



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali e Sistemi

(canale 2)

Laurea in Ing. Biomedica

Anno II, secondo semestre, A.A. 24/25

Informazioni generali



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Docente

Tomaso Erseghe

tomaso.erseghe@unipd.it



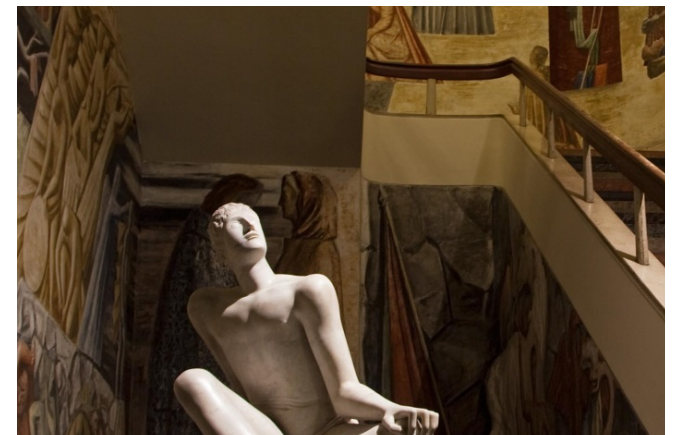
Orario di ricevimento

in classe

durante la pausa, all'inizio e alla fine della lezione

in ufficio/su zoom

DEI/A, II piano, corridoio di destra, interno 7656
su appuntamento





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Orario lezioni

Lun 10:30-12:00

Gio 8:30-10:00

Ven 10:30-12:00

30 Lezioni

+ 6 Esperienze in Lab (MatLab) 

+ 1 prova di autovalutazione

Dal 24 febbraio 2025
al 2 giugno 2025

No registrazione delle lezioni!

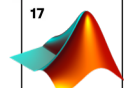
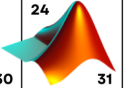




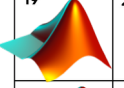
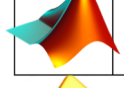
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Tempistiche previste ... se tutto fila liscio

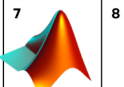
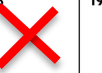
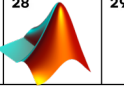
MARCH 2025

SUN	MON	TUES	WED	THURS	FRI	SAT
23	24  Le1 intro	25	26	27  Le2 segnali nel tempo	28 	1
2	3 	4	5	6 	7 	8
9	10  Le7 sistemi nel tempo	11	12	13 	14 	15
16	17 	18	19	20 	21 	22
23	24 	25	26	27  Le12 serie di Fourier	28 	29
30	31					

MAY 2025

MON	TUES	WED	THURS	FRI	SAT	SUN
28	29	30	1 	2 	3	4
	6	7	8 	9 	10	11
12  Le24	13	14	15 	16 	17	18
19 	20	21	22 	23  Le26 trasformata di Laplace	24	25
26 	27	28	29 	30  Le29 trasformata Zeta	31	1
						

APRIL 2025

SUN	MON	TUES	WED	THURS	FRI	SAT
30	31 	1	2	3  trasformata di Fourier	4 	5
6	7 	8	9	10 	11 	12
13	14 	15	16	17 	18 	19
20	21  Pasqua	22	23	24  tempi discreti	25 	26
27	28 	29	30	1	2	3



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Libro di testo

Segnali e Sistemi
di Lorenzo Finesso
Libreria Progetto

Ultima edizione



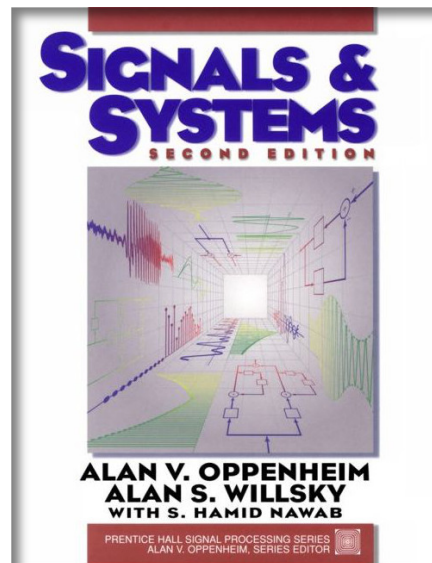
... e appunti dalle lezioni



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Libro di testo (bis)

Signals and Systems, 2nd Edition
by Oppenheim, Willsky, Nawab
published by Pearson





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sito web

stem.elearning.unipd.it

SEGNALI E SISTEMI (Canale B) 24/25

iscrivetevi subito!

▼ Iscrizione spontanea (Studente)

Non è necessaria una chiave di iscrizione

Iscrivimi

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Bacheche DEI e siti degli i
SEGNALI E SISTEMI Canale 2 (5-9)

UNIPD

ORIENTAMENTO ▼

NAVIGAZIONE

Home

Dashboard

HOME / CORSI /





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

MATLAB

MATrix LABoratory by MathWorks



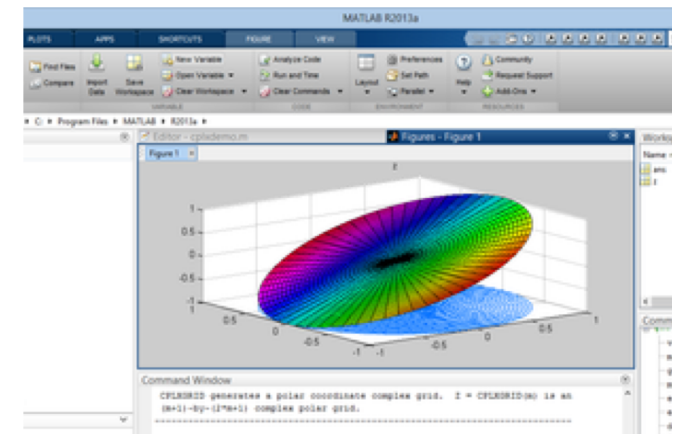
MATLAB *“is a numerical computer environment which allows matrix manipulations, plotting of functions and data, implementation of algorithms”* [wiki]

Total Academic Headcount

licenza di tipo Campus e Student

Consente agli studenti di accedere a MATLAB attraverso computer dell'università, in tutta la struttura. Gli studenti possono inoltre installare MATLAB sui propri **computer personali**.

<https://asit.unipd.it/servizi/contratti-software-licenze/matlab>





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Aula Taliercio

Ritiro Credenziali

Stesse credenziali del primo semestre !!!
- riattivati gli account del corso di 'Elementi di informatica e programmazione'

Come capire se ho un account attivo?

<https://studenti.adt.unipd.it>

Chi non avesse l'account:

- inserire i propri dati nel foglio excel condiviso sul sito del corso!





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Modalità esame

No compitini

2 test di autovalutazione in classe

prova MATLAB (per +2 o lode)

✧ Ven 27 giugno 2025, 14:30 Te Ue

4+1 appelli

✧ **Lun 16 giugno 2025, 10:00** via bassi CDEF

✧ Ven 4 luglio 2025, 10:00 Ae Be Ke Ve

✧ Bressanone

✧ Mer 3 settembre 2025, 14:00 Ae Be

✧ Lun 2 febbraio 2026, 10:00 Ke Ve





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Modalità esame (2)

Compito scritto
2h 30min

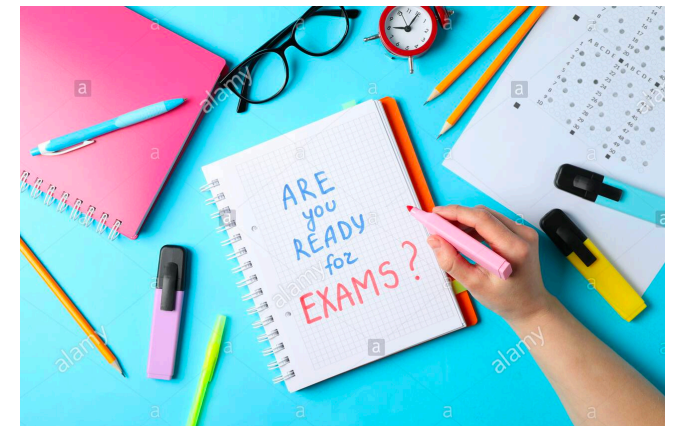
3 **esercizi**

- ✧ strutturati come gli anni passati
- ✧ 7 punti ciascuno

3 **domande**

- ✧ due sulla teoria, una sul MatLab
- ✧ 3 punti ciascuna

Bonus +2 con la prova MatLab





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Commenti degli studenti del 3° anno

... Vengono date per scontate molte conoscenze di base di Segnali e Sistemi, sebbene sia passato un anno dallo svolgimento di quest'ultimo. ...

... quando si utilizzano formule di Segnali e Sistemi bisognerebbe fare un rapido richiamo su quelle cose, senza darle assolutamente per scontate...



Contenuti del corso

Una breve rassegna



signal

[...]

4

a : an object used to **transmit or convey information** beyond the range of human voice

b : the sound or image conveyed in telegraphy, **telephony**, radio, radar, or **television**

c : **a detectable physical quantity** or impulse (as a voltage, current, or magnetic field strength) by which messages or information can be transmitted





transformation

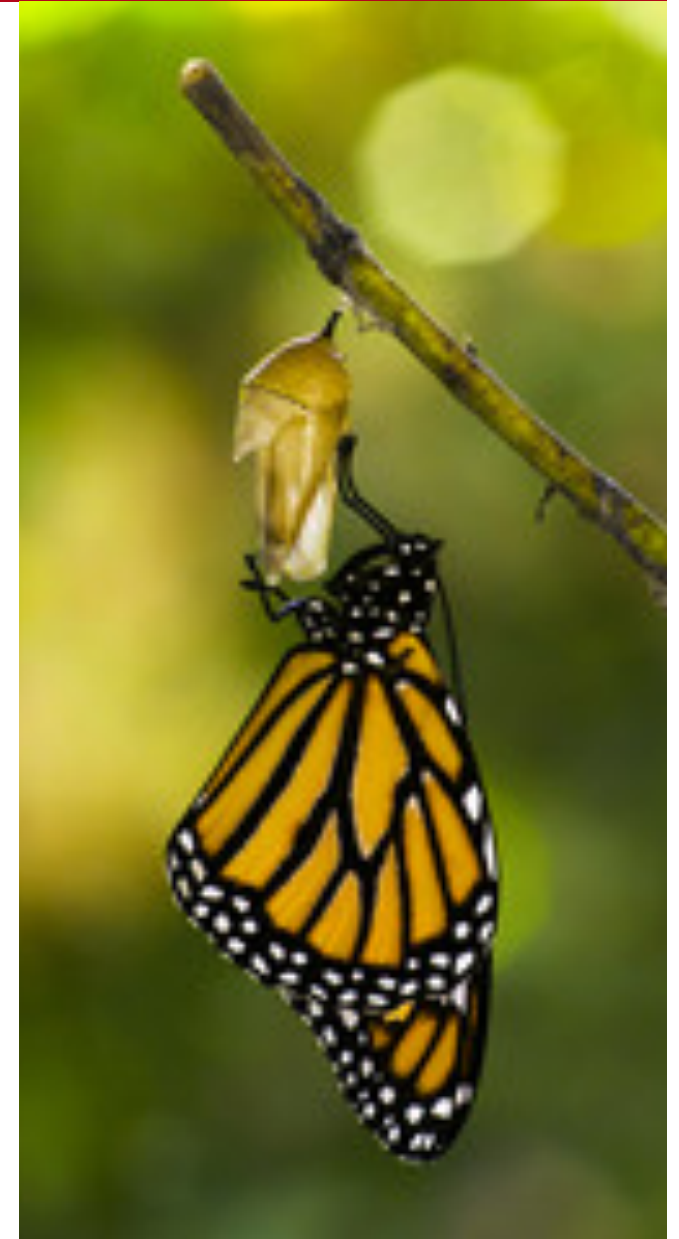
[...]

3

a (1) : the operation of **changing** (as by rotation or mapping) one configuration or expression into another **in accordance with a mathematical rule**; [...]

a (2) : the formula that effects a transformation

b : a **mathematical correspondence** that assigns exactly one element of one set to each element of the same or another set





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Esempi di segnali

Fisici ed artificiali

Voce umana (fluttuazioni di pressione acustica)



Livello di marea a Venezia





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

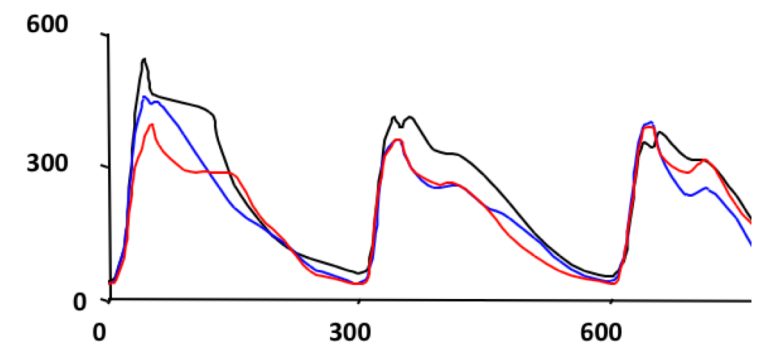
Esempi di segnali

Fisici ed artificiali

Elettrocardiogramma



Concentrazione di insulina nel sangue





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Esempi di segnali

Fisici ed artificiali

Inflazione mensile (artificiale)



Cambio Euro/\$ giornaliero (artificiale)





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

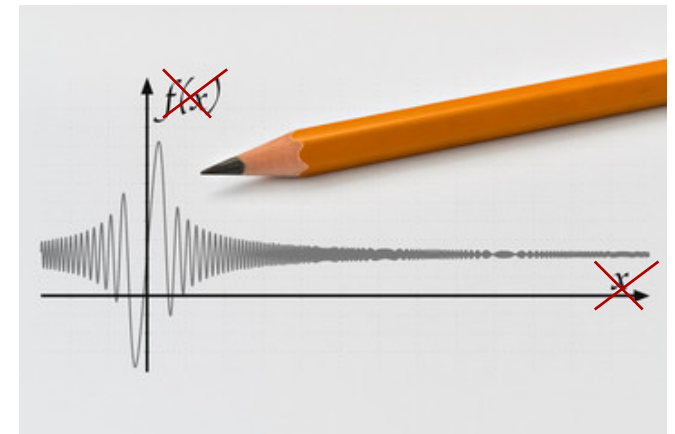
Modello di riferimento

Il segnale come funzione (che contiene informazione)

La convenzione è definire il segnale come $s(t)$

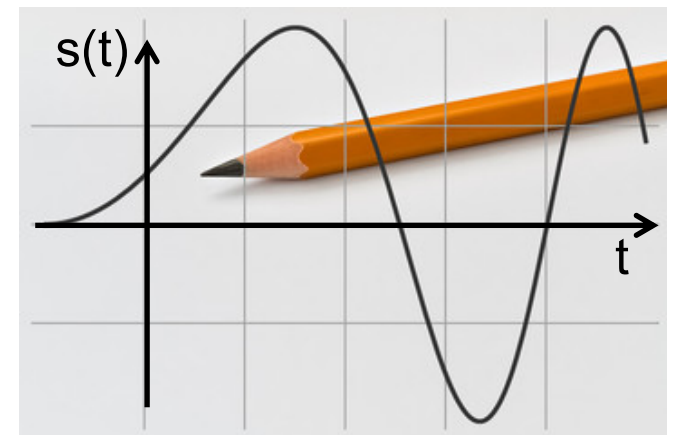
s = segnale

t = tempo (tipicamente, ma non solo... anche spazio)



dominio ($t \in D$) e **codominio** ($s \in C$) definiscono la tipologia di segnale

es., segnale **continuo** se $D = C = \mathcal{R}$ (numeri reali)





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

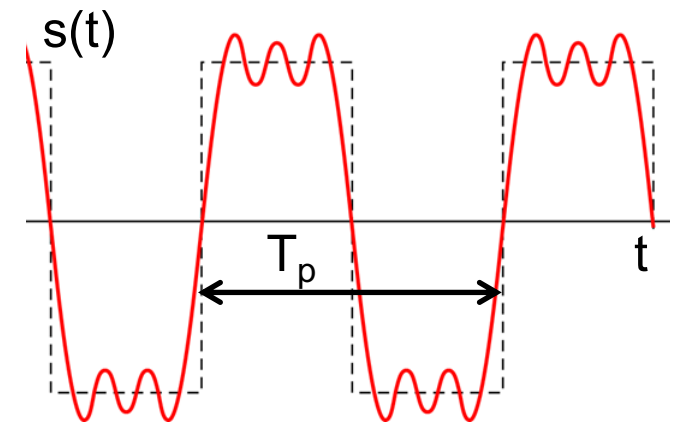
Segnali periodici

Segnali la cui forma si ripete

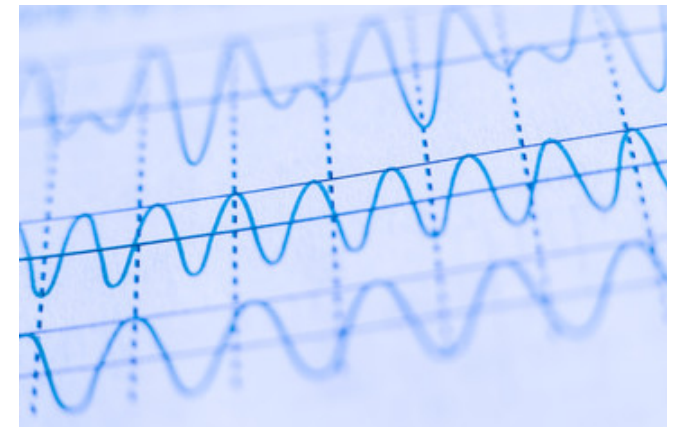
Soddisfano la proprietà fondamentale

$$s(t+T_p) = s(t)$$

con T_p il **periodo** del segnale



... e sono univocamente definiti nell'**intervallo fondamentale** $[0, T_p)$ o in qualunque altro periodo





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali periodici (2)

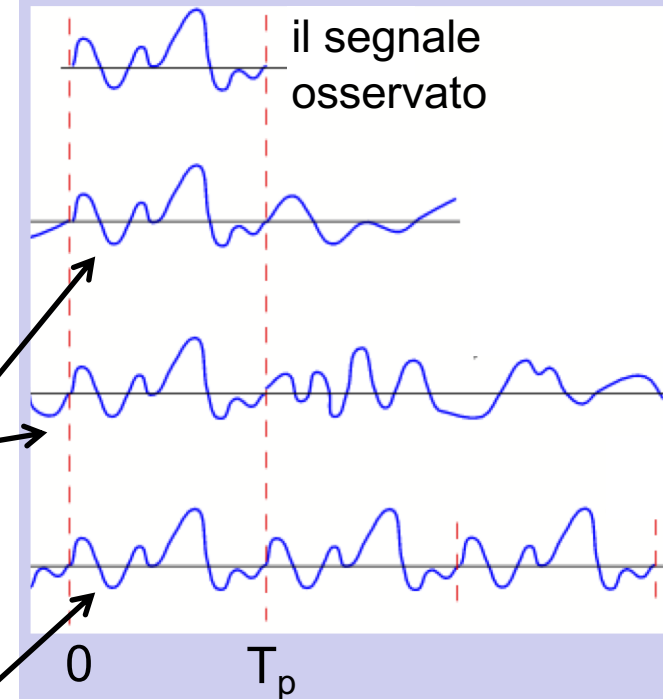
Come modello per segnali definiti in un intervallo limitato

Modello per segnali ***ad estensione limitata***

... ovvero definiti in una finestra temporale limitata e duplicati per ***ripetizione periodica*** (o periodizzazione)

possibili forme al di fuori del
periodo di osservazione

risultato della ***ripetizione
periodica*** del segnale





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali a tempo discreto

Che includono i cosiddetti segnali “campionati”

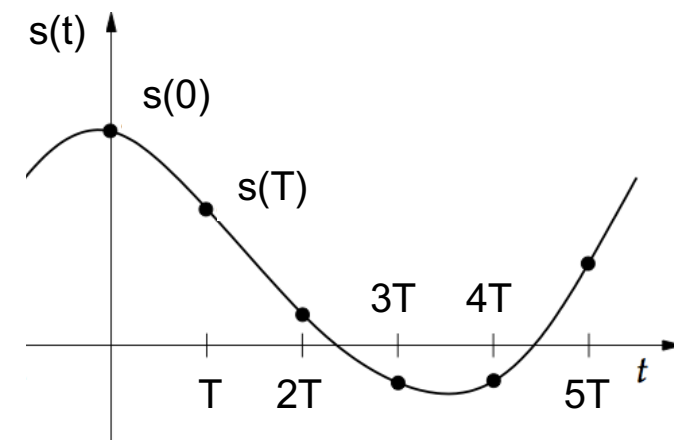
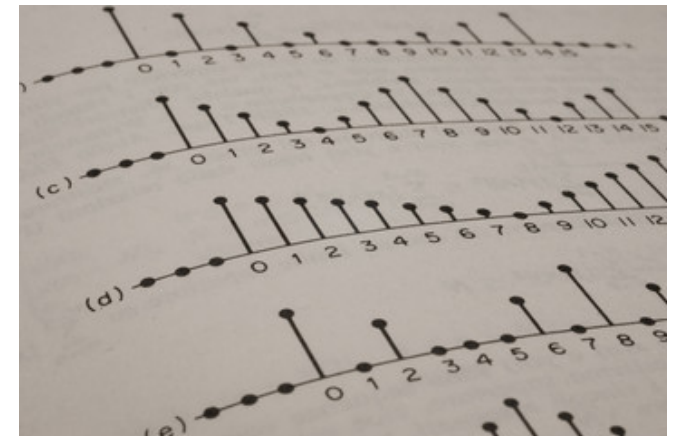
Segnali a dominio discreto

$$D = Z(T) = \{ nT, n \in \mathbb{Z} \}$$

con T *periodo di campionamento*

... la nostra convenzione per il segnale a tempo discreto è $s(n)$ ma ne esistono altre: s_n , $s(nT)$, $s[n]$, etc.

Possono derivare da segnali a tempo continuo attraverso una operazione di **campionamento** che registra il valore del segnale originario a intervalli di tempo regolari





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali digitali

Ovvero a tempo ed ampiezza discreti

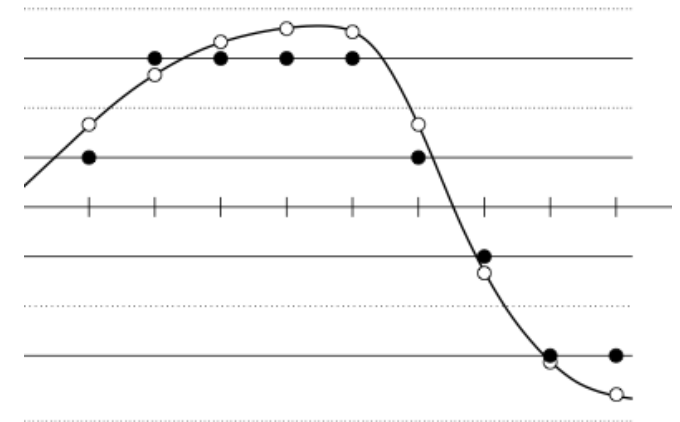
Segnali ad **ampiezze discrete**

$$C = \{ c_0, c_1, c_2, c_3, \dots \}$$

in cui il codominio tipicamente ha cardinalità finita
(numero finito di possibili livelli del segnale)

Sono chiamati segnali **digitali** in quanto esprimibili
tramite flussi di **bit**

Possono essere derivati da un segnale continuo tramite
campionamento e **quantizzazione**, ovvero tramite una
analog-to-digital-conversion (**ADC**)





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali a valori complessi

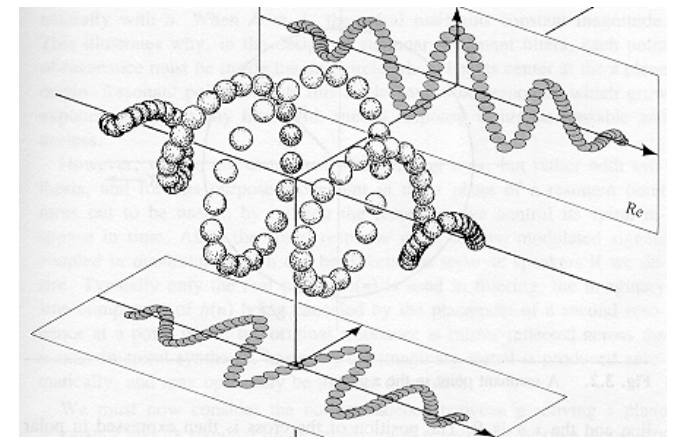
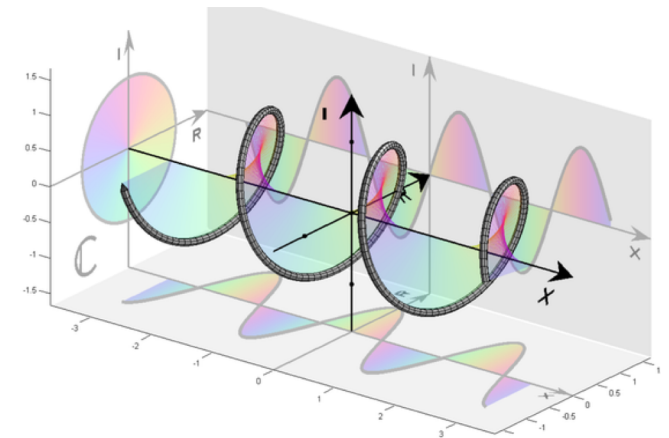
Segnali le cui ampiezze sono valori **complessi**

$$D = \mathcal{C} \text{ (numeri complessi)}$$

Possono essere interpretati come segnali **vettoriali** a valori reali

$$\underline{s}(t) = [\mathcal{R}[s(t)], \mathcal{I}[s(t)]]$$

con $\mathcal{R}$ la parte reale, e $\mathcal{I}$ la parte immaginaria





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali multidimensionali

Immagine in b/n - $s(x,y)$

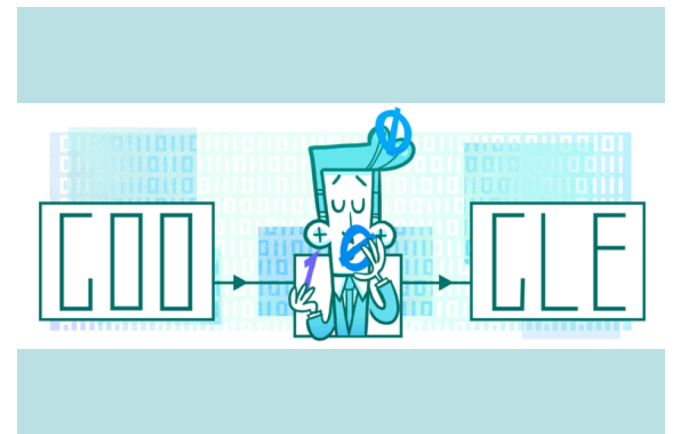
segnale bidimensionale (2D) con coordinate spaziali

Immagine a colori - $\underline{s}(x,y) = [r(x,y), g(x,y), b(x,y)]$

Segnale 2D vettoriale con coordinate spaziali

Video a colori - $\underline{s}(x,y,t) = [r(x,y,t), g(x,y,t), b(x,y,t)]$

Segnale 3D vettoriale con coordinate spaziali e temporali

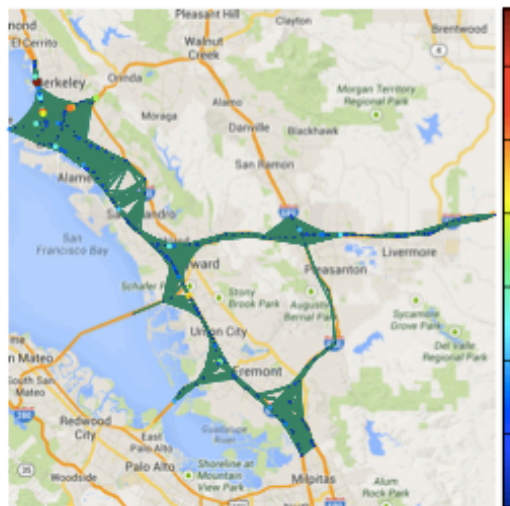




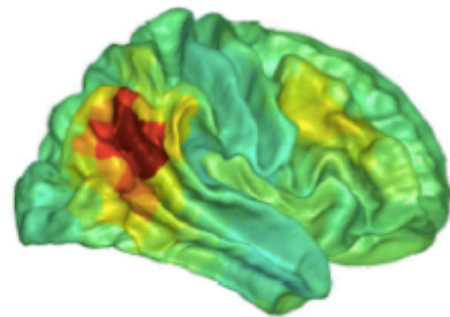
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali su grafi complessi

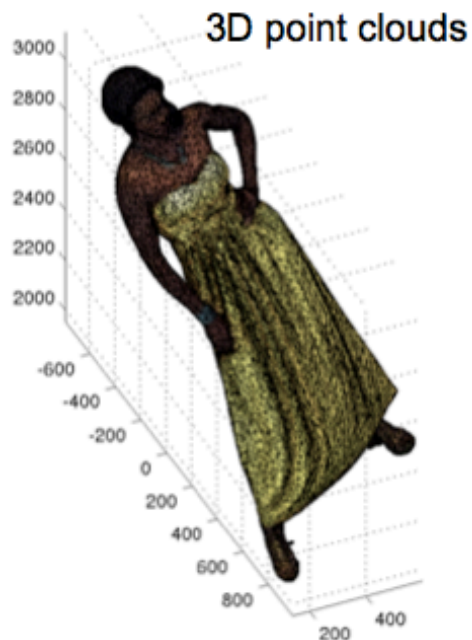
I segnali complessi del mondo della rete



Traffic bottlenecks



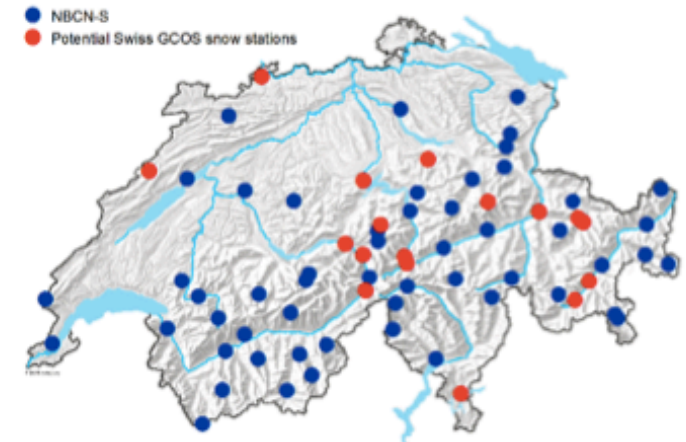
Brain signals



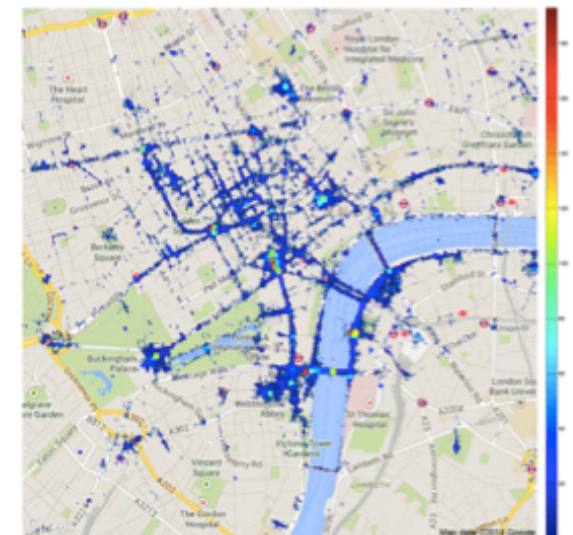
3D point clouds



Social networks



Sensor networks



Mobility patterns



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

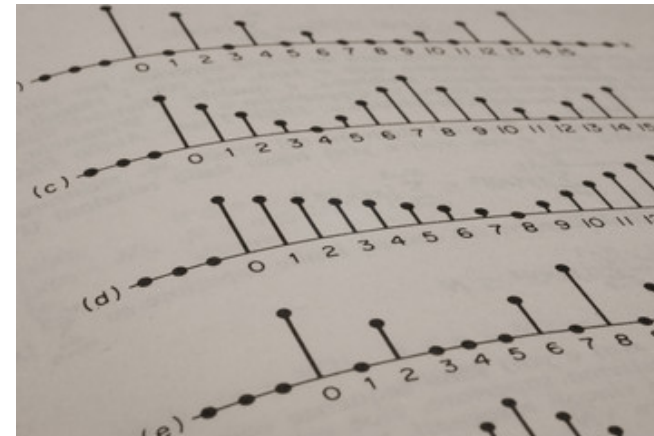
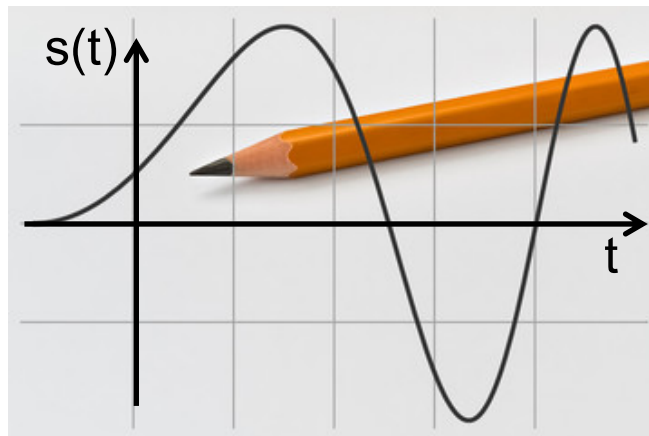
Le 4 classi fondamentali

Sempre monodimensionali (1D) e a valori complessi

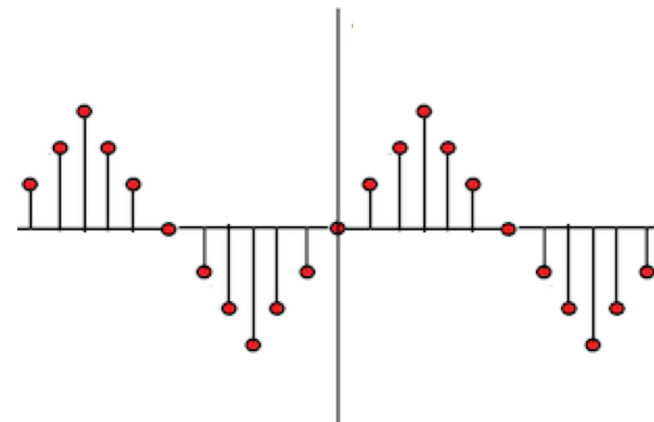
continui

discreti

campionamento



periodizzazione



aperiodici

periodici



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sistemi LTI

Sistemi lineari e tempo invarianti

La classe più interessante di sistemi sono le trasformazioni LTI, con proprietà di

Linearità

Principio di sovrapposizione degli effetti

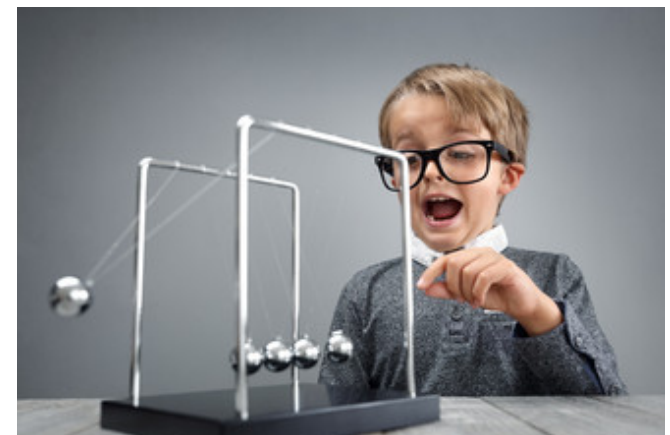
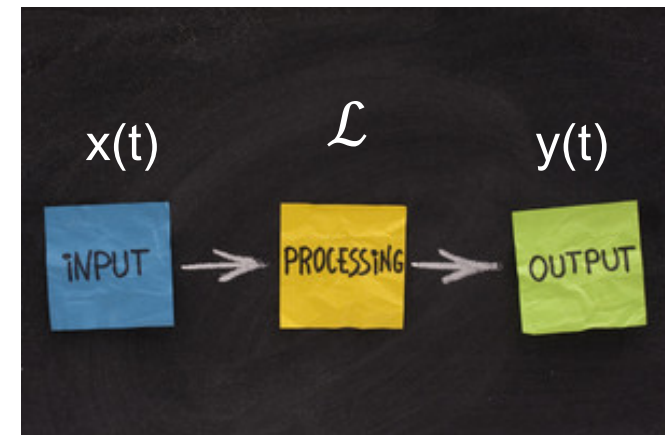
$$a x(t) \rightarrow a y(t)$$

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

Tempo-invarianza

Principio di ripetibilità dell'esperimento

$$x(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0)$$





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

La convoluzione

Una rappresentazione efficiente per sistemi LTI

Le trasformazioni LTI sono esprimibili tramite una operazione di **convoluzione**

... in forma **integrale** nel caso continuo

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h(t-u)du$$



... in forma di **sommatoria** nel caso discreto

la **risposta impulsiva** h identifica univocamente la trasformazione

$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k h_{n-k}$$





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

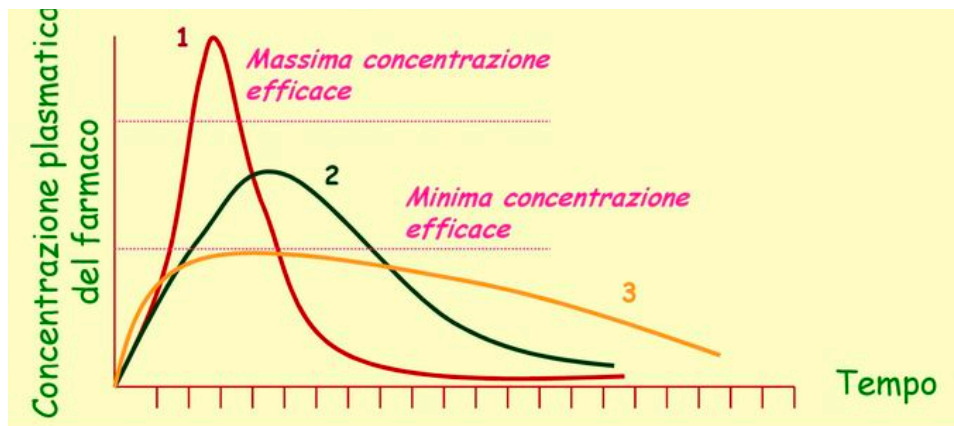
A cosa ci serve?

Un esempio bioingegneristico

concentrazione di un farmaco nel sangue, data la modalità di somministrazione

Ingresso $x(t)$ = quantità somministrata (nel tempo)

Risposta impulsiva $h(t)$ = come il farmaco si trasferisce nel sangue (nel tempo)



Uscita $y(t)$ = concentrazione del farmaco nel sangue



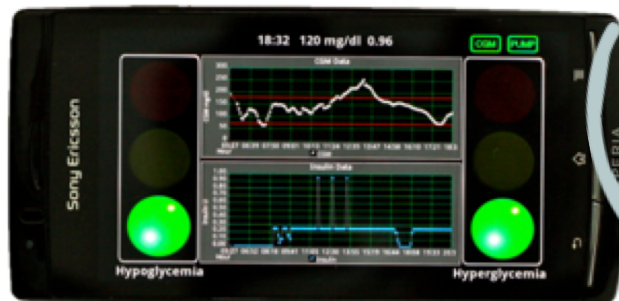


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Il pancreas artificiale

Un esempio bioingegneristico

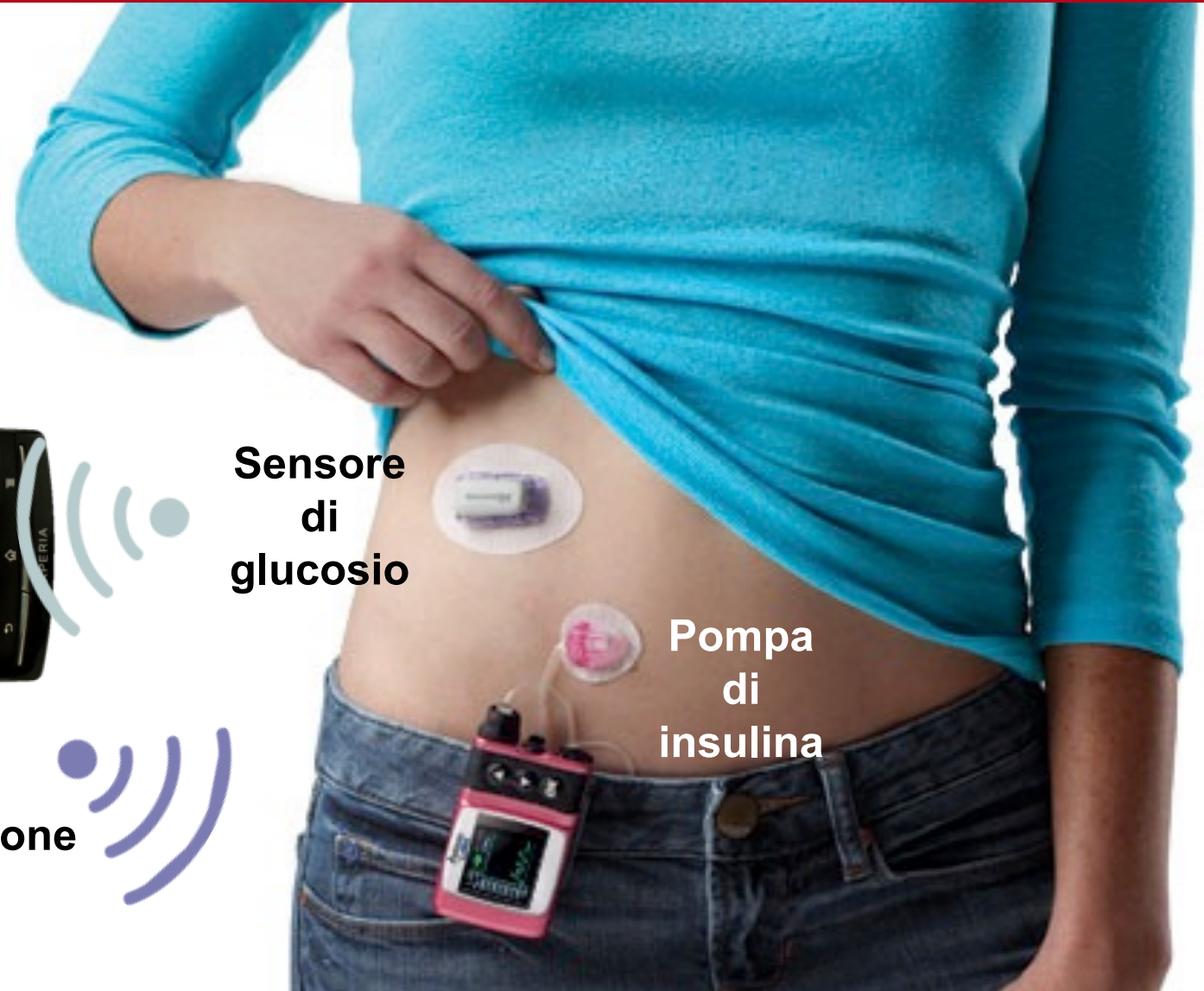
**Algoritmi di
controllo ed
elaborazione dati**



**Sensore
di
glucosio**

**Pompa
di
insulina**

**Comunicazione
wireless**





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

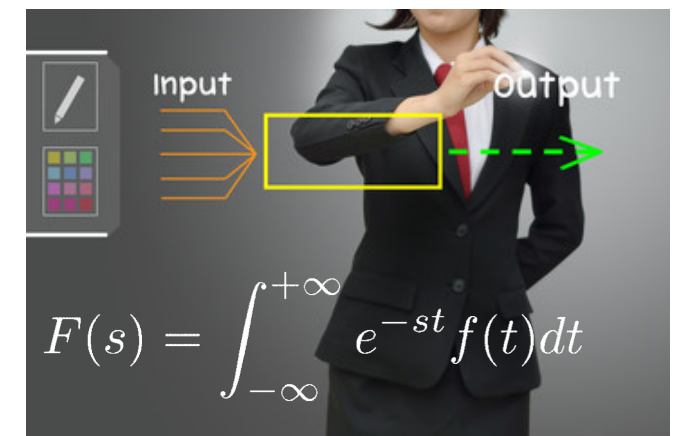
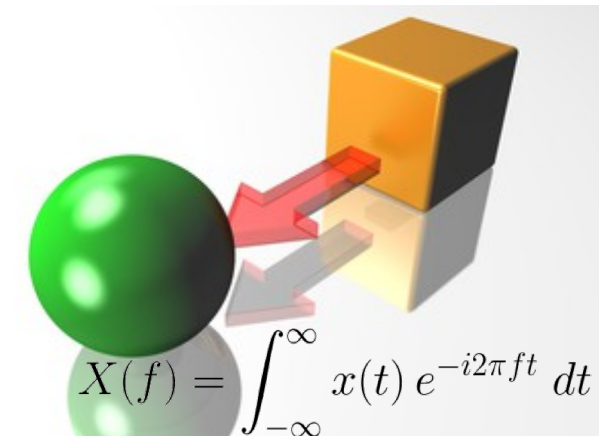
Le trasformate

Ovvero rappresentazioni alternative dei segnali

A volte è meglio dare una rappresentazione alternativa al segnale

tf. di **Fourier** → esprime il segnale come composizione di **esponenziali a esponenti immaginari** $e^{i 2\pi f t}$

tf. di **Laplace** → esprime il segnale come composizione di **esponenziali a esponenti complessi** $e^{(r + i \omega) t}$



... ma non sono trasformazioni LTI (sono solo lineari)



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

La trasformata di Fourier

Ovvero la rappresentazione in frequenza

La trasformata di Fourier è una rappresentazione del segnale che ne evidenzia il contenuto alle varie **frequenze** (segnale come somma di sinusoidi)





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sistemi LTI e trasformate

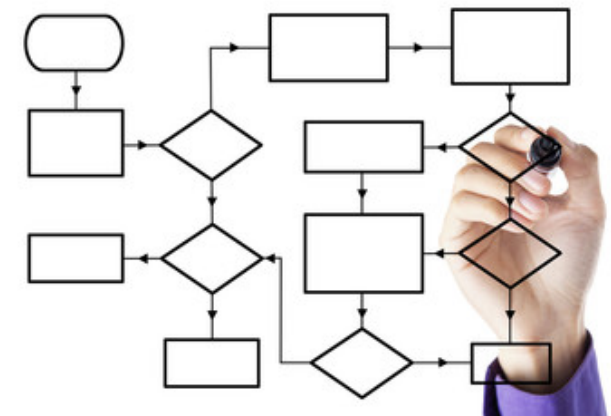
Ovvero a cosa servono le trasformate

Nel dominio delle trasformate la **convoluzione** diventa un **prodotto**

$$y(t) = x * h(t) \text{ (convoluzione)}$$

$$Y(f) = X(f) H(f) \text{ (prodotto)}$$

... ovvero sistemi LTI anche complessi si studiano meglio usando una trasformata





Segnali nel tempo (5 lez)

Durata, Area, Valor medio, Energia Potenza
Traslazione, Scala, Periodizzazione
Esponenziali, Impulsi, e Altri segnali notevoli

Sistemi nel tempo (5 lez)

Invertibilità, Memoria, **Stabilità**, Linearità
I sistemi LTI, La **convoluzione** e sue proprietà
Autofunzioni, Filtraggio, Connessione di sistemi
Risposta a sinusoidi e esponenziali complessi

La trasformata di Fourier (13 lez)

Serie di Fourier e sue proprietà
Trasformata di Fourier e sue proprietà
Relazione periodico-aperiodico
Trasformata per segnali discreti e sue proprietà
Il teorema del **campionamento**

La trasformata di Laplace (4 lez)

Trasformata di Laplace e sue proprietà
Equazioni differenziali, Risposta libera e forzata
Soluzione di equazioni differenziali tramite
la trasformata di Laplace
Esempi di applicazione

La trasformata Zeta (2 lez)

Trasformata Zeta e sue proprietà
Soluzione tramite trasformata Zeta di sistemi
descritti da equazioni alle differenze

Note storiche

sui tre maggiori protagonisti del nostro corso



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Pierre-Simon Laplace
1749-1827

Pierre-Simon Laplace

Beaumont-en-Auge (Normandia) 23/3/1749
Parigi 5/3/1827

Matematico, fisico, astronomo e nobile francese

*Sebbene la trasformazione oggi nota come trasformata di Laplace sia originariamente stata introdotta nel 1744 da Eulero, nel 1785 Laplace comprese per primo come usare questa trasformazione per risolvere le **equazioni differenziali**. La forma usata da Laplace corrisponde a quella oggi nota come **trasformata z**.*

La versione moderna della trasformata di Laplace è dovuta a G. Doetsch (1937)





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Jean Baptiste Joseph Fourier

1768-1830

Jean Baptiste Joseph Fourier

Auxerre (Borgogna) 21/3/1768

Parigi 16/5/1830

Allievo di Laplace e Lagrange
Matematico e fisico francese

*A Fourier si deve l'idea di **serie di Fourier**, sviluppata per la soluzione di equazioni legate alla diffusione del calore a partire dal 1807 (l'opera più ampia, "Théorie analytique de la chaleur," è del 1822)*

I risultati di Fourier sono successivamente stati riformulati con maggiore rigore da Dirichlet e Riemann nella seconda metà dell'ottocento





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Claude Elwood Shannon

1916-2001

Claude Elwood Shannon

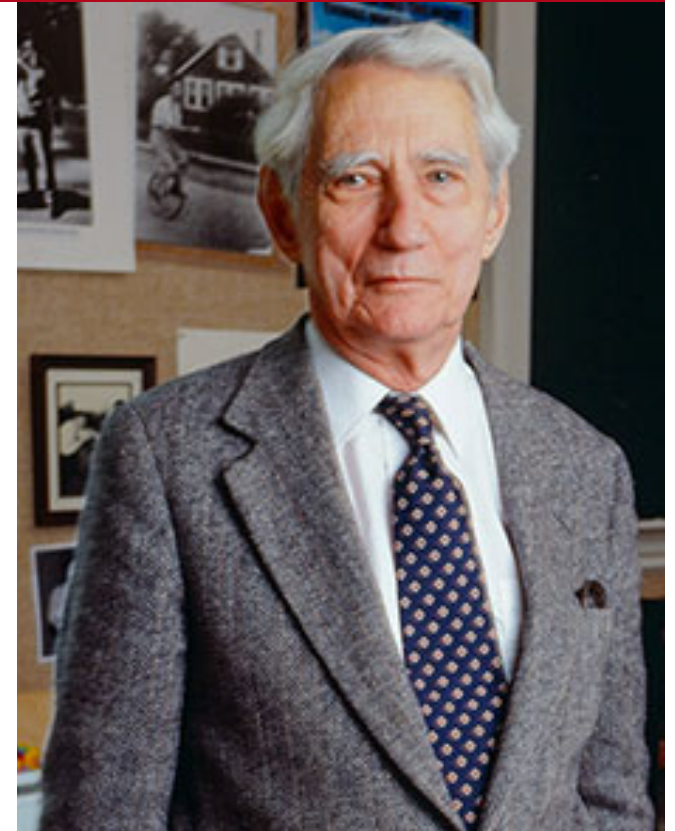
Petoskey (Michigan) 30/4/1916

Medford (Massachusetts) 24/2/2001

Ingegnere e matematico statunitense

Padre della teoria dell'informazione

*Shannon è riconosciuto come il padre del **Teorema del campionamento** (1949), una applicazione della Serie di Fourier che rivela il legame tra segnali a tempo continuo (analogici) e segnali a tempo discreto (digitali)*





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Segnali e Sistemi

(canale 2)