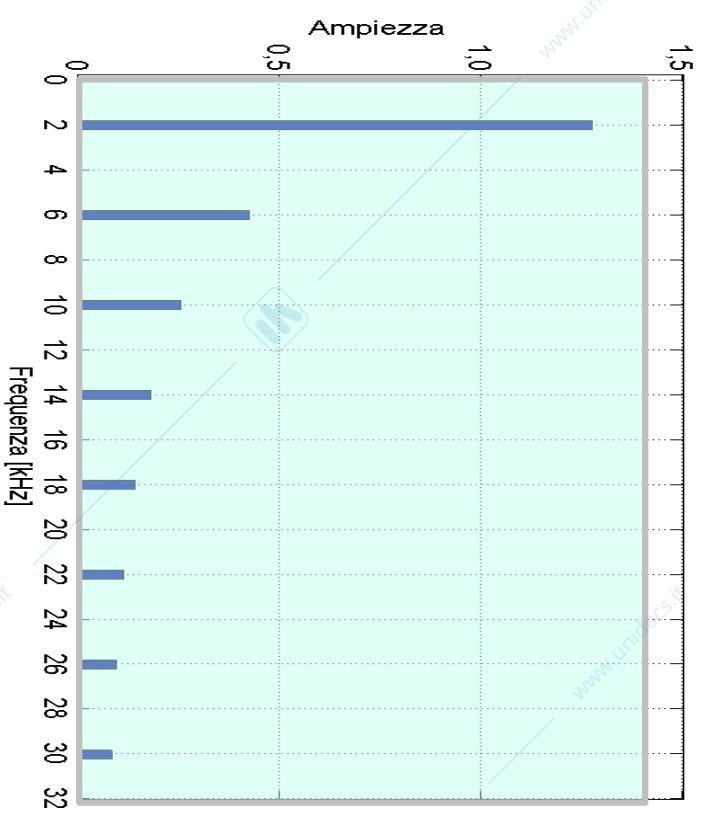
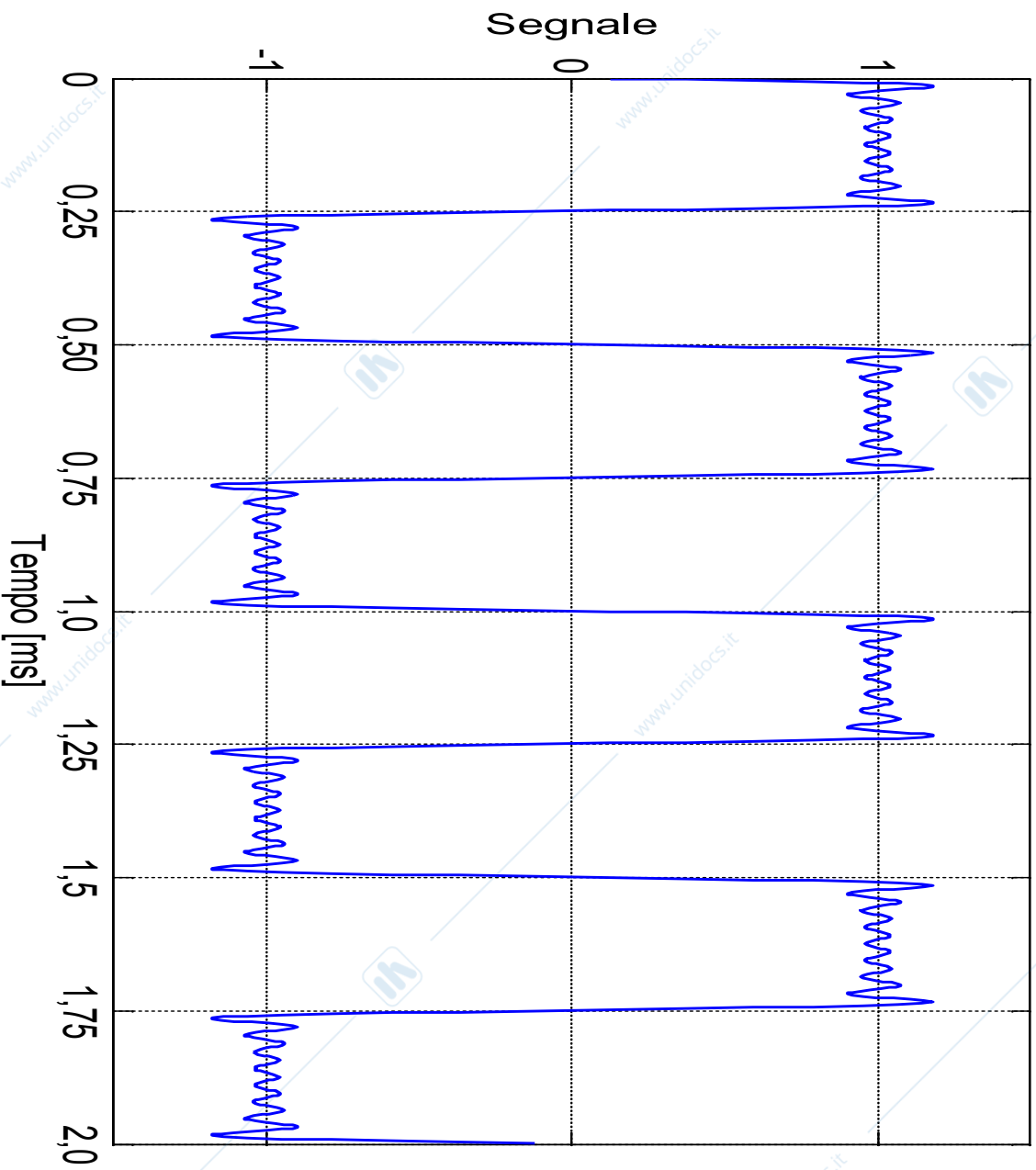
$\omega = 16 \text{ KHz}$





Segnale in uscita

$\omega = 32 \text{ KHz}$

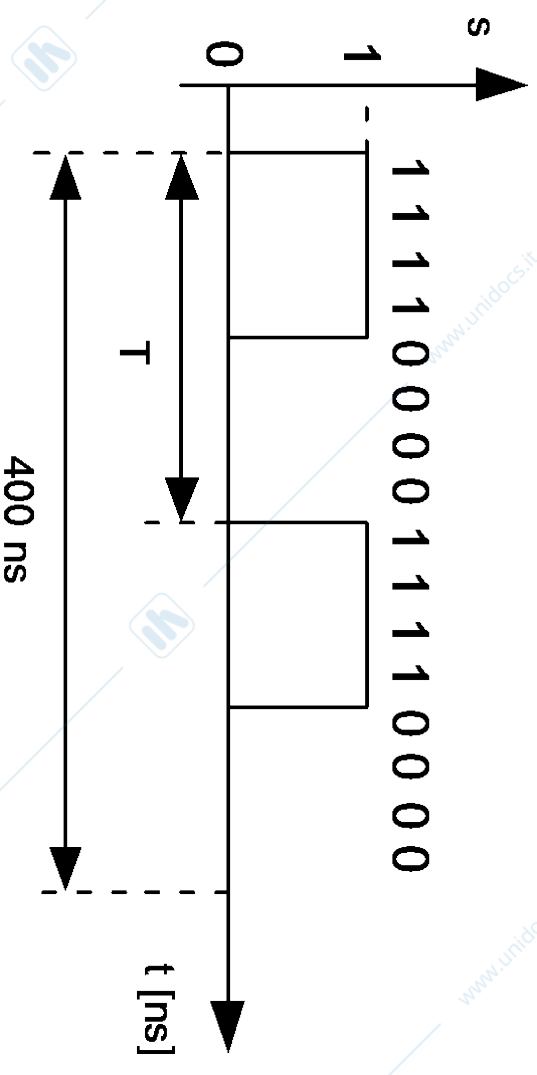




Attraversamento di canale Passa-basso di larghezza W

- **Segnale periodico**

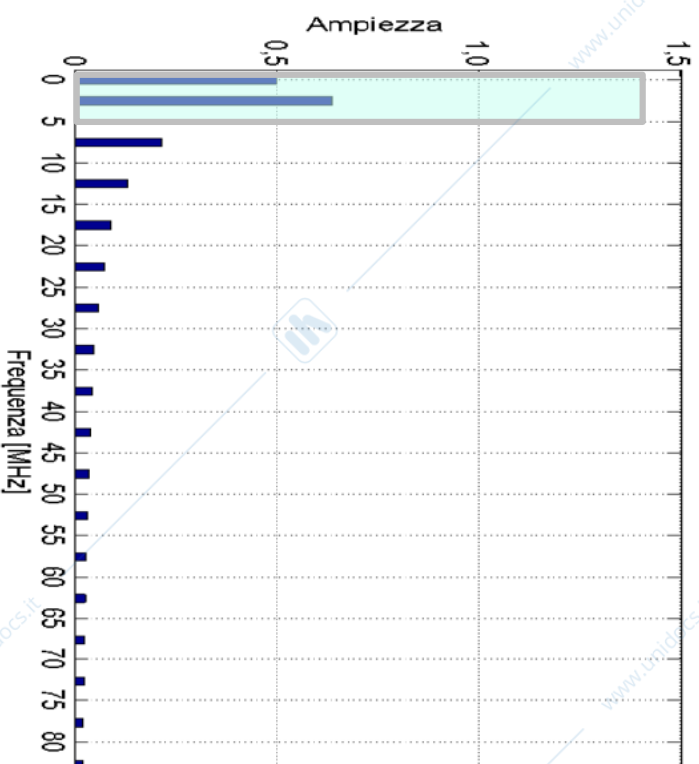
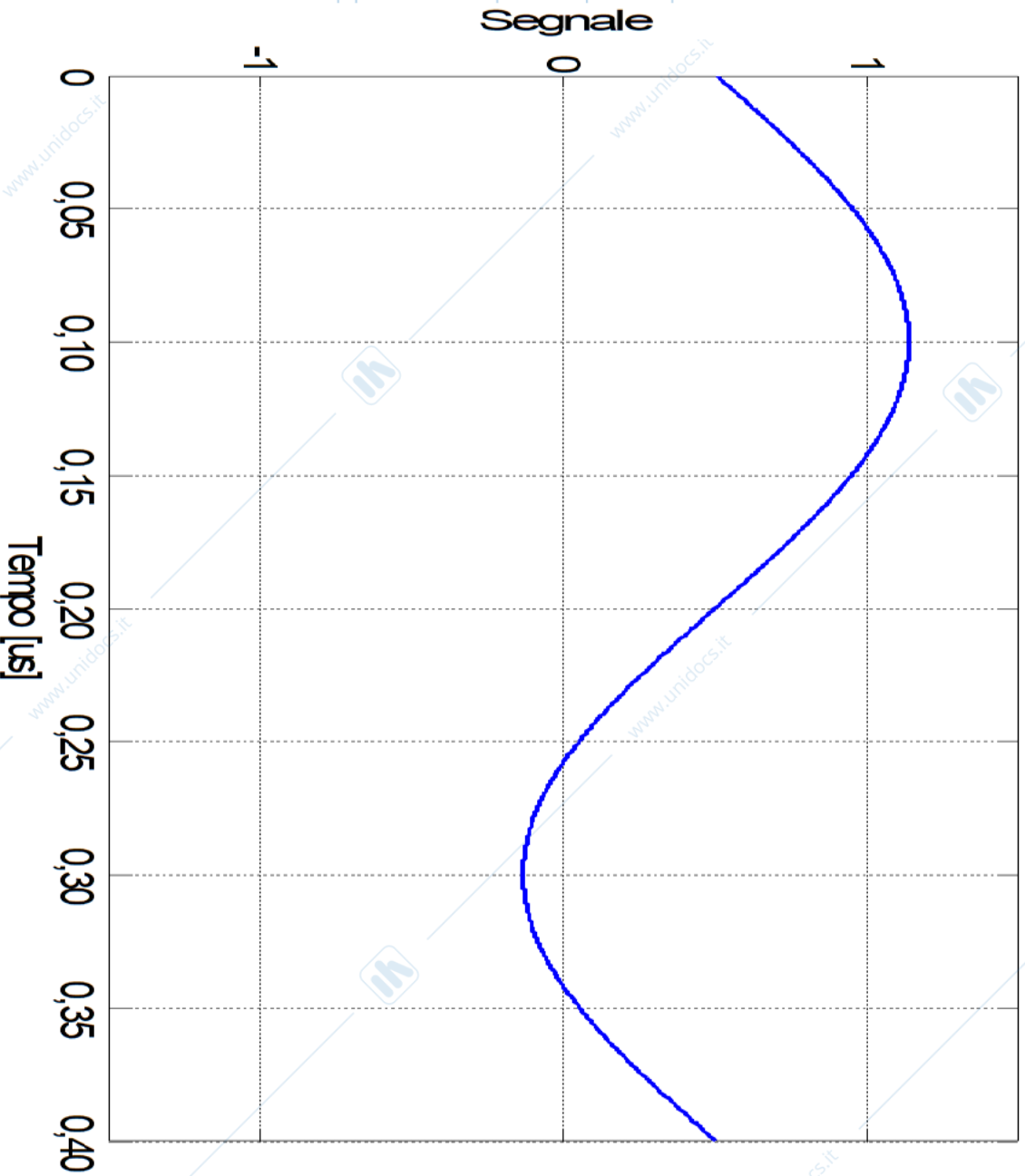
- ▶ $C = 40 \text{ Mbit/s}$
- ▶ $T = 400 \text{ ns}$
- ▶ $F = 1/T = 2,5 \text{ MHz}$





Segnale in uscita

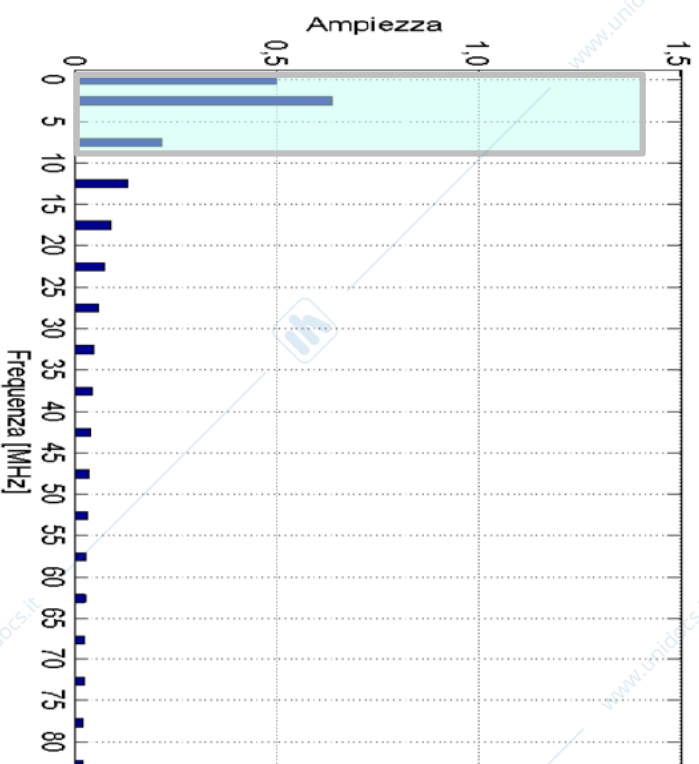
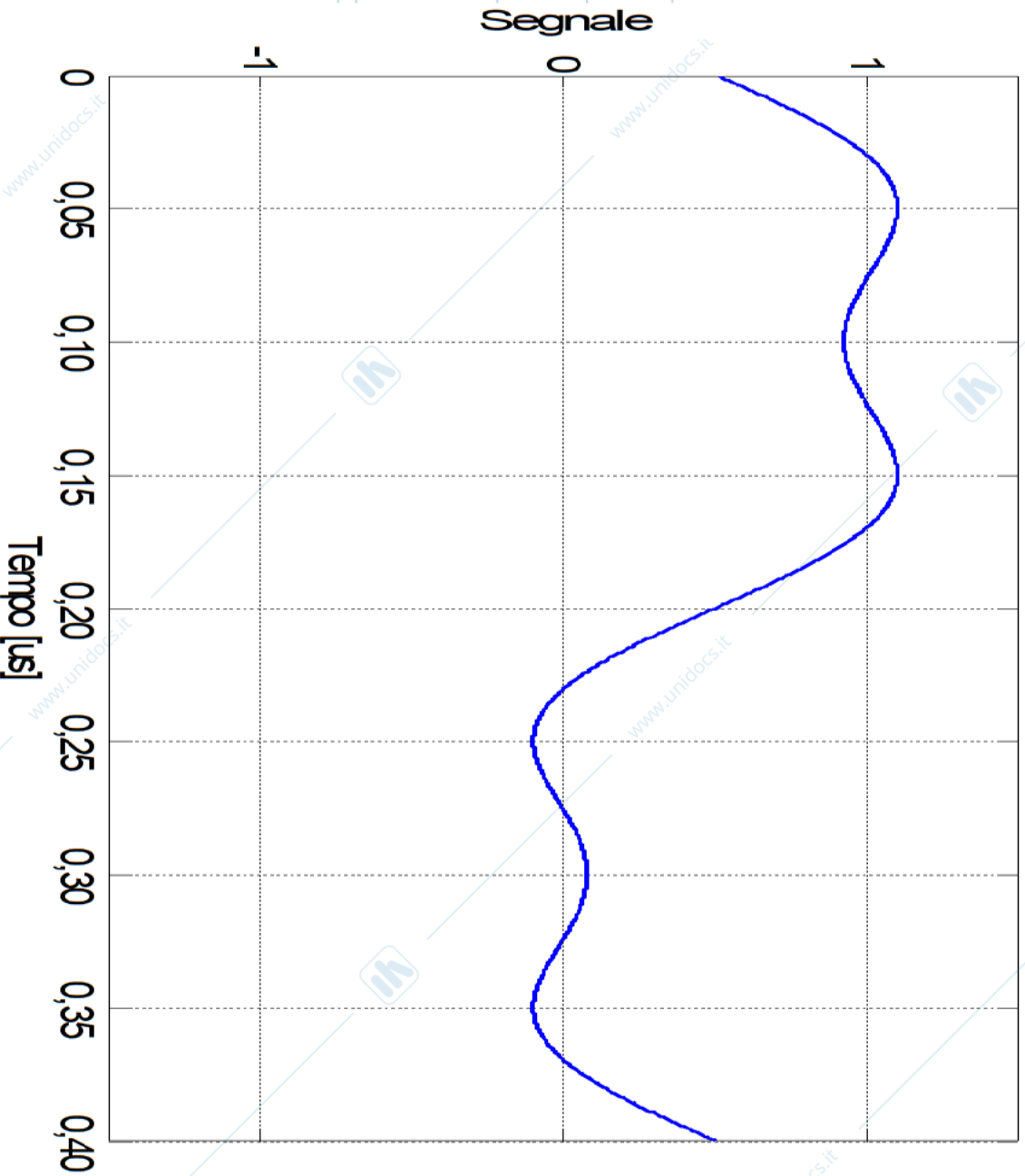
$W = 5 \text{ MHz}$





Segnale in uscita

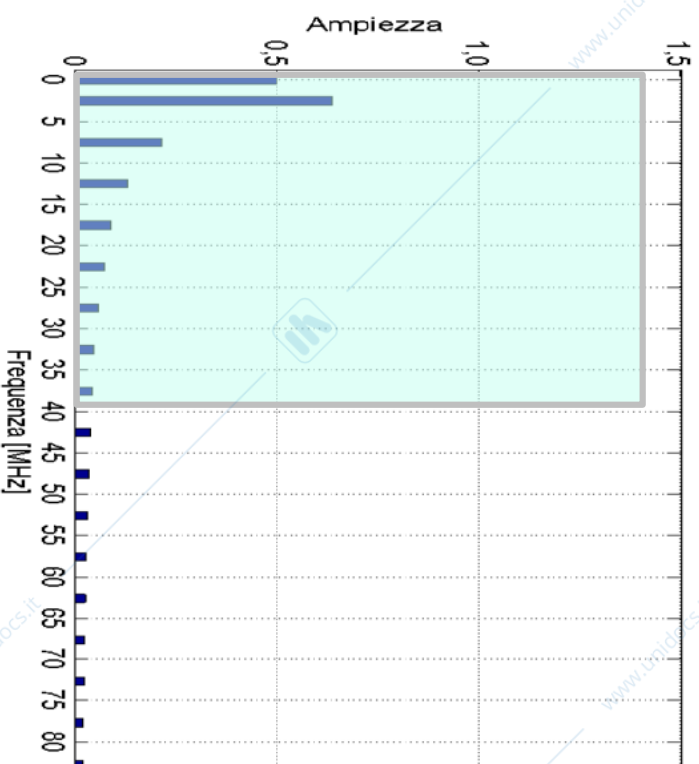
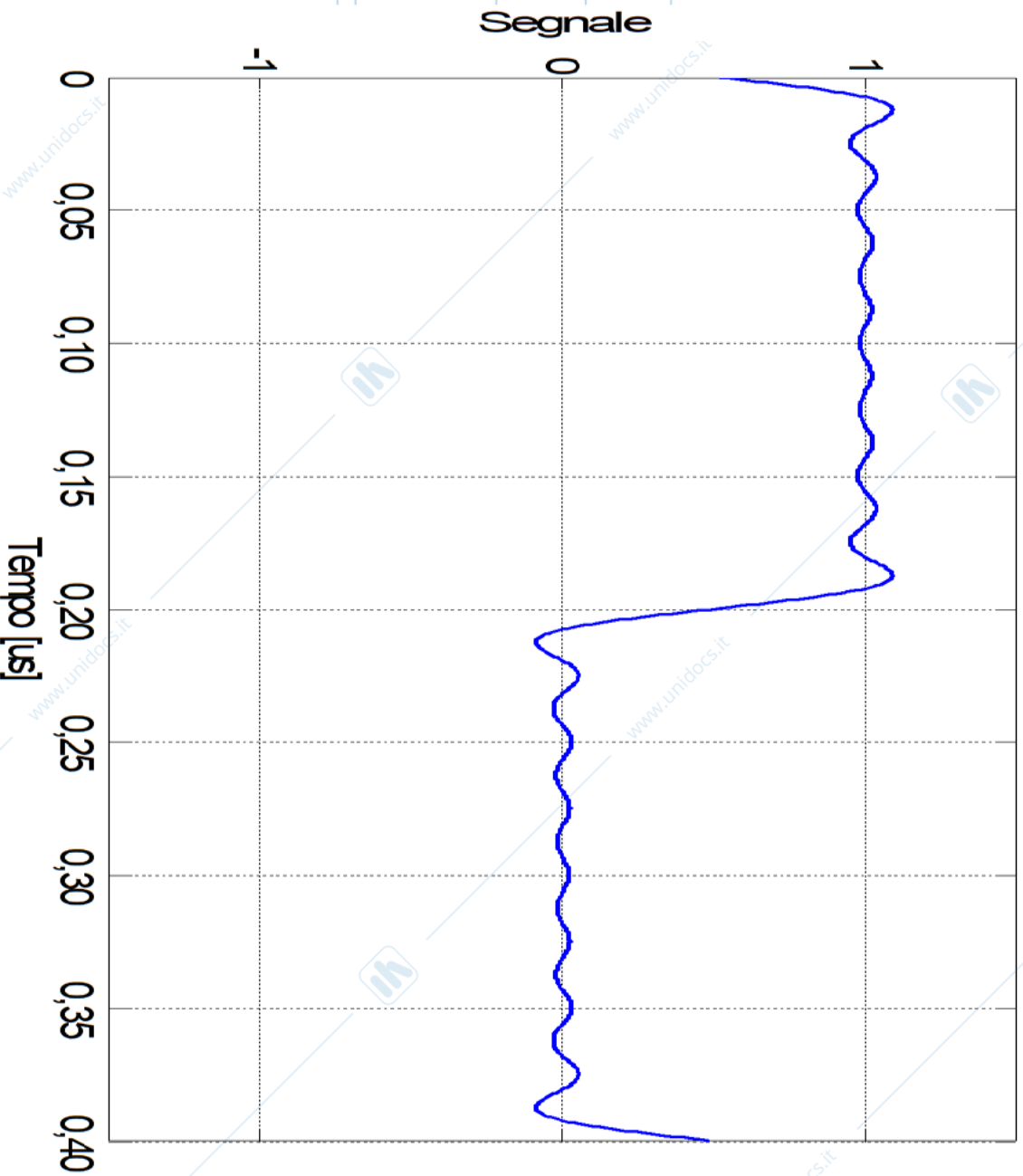
$W = 10\text{MHz}$





Segnale in uscita

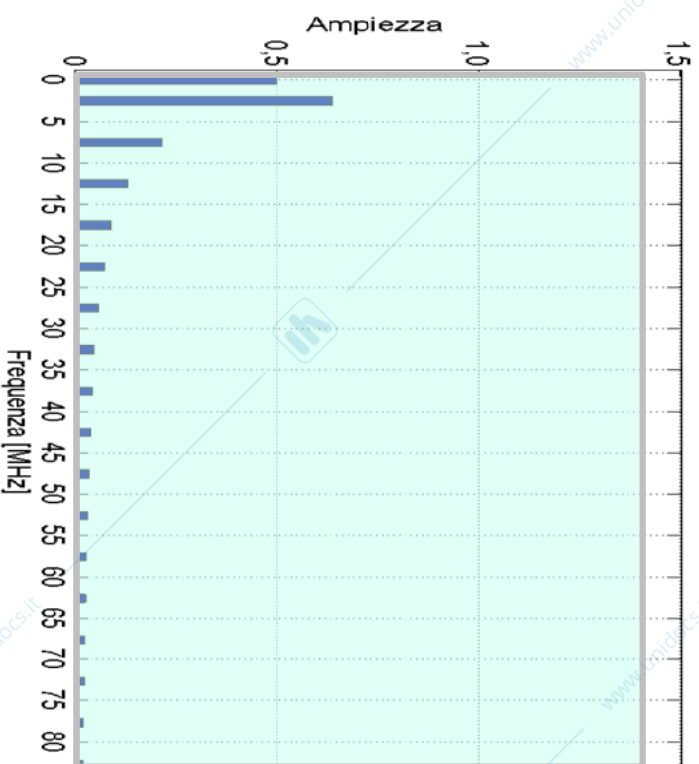
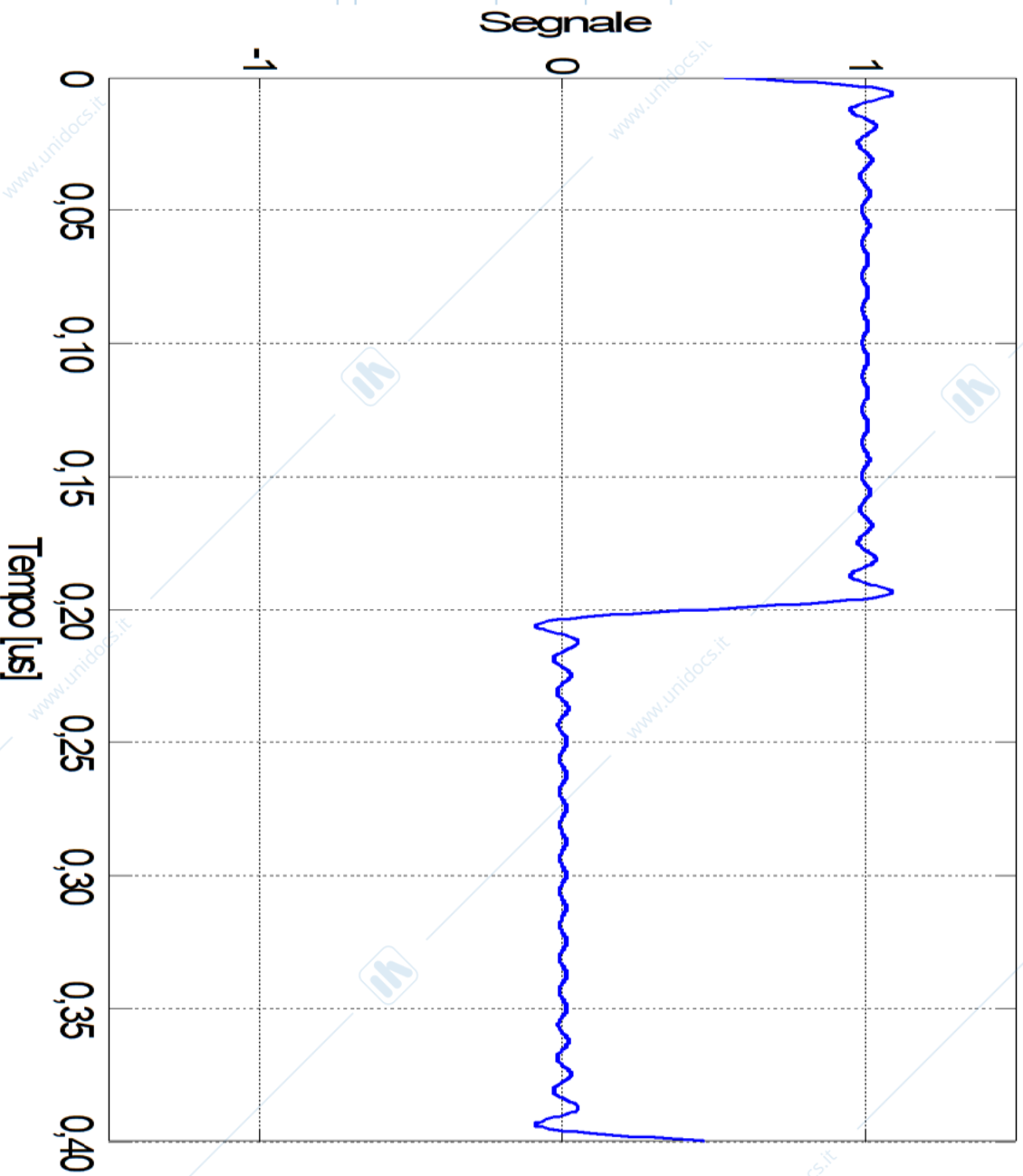
$\omega = 40 \text{ MHz}$





Segnale in uscita

$W = 80 \text{ MHz}$

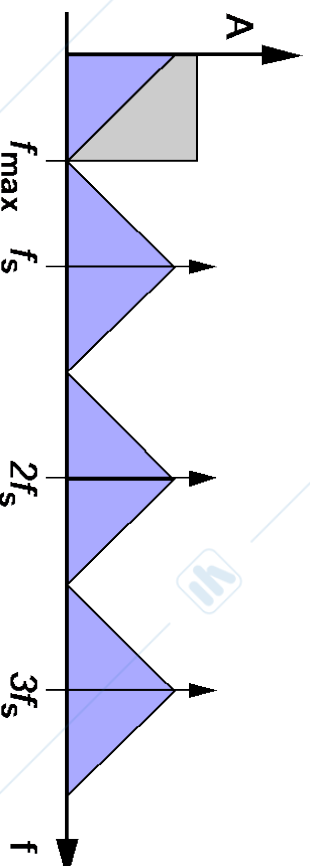




Segnali analogici

Conversione tempo-discreto

- **Conversione del segnale analogico in numerico**
 - ▶ Processo di campionamento
- **Teorema del campionamento**
 - ▶ Un segnale $s(t)$ limitato nella banda $[0, f_{max}]$ può essere campionato con frequenza $f_s \geq 2f_{max}$ e la sequenza dei campioni $s'(kT_s)$ racchiude tutta l'informazione del segnale originale $s(t)$
 - ▶ Spettro $S(f)$ del segnale campionato con frequenza $f_s = 2f_{max}$



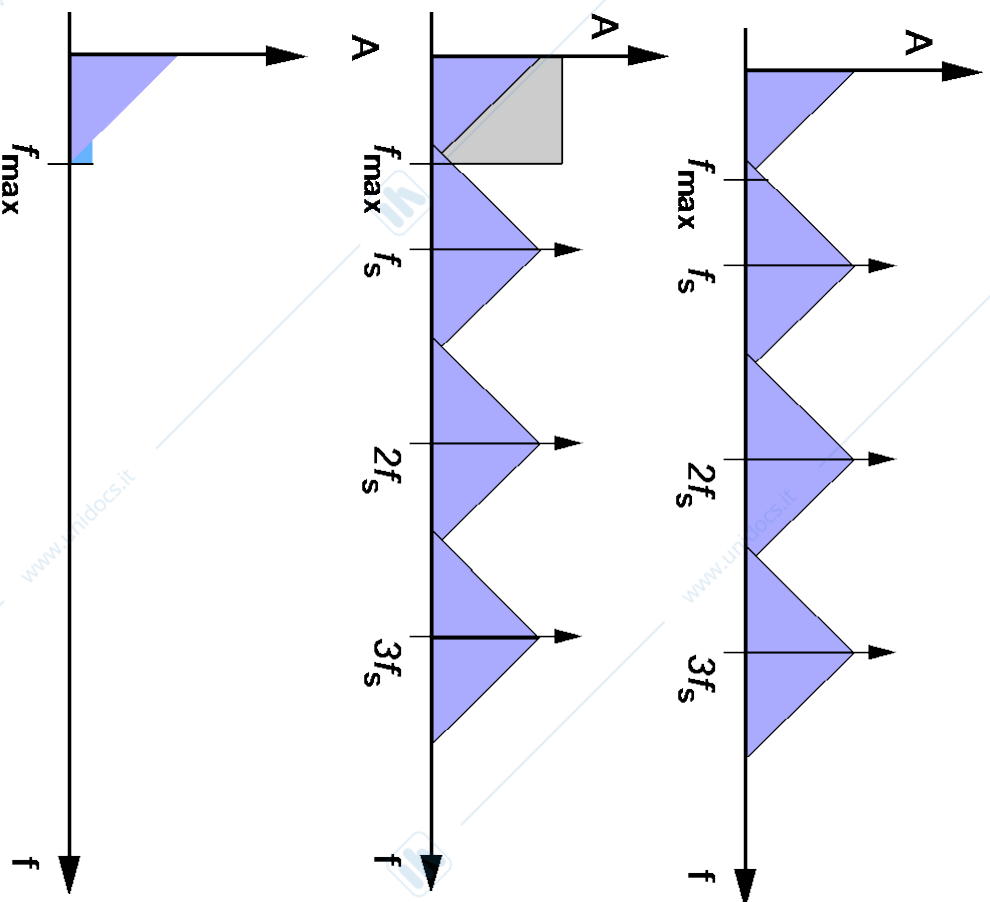
- ▶ Ricostruzione di $s(t)$ richiede un filtraggio passa-basso



Segnali analogici

Conversione tempo-discreto

- Spettro $S(f)$ del segnale campionato con frequenza $f_s < 2f_{\max}$
 - ▶ Aliasing (foldover distortion)

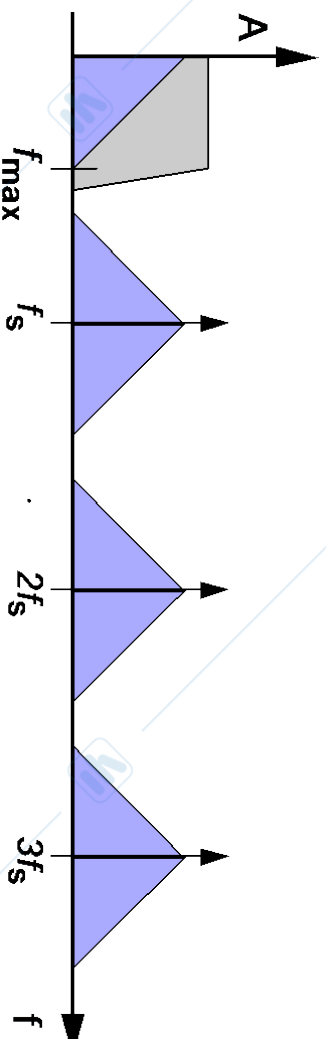




Conversione tempo-discreto

Degradazioni

- Campionamento non istantaneo: degradazione limitata se durata dell'impulso τ è molto piccola
- Filtro ideale non realizzabile \rightarrow sovracampionamento ($f_s > 2f_{max}$)



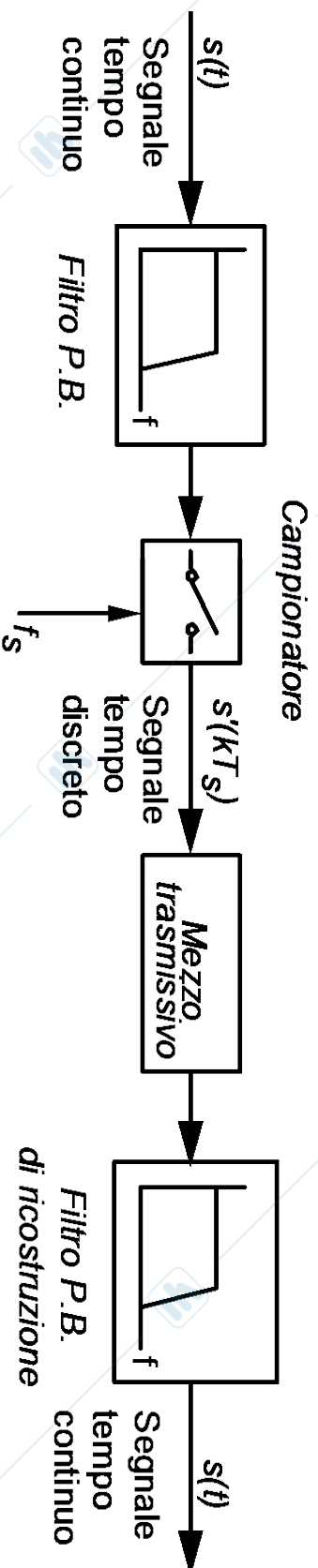
- ▶ Maschera di filtraggio reale



Segnali analogici

Trasmissione su canale ideale

- **Trasmissione di segnale limitato in banda su canale ideale tempo discreto**
($f_s \geq 2f_{max}$)

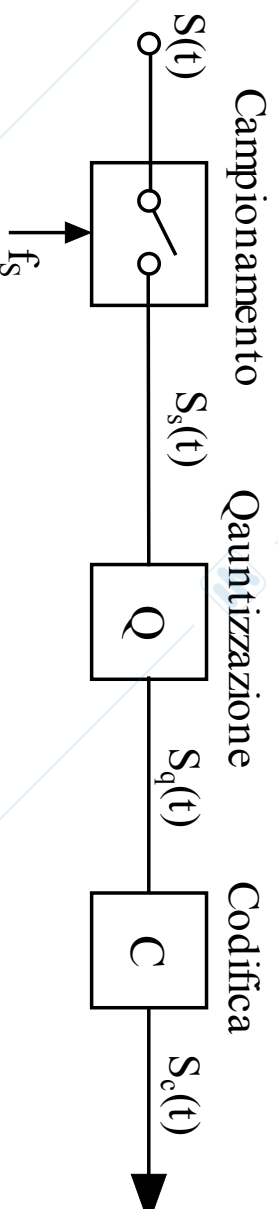




Segnali analogici

Conversione A/D

- **Conversione A/D**
 - ▶ Campionamento
 - ▶ Quantizzazione
 - Approssimazione del livello a uno di 2^b livelli predefiniti
→ rumore di quantizzazione
 - ▶ Codifica
 - Rappresentazione del campione con b bit
- **Scelta critica di b**
- **Segnale numerico con frequenza $f_s b$ (bit/s)**





Segnali analogici

Segnale vocale

- **Banda**
 - ▶ Netta: 300-3400 Hz
 - ▶ Lorda: 4KHz
- **Conversione A/D: Pulse Code Modulation (PCM) [ITU-T G.711]**
 - ▶ $T_s = 125 \mu s$
 - ▶ $f_s = 8 \text{ KHz}$
 - ▶ $b = 8$
 - ▶ $F_c = 64 \text{ kbit/s}$
- ▶ **Caratteristiche di quantizzazione**
 - Legge A (Europa)
 - Legge μ (Nord-America, Giappone)
- **Altre conversioni A/D**
 - ▶ Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM)
 - $F_c = 16\text{-}32 \text{ kbit/s}$
 - ▶ Code Excited Linear Predictive Coding (CELP)
 - $F_c < 10 \text{ kbit/s}$



Segnali analogici

Altri segnali

- **Segnali per CD audio**
 - ▶ $f_s = 44 \text{ KHz}$
 - ▶ $b = 16$
 - ▶ Flusso numerico segnale audio stereo: $F_c = 1,4 \text{ Mbit/s}$
 - ▶ Tecniche di compressione riducono la capacità richiesta
 - Es. mp3
- **Segnali video**
 - ▶ Capacità dell'ordine di Mbit/s
 - ▶ Tecniche di compressione riducono la capacità richiesta



Sommario

- **Segnali**
- **Mezzi trasmissivi**



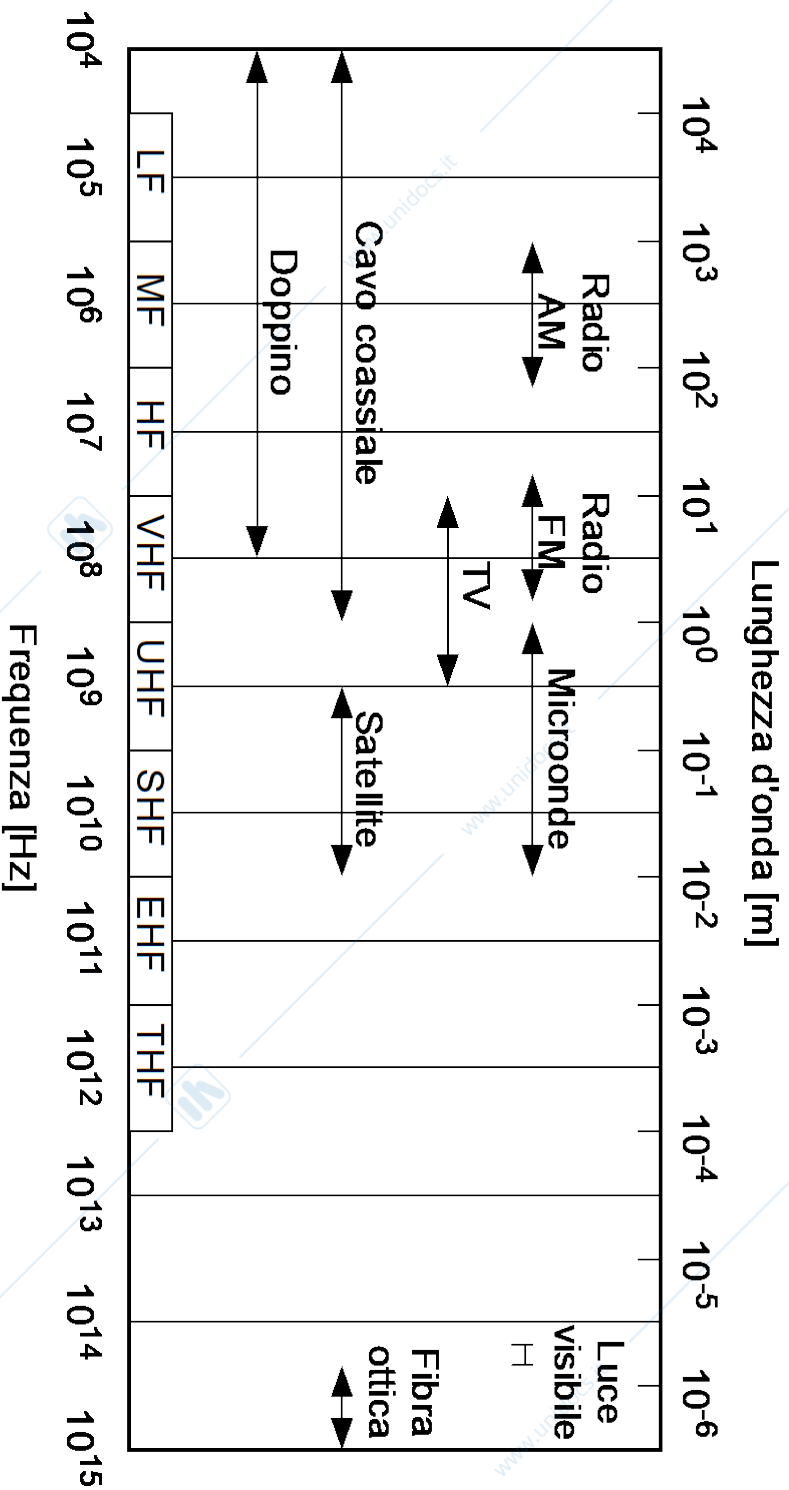
Sommario

- **Segnali**
- **Mezzi trasmissivi**
 - ▶ Spettro elettromagnetico
 - ▶ Mezzi guidati
 - ▶ Power budget



Mezzi trasmissivi

Spettro



$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- LF = Low Frequency
- MF = Medium Frequency
- HF = High Frequency
- VHF = Very High Frequency
- UHF = Ultra High Frequency
- SHF = Super High Frequency
- EHF = Extremely High Frequency
- THF = Tremendously High Frequency



Mezzi trasmissivi

Cavo coassiale

- **Cavo coassiale RG-213**
 - ▶ Un conduttore centrale in rame di tipo solido
 - ▶ Isolante in materiale espanso o compatto (teflon)
 - ▶ Due schermi in foglio di alluminio
 - ▶ Due schermi in calza
 - ▶ Ethernet 10Bases5 (Thick Ethernet)



- **Cavo coassiale RG-58**

- ▶ Un conduttore centrale in rame di tipo trefolato
- ▶ Isolante in materiale espanso o compatto
- ▶ Uno schermo in foglio di alluminio e uno schermo in calza
- ▶ Attenuazione 2.7 volte superiore al cavo Thick
- ▶ Ethernet 10Base2 (Thin Ethernet)



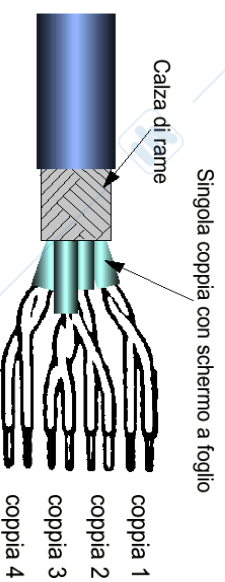
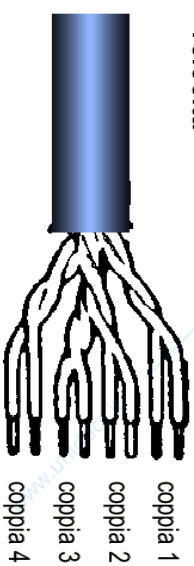
Attenuazione tipica:
thick → 5-8 dB/100m
thin → 10-15 dB/100m



Mezzi trasmissivi

Doppino

- **Doppino non schermato UTP (Unshielded Twisted Pair)**
 - ▶ A 1 coppia o due coppie per fonìa
 - ▶ A 4 coppie nel cablaggio strutturato
 - ▶ Multicoppie (10, 20, 25, 50, 100, 300 coppie) sulle dorsali fonìa
 - ▶ A volte su dorsali dati a basse o medie capacità
- **Doppino schermato STP (Shielded Twisted Pair)**
 - ▶ Doppino con singole coppie schermate più schermo globale
 - ▶ Ad es., 4 coppie singolarmente schermate in foglio + 1 schermo globale in calza
 - ▶ Utilizzato nel cablaggio strutturato
 - ▶ Ridottissima diafonia tra le coppie, costo elevato, difficile da intestare sui plug RJ45 schermati
- **Doppino schermato FTP (Foiled Twisted Pair)**
 - ▶ Doppino con solo schermo globale costituito da 1 foglio di alluminio e da 1 calza in rame





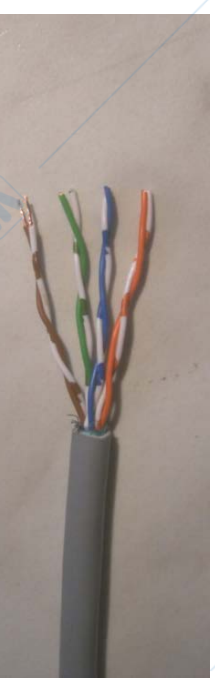
Mezzi trasmissivi

Doppino UTP

- **Cat. 1:** per telefonia analogica
- **Cat. 2:** per telefonia digitale e trasm. dati a bassa capacità
- **Cat 3:** B=16 MHz
 - ▶ Ethernet 10BaseT e 100BaseT4, Token Ring 4 Mb/s
- **Cat. 4:** B=20 MHz
 - ▶ Token Ring 16 Mb/s
- **Cat. 5:** B=100 MHz
 - ▶ Ethernet 100Base-TX (RJ-45), FDDI MLT-3
- **Cat. 5E:** B=100 MHz
 - ▶ reti locali Gigabit Ethernet 1000Base-TX
 - ▶ Introdotto per (Ri)Classificare i Cablaggi UTP Cat. 5 che soddisfano Test di verifica per il supporto di Gigabit Ethernet
- **Cat. 6:** B=250 MHz su 100 m
- **Cat. 7:** B=600 MHz - Draft



UTP Cat. 1



UTP Cat. 5

Attenuazione tipica:

UTP 5 → 20 dB/100m

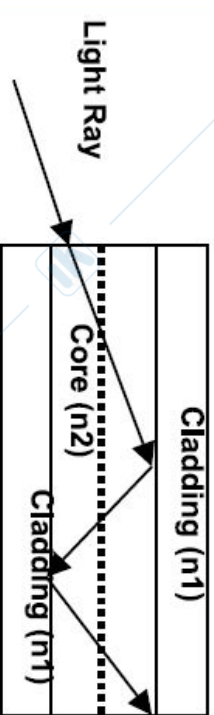
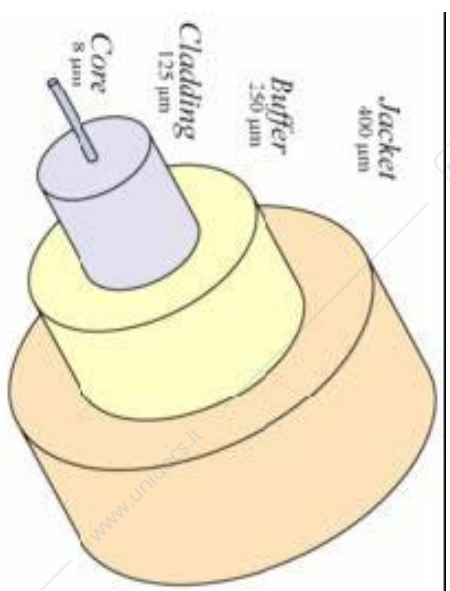




Mezzi trasmissivi

Fibre ottiche

- **Struttura guidante per i segnali ottici ad altissima efficienza**
- **Il salto d'indice di rifrazione n_1-n_2 all'interfaccia tra core e cladding determina il confinamento dei fasci e l'instaurazione di modi di propagazione**
- **Due tipi di fibra:**
 - ▶ Multimodo: diametro di core grande (50 - 62 μm)
 - ▶ Singolo modo: diametro di core piccolo ($<10\mu\text{m}$)

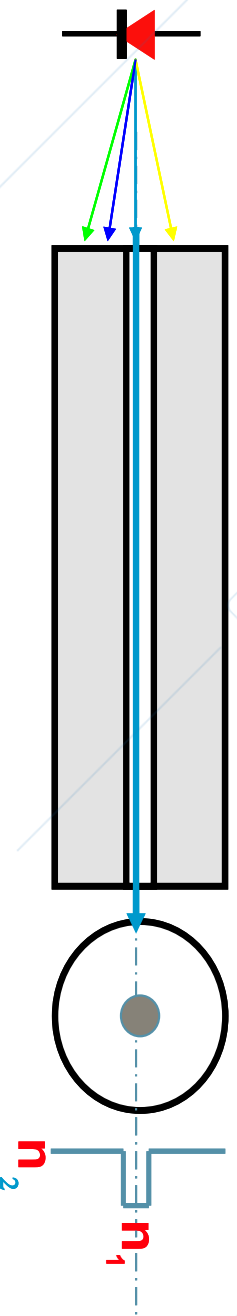




Mezzi trasmissivi

Fibre ottiche

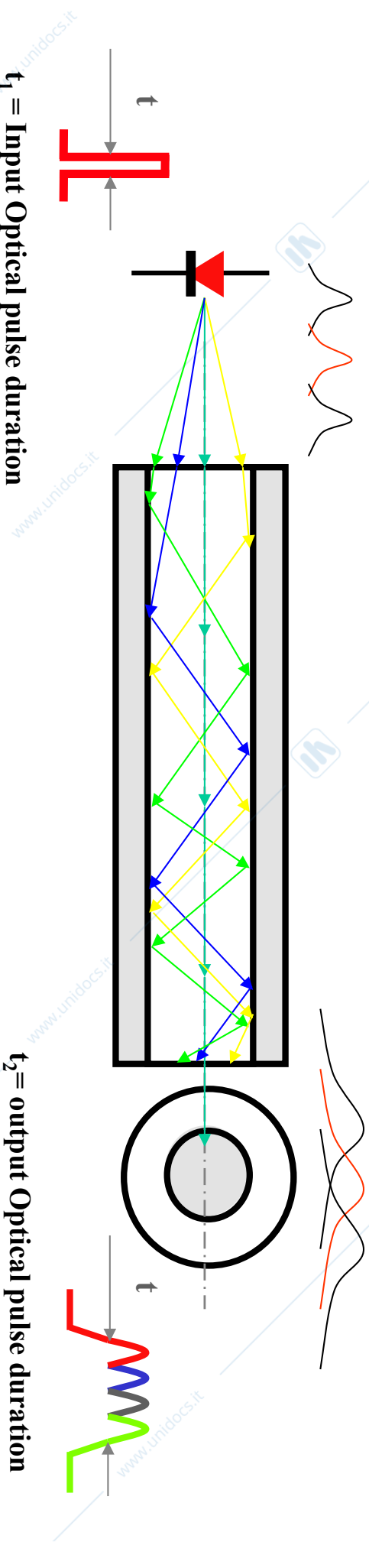
- **Fibre ottiche monomodo: la luce si propaga in 1 modo**
 - ▶ La fibra si comporta come guida d'onda: un solo modo di propagazione
 - ▶ Non si ha dispersione modale
 - ▶ La banda passante è elevatissima (decine di THz)
 - ▶ Lavorano in finestra II e III (1300 e 1500 nm)
 - ▶ Si trasmette con Laser
 - Più costosi dei LED
 - Coprono distanze maggiori a capacità maggiori
 - ▶ Difficoltà interconnessione
 - Aumenta al diminuire delle dimensioni del core



Mezzi trasmissivi

Fibre ottiche

- **Fibre ottiche multimodo: la luce si propaga con diversi percorsi:**
 - ▶ Step-index (oggi non più utilizzate)
 - ▶ Graded-index (utilizzate tipicamente nelle reti locali)
 - La variazione continua degli indici di rifrazione rallenta i raggi centrali
 - La banda passante superiore a quelle step-index
 - Finestra I e II (850 e 1300 nm)
 - ▶ Si trasmette con
 - LED poco costosi
 - ▶ Bit-rate d'esercizio limitato dal fenomeno della **dispersione modale**



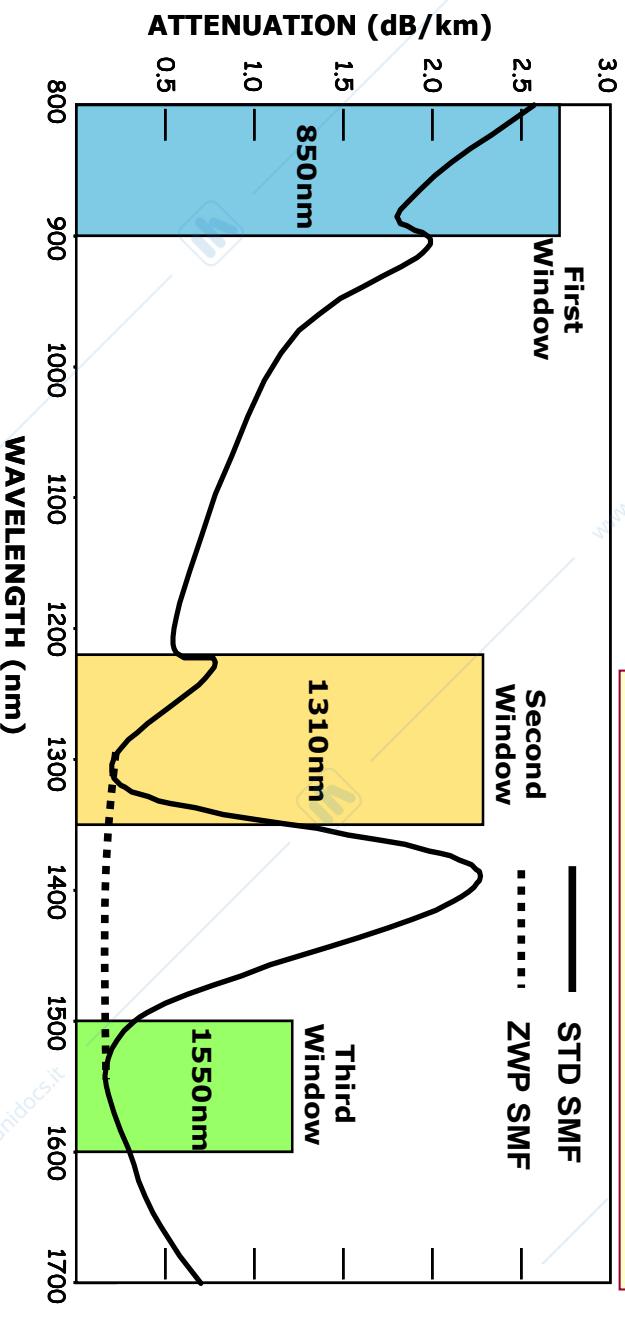


Mezzi trasmissivi Fibre ottiche - finestre trasmissive

- I vari tipi di attenuazione si combinano dando luogo a tre intervalli di lunghezze d'onda entro i quali conviene scegliere le lunghezze d'onda

- **Caratteristiche delle finestre di trasmissione**

- ▶ I finestra
 - λ centrale: 820 nm
 - α tipico: 2.0 dB/km
 - sorgenti economiche
- ▶ II finestra
 - λ centrale: 1310 nm
 - α tipico: 0.4 dB/km
 - sorgenti a medio costo
- ▶ III finestra
 - λ centrale: 1550 nm
 - α tipico: 0.2 dB/km
 - sorgenti più costose
 - amplificatore ottico EDFA





Mezzi trasmissivi

Attenuazione dei vari mezzi trasmissivi - Sommario

- Cavo Coassiale Thick $\alpha = 5-8\text{dB}$ ogni 100m
- Cavo Coassiale Thin $\alpha = 10-16\text{dB}$ ogni 100m
- Doppino $\alpha = 20\text{ dB}$ ogni 100m
- Fibra $\alpha = 0.2\text{dB}$ al km
- **Data la formula: $P_{\text{RX}}[\text{Potenza ricevuta}] = P_{\text{TX}}[\text{Potenza trasmessa}] \times 10^{-(\alpha L/10)}$**
 - ▶ Provatate a vedere, sostituendo opportunamente α , la potenza ricevuta dopo un solo km in fibra o in doppino...



Fondamenti di trasmissione

- 40 -

Achille Pattavina

END



Power budget

- **POWER BUDGET: differenza (in dB) tra potenza media del trasmettitore e la sensitivity del ricevitore**
 - ▶ E' la "dotazione" di potenza del sistema che si può "spendere" per supportare
 - tutte le attenuazioni note: attenuazione di linea $\alpha \cdot l$, altre attenuazioni A_{extra} (es. connettori, giunzioni, ecc.)
 - un margine di sistema M per gli "imprevisti"

$$P_{TX} - P_{RX} = \alpha \cdot l + A_{extra} + M$$

- Si misura in dB (e non in dBm)

- **Altra formula classica (non in dB): $P_{RX} = P_{TX} \times 10^{-(\alpha L/10)}$**
 - ▶ Provate a vedere, sostituendo
- **Primo strumento di dimensionamento per un sistema trasmissivo**