

# Fondamenti sulle rappresentazioni digitali e le comunicazioni

## e

# Laboratorio su Elaborazione digitale dei segnali

Corso: Fondamenti di comunicazioni e Internet (canale I e II)

Introduzione (segnali continui e discreti)

Tiziana Cattai  
email: [tiziana.cattai@uniroma1.it](mailto:tiziana.cattai@uniroma1.it)



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Informazioni generali

## Fondamenti di Comunicazioni (3 CFU)

Obiettivo: Fondamenti sulle comunicazioni, uso dei segnali digitali e loro elaborazione

- Lezioni
  - Mercoledì 18-20 (Aula 108, Marco Polo) per Fondamenti di comunicazioni ed Internet (canale I)
  - Giovedì 8:00-10:00 (Aula 108, Marco Polo) per Fondamenti di comunicazioni ed Internet (canale II)
  - Eventuali modifiche saranno comunicate durante il corso
- Le giornate dedicate alle esercitazioni saranno stabilite durante il corso
- Riferimenti: Tiziana Cattai email: [tiziana.cattai@uniroma1.it](mailto:tiziana.cattai@uniroma1.it)

Per ricevimento contattare il docente

# Informazioni generali

- Modalità di esame (appelli gennaio e febbraio)  
**Due homework (I° Settimana 11 Novembre, II° 16 Dicembre) sulla parte di laboratorio**  
Vale 10 punti  
**Una prova scritta a gennaio o febbraio**
  - Una parte con domande a risposta multipla (vale 15 punti)
  - 1 Esercizio (vale 5 punti)**Punti Bonus – 2 prove intermedie in aula su moodle durante il corso** quiz i cui punti totali (massimo 2 punti per prova) sono da utilizzare come punti bonus esclusivamente nell'appello di Gennaio o Febbraio 2025
- Modalità di esame (appelli da marzo in poi)  
**Una prova scritta**  
Una parte con domande a risposta multipla (vale 15 punti)  
1 Esercizio (vale 5 punti)  
**Una prova orale a valle della correzione dello scritto**  
Vale +10 (-5) punti  
**No punti Bonus**

# Informazioni generali

- Materiale Didattico:

Tutto il corso è interamente coperto dalle slides delle lezioni disponibili su Moodle

Testi di riferimento:

- Teoria dei segnali, Luise, Vitetta
- Teoria dei segnali, Cusani
- probability random variables and stochastic processes, Papoulis

# Programma

- Introduzione. Rappresentazione digitale dell'informazione, concetto di segnale certo.
- Classificazione dei segnali. Proprietà di segnali.
- Definizione di energia, potenza.
- Operazioni sui segnali.
- Rappresentazione dei segnali in frequenza: trasformata di Fourier (segnali a tempo continuo

e discreto) e proprietà

- Convoluzione e correlazione tra segnali. Spettro di densità di energia e potenza
- Transito dei segnali nei sistemi. Proprietà. Risposta impulsiva

---

• Campionamento: teorema del campionamento, condizione di Nyquist. Conversione analogico

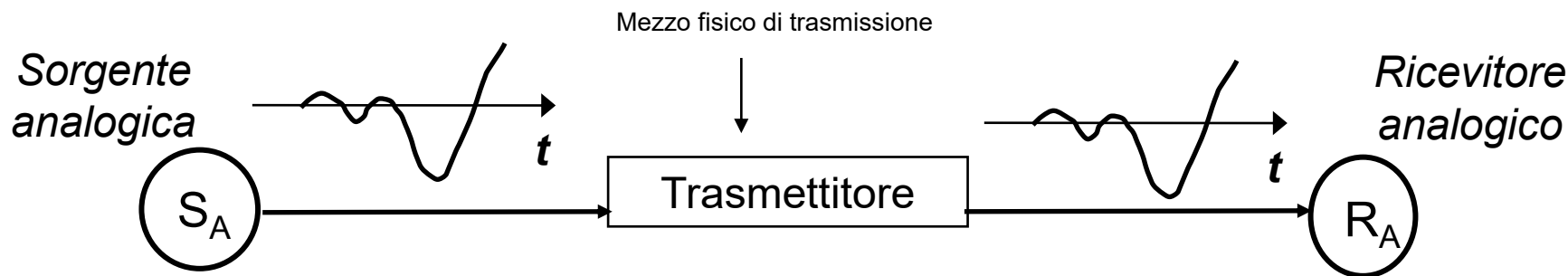
digitale. Quantizzazione e Codifica.

- Trasmissione in banda base, trasmissione multilivello. Caratterizzazione del rumore.

Capacità limite di Shannon.

- Modulazione numerica: di ampiezza, di frequenza, di fase. Demodulazione. Quadrature Amplitude Modulation.

# Segnale continuo



## Esempi

- Voce —→ Segnale di pressione
- EEG —→ Segnale elettrico
- Video —→ Segnale ottico

# Schema di un Sistema di trasmissione



## •Trasmettitore

- Converte il flusso informativo prodotto da una sorgente in un **segnale** adatto alla trasmissione
- Trasmette il segnale nel mezzo trasmissivo/canale di comunicazione

## •Ricevitore

- Riceve il segnale dal mezzo trasmissivo/canale di comunicazione
- Converte il segnale ricevuto in una forma utilizzabile dall'utente finale (destinazione)

# Schema di un Sistema di trasmissione



## • Canale di Comunicazione

- Coppie simmetriche
- Cavi coassiali
- Radio
- Fibra ottiche
- Light in air
- Infrarossi

## • Transmission Impairments

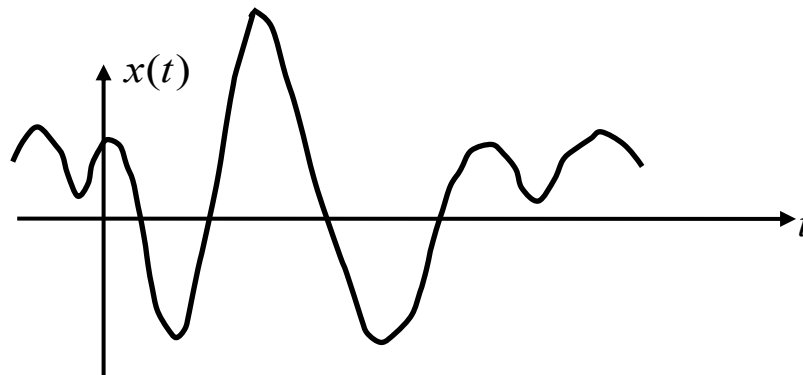
- Attenuazione del segnale
  - Distorsione del segnale
  - Rumore additivo
  - Interferenza con altri segnali
- **Limitano la lunghezza del collegamento**



# Segnale continuo

Segnale: Grandezza fisica che varia nel tempo e che porta un'informazione

$$x(t), \quad -\infty < t < +\infty$$

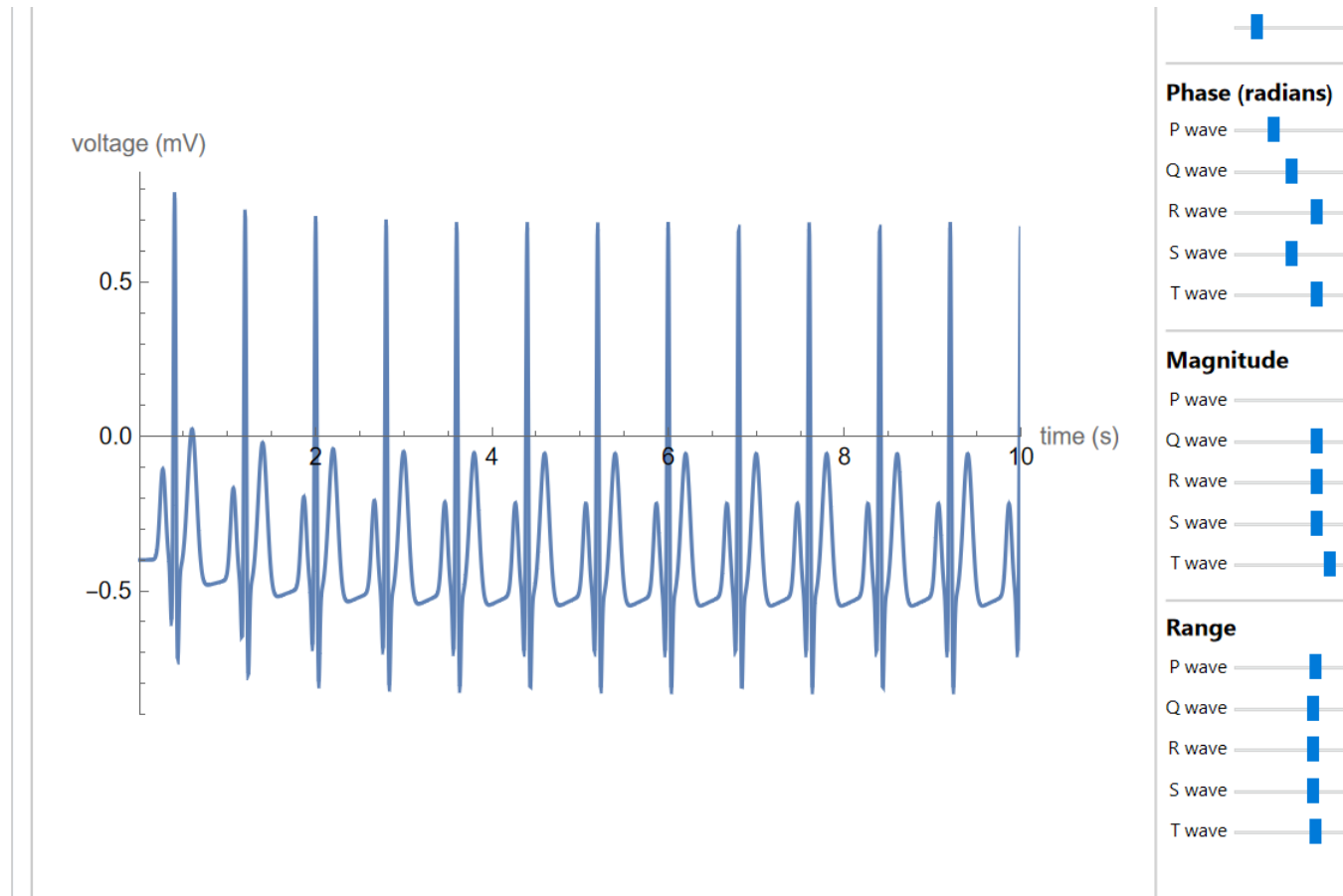


Esempi di segnale continuo: voce, temperatura, ecg

Lo studio di questo tipo di segnali si realizza tramite funzioni matematiche reali o complesse

# Esempio di un segnale

- <https://demonstrations.wolfram.com/SyntheticECG/>



# Classificazione di segnali e segnali elementari

Un segnale può essere scritto come una funzione reale o complessa  $f(x)$ . Può essere scritta come:

$$x(t) = x_R(t) + j x_I(t)$$

Segnale complessi: insieme di due segnali reali che sono il segnale reale  $x_R(t)$  e il segnale immaginario  $x_I(t)$ .

In alternativa può essere visto come una coppia di segnali reali , associati al modulo  $|x(t)|$  e alla fase  $\arg(x(t))$

$$x(t) = |x(t)| \cdot \exp[j \cdot \arg(x(t))]$$

$$|x(t)| = \sqrt{x_R^2(t) + x_I^2(t)}$$

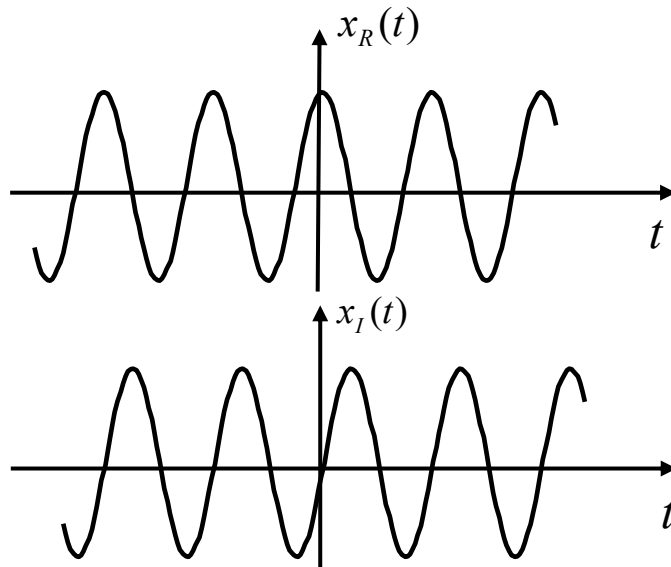
$$\arg(x(t)) = \arctg\left(\frac{x_I(t)}{x_R(t)}\right)$$

# Classificazione di segnali e segnali elementari

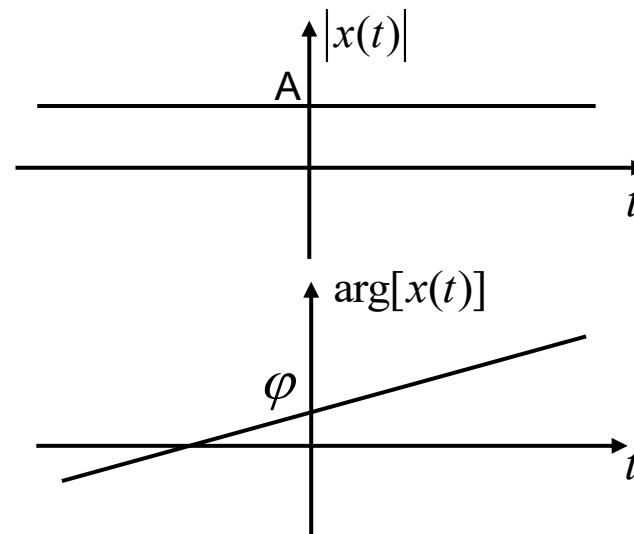
## Esponenziale complesso

$$x(t) = Ae^{j(2\pi f_0 t + \varphi)} = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi) + jA \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$$

$$\begin{cases} x_R(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \\ x_I(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \end{cases}$$

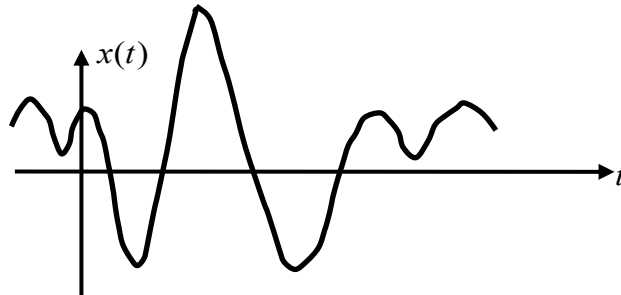


$$\begin{cases} |x(t)| = A \\ \arg[x(t)] = 2\pi f_0 t + \varphi \end{cases}$$



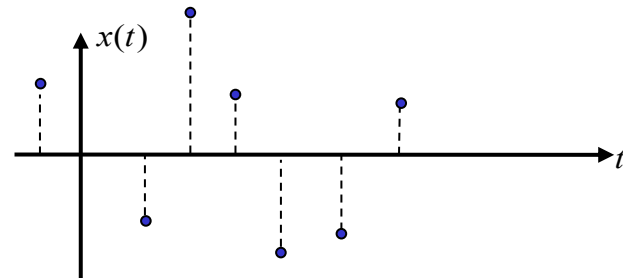
# Classificazione di segnali e segnali elementari

Segnale analogico



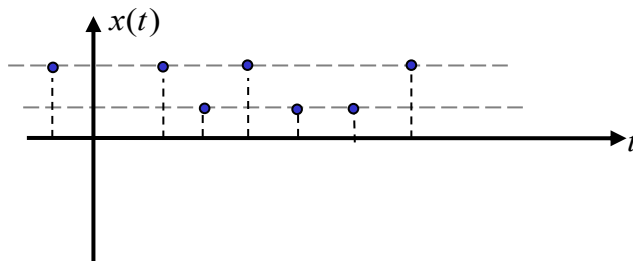
Il segnale è una funzione continua (reale o complessa) di una variabile continua

Segnale campionato



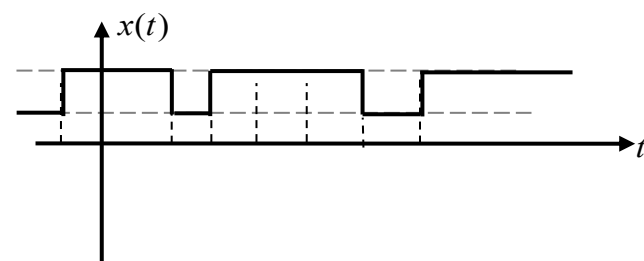
Il segnale è rappresentato da una funzione continua, ma la variabile  $t$  può assumere solo valori discreti

Segnale digitale



$t$  è una variabile discreta e può assumere solo valori discreti

Segnale quantizzato

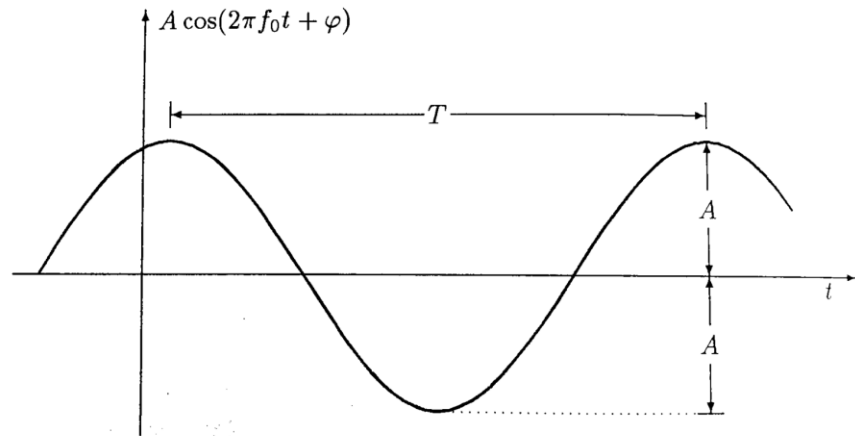


$t$  è una variabile continua, ma può assumere solo valori discreti.

# Esempio di segnali

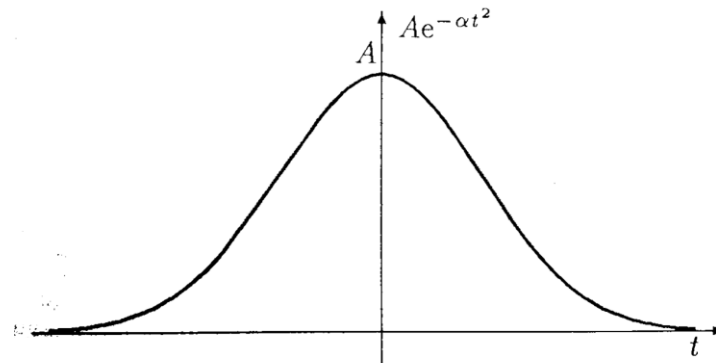
- Sine wave

$$x(t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right)$$



- Gaussian signal

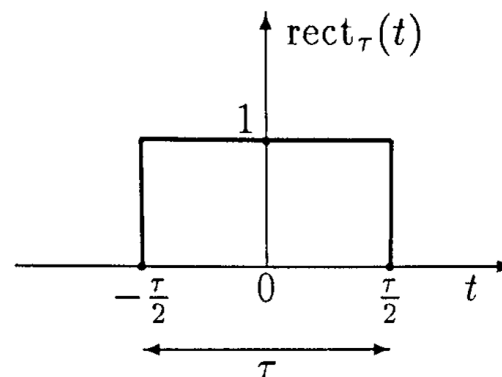
$$x(t) = Ae^{-\alpha t^2}$$



# Esempio di segnali

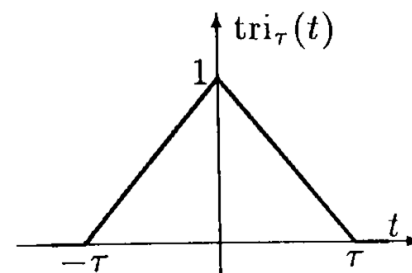
- Rettangolo

$$x(t) = \text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } |t| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \text{if } |t| = \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



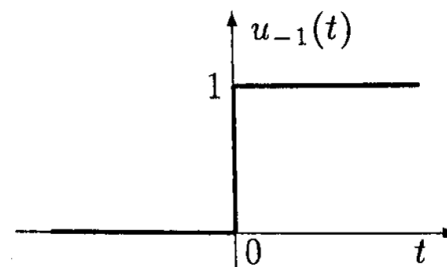
- triangolo

$$x(t) = \text{tri}(t) = \begin{cases} t + 1 & \text{if } t \in [-1, 0] \\ -t + 1 & \text{if } t \in [0, 1] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



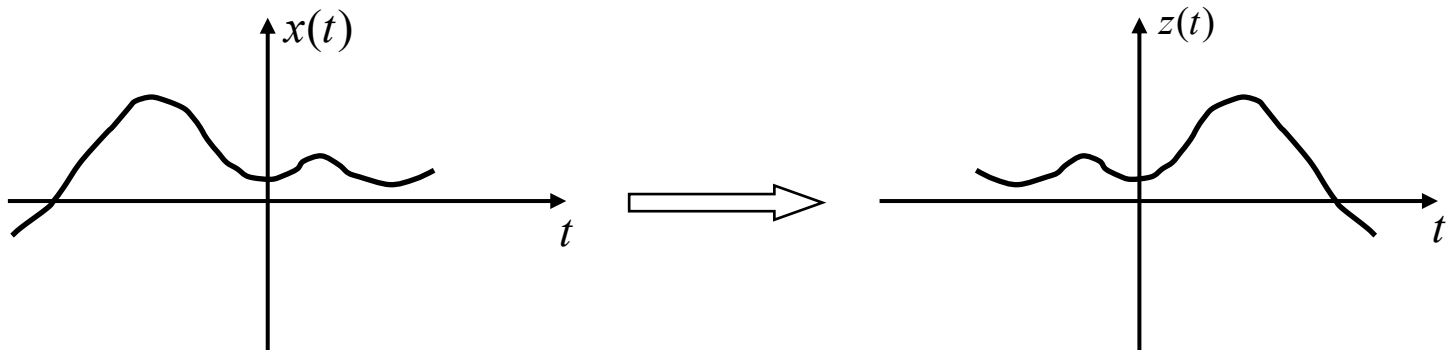
- Gradino unitario

$$x(t) = u_{-1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



# Operazioni tra segnali

- Somma, Prodotto:  $z(t) = x(t) + y(t), \quad z(t) = x(t) \cdot y(t)$
- Prodotto per una costante:  $z(t) = cx(t)$  (Amplificazione, attenuazione)
- Flipping:  $z(t) = x(-t)$

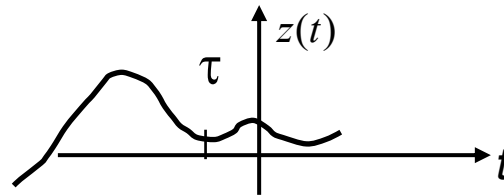
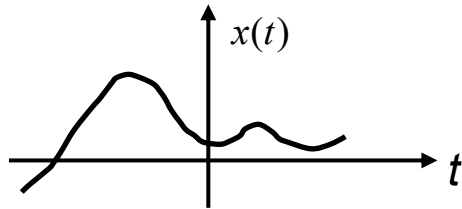




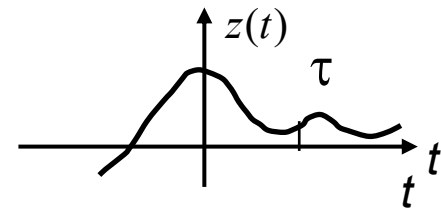
# Operazioni tra segnali

## Traslazione

$$z(t) = x(t - \tau)$$



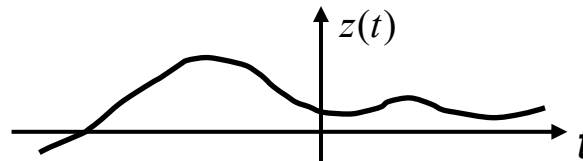
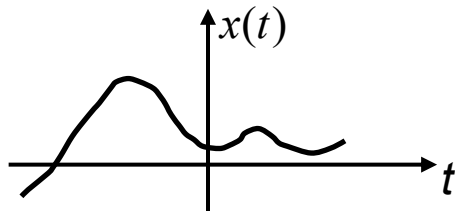
$\tau < 0$  anticipo



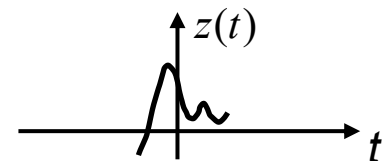
$\tau > 0$  ritardo

## Scalatura dell'asse

$$z(t) = x(\alpha t), \alpha > 0$$



$\alpha < 1$  dilatazione



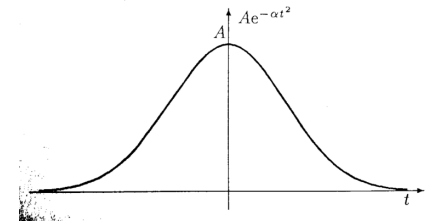
$\alpha > 1$  contrazione

Esempi :  $x(t) = \text{tri}(2t)$ ,  $x(t) = \text{tri}(1/3 t)$ ,  $x(t) = \text{rect}(\frac{1}{2}t)$ ,  $x(t) = \text{rect}(t - 1)$ ,  $x(t) = \text{rect}(t + 1)$

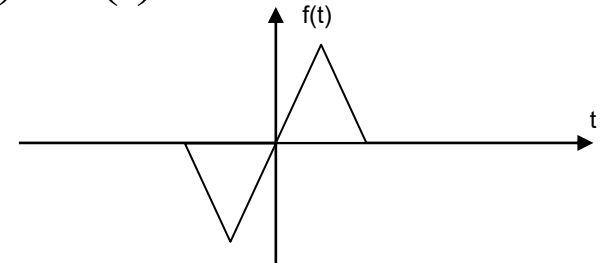
# Simmetria

Dato un segnale reale (oppure una sequenza)

- simmetria pari  $f(-t)=f(t)$



- Odd symmetry (simmetria dispari)  $f(-t)=-f(t)$



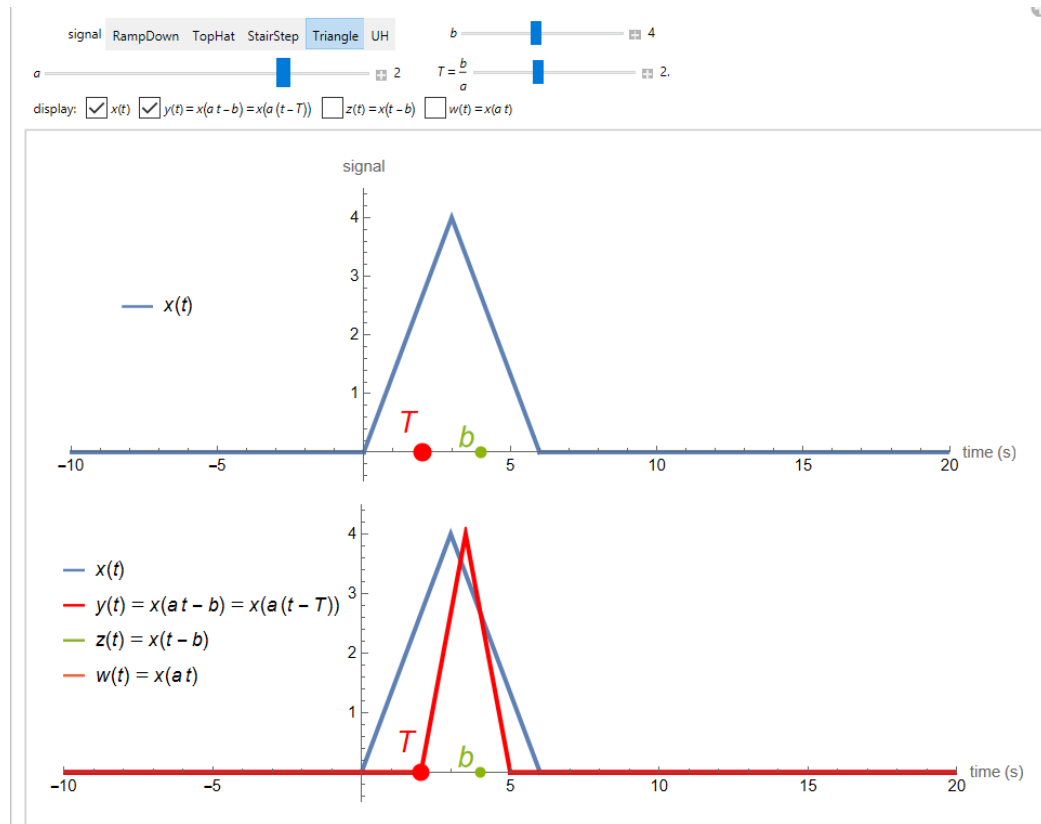
Given a complex signal (or sequence)

- Hermitian symmetry: real part and module: even symmetry and imaginary part and phase: odd symmetry

# Example of signals

## Time Shifting and Time Scaling In Signal Processing

<https://demonstrations.wolfram.com/TimeShiftingAndTimeScalingInSignalProcessing/>



# Python example

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Create a sine wave
t = np.arange(0, 2 * np.pi, 0.025) # Time interval from 0 to 2*pi
A = 1 # Amplitude
f = 1 # Frequency
phi = 0 # Phase
sinewave = A * np.sin(2 * np.pi * f * t + phi)

# Plot the original sine wave
plt.subplot(2, 1, 1)
plt.stem(t, sinewave)
plt.title('Sinusoide Originale')
plt.xlabel('Tempo')
plt.ylabel('Ampiezza')

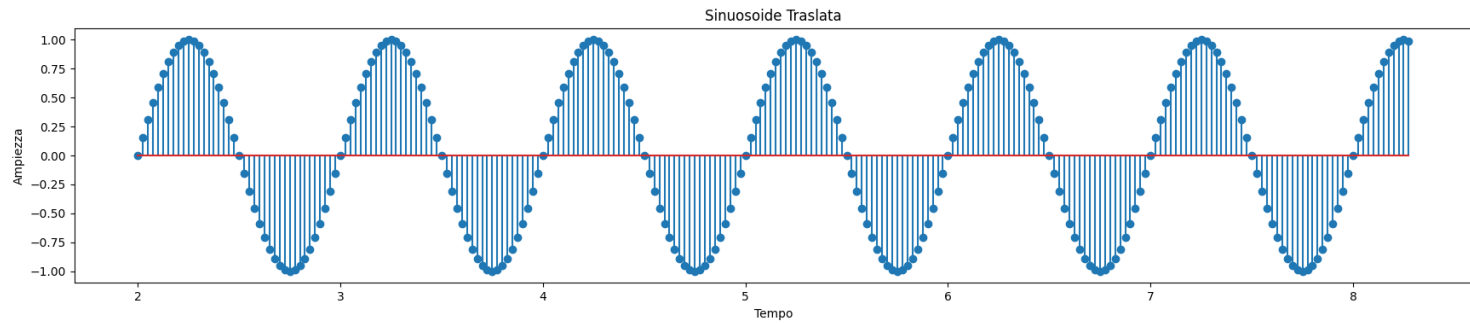
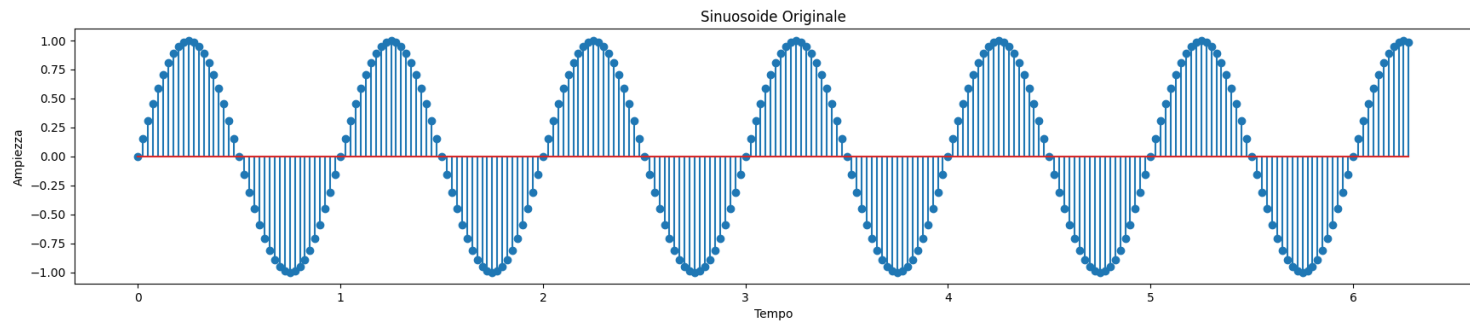
# Shift the sine wave
t_shifted = t + 2 # Shift by 1 second (you can change the value as you like)

sinewave_shifted = A * np.sin(2 * np.pi * f * t_shifted + phi)

# Plot the shifted sine wave
plt.subplot(2, 1, 2)
plt.stem(t_shifted, sinewave_shifted)
plt.title('Sinusoide Traslata')
plt.xlabel('Tempo')
plt.ylabel('Ampiezza')

# Show the plots
plt.tight_layout()
plt.show(block=True)
```

# Python example: results



# Esempi

- $x(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{3}\right)$
- $x(t) = 2\text{rect}\left(\frac{t}{3}\right)$
- $x(t) = \text{tri}(2t - 3)$
- $x(t) = \text{rect}\left(t + \frac{1}{2}\right) \cdot 3\text{tri}\left(\frac{t}{2}\right)$
- $x(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{2} - 4\right) + \text{tri}(t + 2)$