Segnali e sistemi

Luca Mombelli

2024-25

Indice

1 Segnali a tempo continuo

1.1 Segnali elementari

⋆ Finestra rettangolare :

$$\Pi(t) := \begin{cases} 1 & -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$A\Pi(\frac{t-t_0}{T}) := \begin{cases} A & t_0 - \frac{T}{2} \leq t \leq t_0 + \frac{T}{2} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

⋆ Finestra triangolare :

$$\Lambda(t) := \begin{cases} 1 - |t| & -1 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{altirimenti} \end{cases}$$

$$A\ \Lambda(\frac{t-t_0}{T}) := \begin{cases} A - (\frac{A}{T})|t - t_0| & t_0 - T \leq t \leq t_0 + T \\ 0 & \text{altirimenti} \end{cases}$$

⋆ Impulso ideale unitario (Impulso di dirac) :
è possibile vedere l'impulso di Dirac come il limite della seguente successione :

$$\lim_{n \to +\infty} \left[\frac{n}{2} \Pi \left(\frac{t}{2/n} \right) = \begin{cases} \frac{n}{2} & -\frac{1}{n} \leq t \leq \frac{1}{n} \\ 0 \end{cases} \right]$$

quindi può essere visualizzato come un segnale il cui punto di applicazione è l'origine , dove assume valore infinito e la cui area complessiva è unitaria. In realtà l'impulso di Dirac è una distribuzione , quindi un concetto esteso di una funzione
Inoltre l'impulso di Dirac gode delle seguente proprietà

Proprietà.

1. $\delta(0) = +\infty$
2. $\delta(t) = 0\ \forall t \neq 0$
3. $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) = 1$ (la sua area è uno)
4. Proprietà di campionamento dell'impulso:
   Data una funzione v e un t_0 in cui la funziona sia continua vale :

$$v(t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(\tau)\delta(\tau - t_0)d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} v(\tau)\delta(t_0 - \tau)d\tau$$

⋆ Gradino unitario (Heaviside step function)

$$\delta_{-1}(t); := \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Se pensiamo alla funzione gradino come una distribuzione alla possiamo definirla nel seguente modo

$$\delta(t) = \frac{d\ \delta_{-1}(t)}{dt}$$

⋆ Rampa unitaria

$$\delta_{-2}(t) := \begin{cases} t & t \geq 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Inoltre può essere messe in relazione con il gradino e l'impulso di dirac nel seguente modo:

$$\delta_{-1}(t) = \frac{d\ \delta_{-2}(t)}{dt} \qquad \delta(t) = \frac{d^2\ \delta_{-2}(t)}{d^2 t}$$

1.2 Caratterizzazione dei segnali

1.2.1 Simmetrie dei segnali

$x(t) = \overline{x(t)}$	reale
$x(t) = -\overline{x(t)}$	immaginario
$x(t) + x(-t)$	pari
$x(t) = -x(-t)$	dispari
$x(t) = \overline{x(-t)}$	hermitiano
$x(t) = -\overline{x(-t)}$	antihermitiano

1. Se un segnale è reale e pari allora è hermitiano (non vale il viceversa).
2. Se un segnale è immaginario e dispari allora è hermitiano (non vale il viceversa).
3. Se un segnale è hermitiano allora $\mathrm{Re}(x(\cdot))$ e $|x(\cdot)|$ sono pari.
4. Se un segnale è antihermitiano allora $\mathrm{Im}(x(\cdot))$ e $\arg(x(\cdot))$ sono dispari.
5. Un segnale è hermitiano se e solo se $\mathrm{Re}(x(\cdot))$ pari ed $\mathrm{Im}(x(\cdot))$ dispari.
6. Un segnale è hermitiano se e solo se $|x(\cdot)|$ pari ed $\arg(x(\cdot))$ dispari.

1.2.2 Estensione e durata

Un segnale che è nullo al di fuori dell'intervallo $[t_s, T_s]$ è detto a durato limitata

- ⋆ Estensione :
  Intervallo in cui il segnale è diverso da zero
- ⋆ Durata :
  Misura dell'estensione

1.2.3 Area e valor medio

- ⋆ Area di un segnale di $x(t)$ è definita dall'integrale

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

- ⋆ Valor medio di un segnale x(t) è definito dal limite :

$$m_x = \lim_{T \to +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t)dt$$

L'area e il valor medio sono entrambe funzione lineari invarianti alle traslazioni e inoltre sono in relazione secondo le seguenti proprietà :

- ⋆ Se l'area ha valore finito allora il valor medio ha valor nullo
- ⋆ Se il valor medio ha valore finito allora l'area ha valore infinito

1.2.4 Energia e potenza

- ⋆ Energia :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)^2| dt$$

- ⋆ Potenza

$$P_x = \lim_{T \to +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |x(t)|^2 dt$$

L'energia e la potenza sono entrambi funzioni **non** lineari ma rimangono invarianti alle traslazioni e inoltre assumono unicamente valori reali positivi e inoltre sono in relazione secondo le seguenti proprietà :

  - Se l'energia ha valore finito allora la potenza a valore finito
  - Se la potenza ha valore finito allora l'energia ha valore infinito
  - La somma di due o più segnali di energia è un segnale di energia
  - La somma di due o più di potenza non è necessariamente un segnale di potenza

I segnali ad energia finita e non nulla su $\mathbb{R}$ vengono chiamati **segnali di energia**
I segnali a potenza finita e non nulla su $\mathbb{R}$ vengono chiamanti **segnali di potenza**

- ⋆ Energia mutua di due segnali

$$E_{xy} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\overline{y(t)} dt$$

Se i segnali x e y sono ad energia finita , esiste finita l'energia mutua ed è interpretabile come un prodotto scalare.
Questo ci permette di esprimere l'energia del segnale come :

$$\begin{cases} z = x + y \\ E_z = E_x + E_y + 2Re(E_{xy}) \end{cases}$$

- ⋆ Potenza mutua di due segnali

$$P_{xy} = \lim_{T \to +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t)\overline{y(t)} dt$$

$$\begin{cases} z = x + y \\ P_z = P_x + P_y + 2Re(P_{xy}) \end{cases}$$

1.3 Segnali periodici

Definizione. (Segnale periodico)
Un segnale $x(t)$ è detto periodico se esiste almeno un numero reale $T > 0$ tale che

$$X(t + T) = x(t) \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

Se T è un periodo di $x(t)$ allora anche $kT, k \in \mathbb{Z} \setminus 0$ è un periodo.
Definiamo *periodo fondamentale* il minimo valore di T per cui il segnale sia periodico

Per segnali periodici, con periodo T , l'area e l'energia divergono. Quindi i quattro parametri fondamentali vengono calcolati rispetto ai periodi :

Area

$$A_x(T) = \int_0^T x(t)dt$$

Valor medio

$$m_x(T) = \frac{1}{T}\int_0^{0+T} x(t)dt = \frac{A_x}{T}$$

Energia

$$E_x(T) = \int_0^T |x(t)|^2 dt$$

Potenza media

$$P_x(T) = \frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|^2 dt = \frac{E_x}{T}$$

Valore efficace

$$V_{eff}(T) = \sqrt{P_x(T)} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|^2 dt} = RMS$$

1.4 Convoluzione

Definizione. (Convoluzione)
Sia x e t due integrabili secondo Lebesgue . Si definisce convoluzione di x e y la funzione definita nel seguente modo :

$$(x * y)(t) := \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)y(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t-\tau)y(\tau)d\tau$$

1.4.1 Proprietà

1. Commutatività :

$$f * g = g * f$$

Dimostrazione. Applico la sostituzione $\begin{cases} u = t - \tau \\ du = -d\tau \end{cases}$

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau = -\int_{+\infty}^{-\infty} f(u+\tau)g(u)du = (g * f)(t)$$

□

2. Associatività :

$$f * (g * h) = (f * g) * h$$

3. Distributività

$$f * (g + h) = f * g + f * h$$

4. Traslazione

5. Elemento neutro :
La convoluzione di un qualsiasi segnale con l'impulso di dirac fornisce il segnale stesso .Quindi l'impulso di Dirac è l'elemento neutro della convoluzione

$$[x * \delta]\,(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)\delta(t-\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)\delta(\tau - t)d\tau = x(t)$$

Inoltre se l'impluso di dirac è traslato di t_0 anche il segnale sarà traslato dello stesso fattore

$$(x * \delta_{t_0})(t) = x(t - t_0)$$

6. Area :

$$s(t) = (x * y)(t)$$
$$A(s) = A(x)\ A(y)$$

7. Estensione e durata Definiamo l'estensione e la duratoa di x e y (segnali come)

$$e\,[x] = [t_x, T_x]\,, e\,[y] = [t_y, T_y]$$

$$D_x, D_y$$

Sia $z(t) = x * y(t)$ allora questo segnale avrà estensione e durata pari a

$$e\,[z] = e[x * y] = [t_x + t_y, T_x + T_y]$$
$$D_z = D_x + D_y$$

1.4.2 Convoluzione per segnali periodici

- ⋆ Se solo uno dei due segnali è periodico allora possiamo utilizzare la normale definizione di convoluzione , che ci resituirà un segnale anch'esso periodico
- ⋆ Se entrambi i segnali sono periodici l'integrale diverge , dobbiamo quindi utilizzare una diversa definizione di convoluzione.

$$x * y(t) = \int_{t_0}^{t_0+T} x(\tau)y(t-\tau)\ d\tau$$

1.5 Funzione di Correlazione

Definizione. Per due segnali x e y ad energia finita la correlazione incrociata è definita come :

$$x \star y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\overline{y(t-\tau)}dt \quad \forall \tau \in \mathbb{R}$$

Nel caso di *Segnali di potenza* la cross-correlazione viene definita nel seguente modo :

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \to +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(\tau)\overline{y(t-\tau)}dt$$

1.5.1 Proprietà

- ⋆ La Correlazione **non gode** della proprietà commutativa
- ⋆ La durata del segnale risultato dalla cross relazione è
- ⋆ Relazione con l'operazione di convoluzione

$$R_{xy}(\tau) = x(\tau) * \overline{y(-\tau)}$$
$$R_{yx}(\tau) = y(\tau) * \overline{x(-\tau)}$$

- ⋆ Il valore nell'origine coincide con l'energia mutua dei due segnali :

$$R_{xy}(0) = E_{xy}$$

1.5.2 Auto-correlazione

Se i due segnali x e y sono uguali a funzione di cross correlazione restituisce l'autocorrelazione :

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\overline{x(t-\tau)}dt$$

2 Sistemi a tempo continuo

$$u \longrightarrow \boxed{\Sigma} \longrightarrow v$$

Un sistema è :

- ⋆ **algebrico o senza memoria** se la relazione tra l'input e l'output è una funzione algebrica
- ⋆ **dinamico** se l'outpur dipende dal valore attuale dell'input e anche dalla sua evoluzione passata
- ⋆ **autonomo o libero** se non riceve input , dipende unicamente dalle condizioni iniziali
- ⋆ **forzato** se è influenzato da input esogeni. Gli inpu manipolabile vengono chiamati segnali di controllo , gli input sconosciuti vengono chiamati disturbi.

Definizione. (Linearità)
Un sistema dinamico Σ è lineare se vale il principio della sovrapposizione degli effetti : per un sistema inizialmente a riposo , se i valori di output v_1, v_2 corrispondenti ai valori di input u_1, u_2 allora l'ingresso $u = \alpha u_1 + \beta u_2$ corrisponde l'uscita $\alpha v_1 + \beta v_2$ qualuque siano i valori dei parametri $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$

Definizione. (Tempo-invarianza)
Un sistema dinamico inizialmente a riposo è tempo invariante se traslazioni nel tempo dei valori assunti dagli ingressi $u(t)$ provocano le stesse traslazioni nel tempo dei valori assunti dalle uscite $v(t)$

Definizione. (Causalità) Un sistema dinamico inizialmente a riposo è causale se l'output al tempo t ($v(t)$) ,dipende solo dall'input al tempo t ($u(t)$). In altre parole , per determinare il valore dell'uscita ad un certo istante di tempo T , mon è necessario conoscere il valore dell'ingresso per istanti di tempo $t > T$

Definizione. (Stabilità esterna o BIBO , bounded-input bounded output)
Un sistema dinamico a tempo continuo, inizialmente a riposo , Σ è BIBO stabile se per ogni costante positiva M_u esiste una costante positiva M_v , tale che per ogni segnale di ingresso u(t) che soddisfa

$$|u(t)| \leq M_u \quad t \geq t_0 \quad \forall M_u \in R^+$$

la corrispondente risposta in uscita v(t) è soddisfatta

$$|v(t)| \leq M_v \quad t \geq t_0 \quad \forall M_v \in R^+$$

Definizione. (Stabilità interna o asintotica)
Il Sistema

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{d^i t} \qquad t \geq 0$$

è **asintoticamente stabile** se per ogni condizione iniziale

$$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2 v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{n-1} v(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-}$$

l'evoluzione libera $v_l(t)$ converge a zero asintoticamente

$$\lim_{t \to *\infty} v_l(t) = 0$$

In un Sistema lineare tempo-invariante la funzione h non dipende esplicitamente dal tempo e quindi abbiamo la seguente *equazione differenziale lineare a coefficienti costanti*

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{d^i t} \qquad t \in \mathbb{R} \quad a_i, b_j \in \mathbb{R}$$

- ⋆ $u(t)$ è il segnale di input *noto* , $v(t$ è il segno di output che dobbiamo trovare
- ⋆ I coefficienti a_i, b_j sono assunti noti
- ⋆ I coefficienti $a_n, b_m \neq 0$
- ⋆ se $n \geq m$ il sistema è detto **proprio**
- ⋆ se $n > m$ il sistema è detto **strettamente proprio**

2.1 Evoluzione libera

Modello IO SISO LTI con istante inizale t_0

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{d^i t} \qquad t \geq t_0 \quad a_i, b_j \in \mathbb{R}$$

Siccome il sistema è tempo-invariante assumiamo $t_0 = 0$.
Le condizioni iniziali del sistema sono :

$$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{n-1}v(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-}$$

inoltre l'ingresso $u(t) = 0 \ \forall t < 0$.
Dall'analisi matematica sappiamo che l'uscita v(t) dei modelli LTI può essere scritta come la somma di una soluzione particolare e la soluzione dell'equazione omogenea associata.

$$v(t) = v_l(t) + v_f(t)$$

dove :

- ⋆ $v_f(t)$ è l'evoluzione libera
- ⋆ $v_f(t)$ è l'evoluzione forzata

Definizione. (Evoluzione libera)
Data l'equazione differenziale

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{dt^i} \qquad t \geq 0$$

con condizioni iniziali

$$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{n-1}v(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-}$$

l'evoluzione libera o **risposta libera** del sistema è la soluzione dell'equazione differenziale omogenea associata

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = 0$$

con le stesse condizioni iniziali

Definizione. (Equazione caratteristica)
Data l'equazione differenziali omogenea

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = 0$$

l'equazione algebrica

$$d(s) := \sum_{i=0}^{n} a_i s^i$$

si chiama **equazione caratteristica del sistema**

- $\star$ iI polinomio si dice monico se $a_n = 1$
- $\star$ avendo assunto $a_n \neq 0$, il grado del polinomio è n , cioè $deg(d(s)) = n$

Definizione. Siano $\lambda_1, \lambda_1, \ldots, \lambda_r \in \mathbb{C}$ le radici caratteristiche dell'equazione caratteristica:

$$d(s) := \sum_{i=0}^{n} a_i s^i$$

con molteplicità $\mu_1, \mu_1, \ldots, \mu_r \in \mathbb{N}$ allora

$$d(s) := \prod_{i=1}^{r} (s - \lambda_i)^{\mu_i}$$

Definizione. (Modi del sistema) Le soluzioni elementari dell'equazione omogenea associata

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = 0$$

sono le funzioni

$$m_{i,j} = \frac{t^j}{j!} e^{\lambda_i t}$$

$\forall t \in \mathbb{R}$, $\forall i = 1, \ldots, r$ (numero di radici disitnte)
$\forall j = 0, \ldots, \mu_i - 1$ (μ_i = molteplicità della soluzione)

Teorema 2.1.1 – Evoluzione libera

La soluzione $v_l(t)$ dell'equazione differenziale

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = 0$$

può essere scritta come una combinazione lineare dei modi del sistema , ovvero

$$v_l(t) = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=0}^{\mu_i - 1} c_{i,j} \frac{t^j}{j!} e^{\lambda_i t}$$

dove i coefficienti c_i, j sono determinati univocamente dalle condizoni iniziali

$$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2 v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{n-1} v(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-}$$

Teorema 2.1.2 – Radici di un polinomio a coefficienti reali

Sia $d(s) \in \mathbb{R}[s]$ un polinomio a coefficienti reali. Se $\lambda \in \mathbb{C}$ è un radice complessa di d(s) di molteplicità μ , allora anche il suo complesso coniugato $\overline{\lambda} \in \mathbb{C}$ è un radice complessa di d(s) di molteplicità μ

Definizione. (Carattere dei modi) il modo elementare $m_{i,j}(t)$ è:

- ⋆ **Convergente a zero**
$$\lim_{t\to\infty} |m_{i,j}(t)| = 0$$

- ⋆ **Limitato** :
$$\exists M < \infty \quad |m_{i,j}(t)| < M \quad \forall t \geq 0$$

- ⋆ **illimitato o divergente** : altrimenti

Teorema 2.1.3 – Carattere dei modi

il modo elementare $m_{i,j}(t)$ è:

- ⋆ **Convergente a zero** $t \to \infty$ se e solo se
$$Re(\lambda_i) < 0$$

- ⋆ **Limitato** : in $[0, +\infty]$ se e solo se $Re(\lambda_i) \leq 0$ e i modi sono semplici (cioè la molteplicità delle soluzioni è pari a 1)

- ⋆ **illimitato o divergente** : altrimenti

Definizione. (Stabilità interna o asintotica)
Il Sistema
$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{d^i t} \qquad t \geq 0$$
è **asintoticamente stabile** se per ogni condizione iniziale
$$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2 v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{n-1} v(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-}$$
l'evoluzione libera $v_l(t)$ converge a zero asintoticamente
$$\lim_{t\to *\infty} v_l(t) = 0$$

Definizione. (Stabilità semplice)
Il Sistema
$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{d^i t} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{d^i t} \qquad t \geq 0$$
è **semplicemente stabile** se per ogni condizione iniziale
$$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2 v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{n-1} v(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-}$$
l'evoluzione libera $v_l(t)$ è limitata
$$\exists 0 < M < \infty \quad |v_l(t)| < M \quad \forall t \geq 0$$

Teorema 2.1.4 – Stabilità Semplice

Un sistema LTI causale è :

- ⋆ stabile se e solo se tutti i modi sono limitati
- ⋆ stabile asintoticamente se e solo se tutti i modi convergono a zero per $t \to \infty$

2.2 Evoluzione forzata

Definizione. (Risposta Implusiva)
Dato un sistema causale SISO LTi , descritto dall'equazione differenziale

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{dt^i} \qquad t \geq 0$$

la riposta all'impulso $h(t)$ è la soluzione dell'equazione differenziale

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i h(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \delta(t)}{dt^i} \qquad t \geq 0$$

con condizioni iniziali nulle , il sistema è a riposo

$$h\left(0^-\right) = 0 \ , \ \left.\frac{dh(t)}{dt}\right|_{t=0^-} = 0 \ , \ \left.\frac{d^2h(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-} = 0 \ , \ \ldots \ , \ \left.\frac{d^{n-1}h(t)}{dt^{n-1}}\right|_{t=0^-} = 0$$

Definizione. (Segnale causale)
Un segnale v(t) è causale se il suo supporto è definito $[0, +\infty)$ contenuto...

Teorema 2.2.1 – Risposta Impulsiva

La risposta impulsiva h(t) del sistema SISO LTI tempo continuo causale Σ

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i h(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \delta(t)}{dt^i} \qquad t \geq 0$$

ha la forma

$$h(t) = d_0\delta(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=0}^{\mu_i - 1} d_{i,j}\frac{t^j}{j!}e^{\lambda_i t}\delta_{-1}(t) \quad t \geq 0$$

Inoltre $d_0, d_{i,j} \in \mathbb{R}\ e\ d_0 = 0\ se\ n > m\ (d_0 \neq 0\ se\ n = m)$

Dimostrazione. Per $t > 0$ la delta di Dirac e tutte le sue derivate sono identicamente nulle , quindi h(t) deve soddisfare per $t > 0$ l'equazione omogenea

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i h(t)}{dt^i} = 0 \quad t > 0$$

con tutte le condizioni iniziali nulle. Dallo studio dell'evelouzione libera sappiamo che ha forma che deve essere del tipo

$$h(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=0}^{\mu_i - 1} d_{i,j}\frac{t^j}{j!}e^{\lambda_i t}$$

il comportamento in $t = 0$ dell'equazione precedente , consiste nella combinazione lineare dei termini □

Teorema 2.2.2 – Causalità

il sistema continuo LTI descritto dalla risposta implusiva h(t) è causale se e solo se h(t) è un segnale causale (è zero per i tempi negativi)

$$h(t) = 0 \quad \forall t < 0$$

Teorema 2.2.3 – Evoluzione forzata

La risposta forzata del sistema causale SISO LTI con risposta all'impulso h(t) , condizioni iniziali nulle , e input $u(t)$ è data dal prodotto di convoluzione

$$
\begin{aligned}
v_f(t) &= h * u(t) \\
&= \int_{0^-}^{+\infty} h(\tau)u(t-\tau)d\tau \\
&= \int_{-\infty}^{t^+} h(t-\tau)u(\tau)d\tau
\end{aligned}
$$

Se u(t) è un segnale causale allora

$$
\begin{aligned}
v_f(t) &= h * u(t) \\
&= \int_{0^-}^{t^+} h(\tau)u(t-\tau)d\tau \\
&= \int_{-0^-}^{t^+} h(t-\tau)u(\tau)d\tau
\end{aligned}
$$

quindi anche la risposta forza è una segnale causale

Dimostrazione. Consideriamo u(t) , h(t) segnali qualsiasi.
Sappiamo che partendo da condizioni inizali nulle abbiamo

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i h(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \delta(t)}{dt^i}$$

Per la **tempo invarianza** abbiamo che

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i h(t-\tau)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \delta(t-\tau)}{dt^i} \quad \tau > 0$$

inoltre per la **linearità**

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i \ c(h(t-\tau))}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \ c(\delta(t-\tau))}{dt^i}$$

Al posto di c consideriamo $u(t)d\tau$

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i \ u(t)d\tau(h(t-\tau))}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \ u(t)d\tau(\delta(t-\tau))}{dt^i}$$

Per il principio di sovrapposizione degli effetti vale anche

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i \ (\sum_k u(\tau_k)h(t-\tau_k)d\tau_k)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \ \sum_k u(\tau_k)(\delta(t-\tau_k)d\tau_k)}{dt^i}$$

Passando all'integrale

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i \ (\int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau)h(t-\tau)d\tau)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i \ \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau(\delta(t-\tau)d\tau)}{dt^i}$$

Usando infinite la proprietà di riproducibilità dell'impulso della delta di Dirac nel termine di destra

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i \ (\int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau)h(t-\tau)d\tau)}{dt^i} = \sum_{i=0}^{m} b_i \frac{d^i u(t)}{dt^i}$$
$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i \ [h * u](t)}{dt^i} = \sum_{i=0}^{m} b_i \frac{d^i u(t)}{dt^i}$$

Quindi abbiamo dimostrato che

$$v_f(t) = [h * u](t)$$

□

Teorema 2.2.4 – BIBO stabilità per sistemi LTI a tempo continuo

l sistema LTI a tempo continuo Σ descritto dalla risposta implusiva $h(t)$ è BIBO stabile se e solo se $h(t) \in L_1(\mathbb{R})$, quindi se h(t) è una funzione sommabile

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)| dt < +\infty$$

Se il sistema è causale allora

$$\int_{0^-}^{\infty} |h(t)| dt < +\infty$$

Dimostrazione. Supponiamo che la risposta impulsiva sia una funzione sommabile che il segnale d'ingresso sia limitato $|u(t)| < M_u \quad \forall t \in \mathbb{R}$.
Vale quindi

$$\begin{aligned}
|v(t)| &= |\int_{-\infty}^{+\infty} [h * u](t) dt| \\
&\leq \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)u(t-\tau)| dt \\
&\leq \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)| \ |u(t-\tau)| dt \\
&< M_u \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)| dt \\
&< M_u \ M_h = M_v
\end{aligned}$$

Supponiamo per assurdo che $h(t)$ non sia un segnale sommabile . Definiamo il segnale di ingresso come

$$u(t) = sgn(h(-t)) \begin{cases} +1 & h(t-\tau) > 0 \\ -1 & h(t-\tau) < 0 \end{cases}$$

e consideriamo l'uscita al tempo $t = 0$

$$\begin{aligned} v_f(0) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)u(0-\tau)d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(0-\tau)u(\tau)d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(0-\tau)sgn(h(-\tau)) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} |h(-\tau)|d\tau = +\infty \end{aligned}$$

□

Teorema 2.2.5 – (BIBO stabilità)

Un sistema LTI a tempo continuo causale Σ è BIBO stabile se e solo se i modi elementari che compaiono con coefficiente diverso da zero nell'espressione della risposta implulsiva

$$h(t) = d_0\delta(t) + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=0}^{\mu_i-1} d_{i,j}\frac{t^j}{j!}e^{\lambda_i t}\delta_{-1}(t) \quad t \geq 0$$

sono convergenti a zero

Teorema 2.2.6 – Stabilità asintotica

Un sistema LTI a tempo continuo causale Σ è asintoticamente stabile se e solo se tutti i modi della risposta libera

$$v_l(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=0}^{\mu_i-1} c_{i,j}\frac{t^j}{j!}e^{\lambda_i t} \qquad t \geq 0$$

convergono a zero asintoticamente

3 Trasformata di Laplace

Dato un segnale $v(t), t \in \mathbb{R}_+^0$, somma di termini localmente sommabili ($\mathbb{L}_{loc}^1 \in \mathbb{R}_+^0$) e di un insieme finito di segnali impulsivi , la trasformata di Laplace $V(s)$ di v(t) è definita dall'integrale

$$\mathcal{L}[v(t)] = V(s) = \int_{0^-}^{+\infty} v(t)e^{-st}dt \qquad s = \sigma + \omega t \in \mathbb{C}$$

3.1 Proprietà

- ⋆ **Linearità** :
  La traformata di Laplace è lineare in virtù della linearità dell'integrale

  $$\mathcal{L}[a_1 v_1(t) + a_2 v_2(t)] = a_1 \mathcal{L}[v_1(t)] + a_2 \mathcal{L}[v_2(t)]$$

  Inoltre l'ascissa di convergenza della trasformata $\mathcal{L}[a_1 v_1(t) + a_2 v_2(t)]$ è minore o uguale alla maggiore delle due ascisse di convergenza

- ⋆ **Derivata** :
  Se la funzione $v(t)$ è traformabile secondo Laplace ed esistono finito le condizioni iniziali :

  $$v\left(0^-\right), \left.\frac{dv(t)}{dt}\right|_{t=0^-}, \left.\frac{d^2v(t)}{dt^2}\right|_{t=0^-}, \ldots, \left.\frac{d^{ni-1}v(t)}{dt^{i-1}}\right|_{t=0^-} \qquad i \in \mathbb{N}$$

  allora vale

  $$\mathcal{L}\left[\frac{d^i v(t)}{dt^i}\right] = s^i \mathcal{L}[v(t)] - \sum_{k=0}^{i-1} \frac{d^k v(t)}{dt^k}\Big|_{t=0^-} s^{i-1-k}$$

  Inoltre l'ascissa di convergenza di $\mathcal{L}\left[\frac{d^i v(t)}{dt^i}\right]$ è minore o uguale di quella della trasformata di v(t)

- ⋆ **Moltiplicazione per una funzione polinomiale** :
  Se v(t) è dotata di trasformata di Laplace allora esiste

  $$\mathcal{L}[t^i v(t)] = (-1)^i \; \frac{d^i V(s)}{dt^i}$$

- ⋆ **Ritardo temporale** :
  Sia v(t) una segnale dotato di trasformata di Laplace V(s). definito il segnale ritardato come

  $$v(t-\tau) = \begin{cases} v(t-\tau) & t-\tau > 0 \\ 0 \;\; t-\tau < 0 \end{cases}$$

  $$\mathcal{L}v(t-\tau) = e^{-s\tau}V(s)$$

- ⋆ **Moltiplicazione per una funzione esponenziale** :
  Se v(t) ammette trasformata di Laplace con ascissa di convergenza α allora esiste

  $$\mathcal{L}[e^{\lambda t}v(t)] = V(s-\lambda)$$

  e tale trasformata converge per $Re(s) > a + Re(\lambda)$

- ⋆ **Convoluzione** :
  Sia $v_1(t), v_2(t)$ sono due funzioni nulle per $t < 0$ e dotate di trasformata di Laplace allora esiste

  $$\mathcal{L}[v_1 * v_2(t)] = V_1(s)V_2(s)$$

  L'asciussa di convergenza è minore o uguale di $max\left\{a_1, a_2\right\}$

- **Integrale** :
  Se v(t) è dotata di trasformata di Laplace, allora esiste
$$\mathcal{L}\left[\int_{0^-}^{t^+} v(\tau)d\tau\right] = \frac{V(s)}{s}$$

- **Teorema del valore finale:**
  Sia v(t) una funzione dotata di trasformata di Laplace. Se esiste finito li limite all'infinito di v(t) allora vale la seguente formula
$$\lim_{t\to\infty} v(t) = \lim_{s\to 0} s\ V(s)$$

- **Teorema del valore iniziale :**
  Sia v(t) una funzione dotata di trasformata di Laplace. Se esiste finito li limite $\lim_{t\to 0^+} v(t)$ allora vale la seguente formula
$$\lim_{t\to 0^+} v(t) = \lim_{s\to\infty} s\ V(s)$$

- **Cambiamento di scala :**
  Sia v(t) una funzione dotata di trasformata di Laplace V(s) , con ascissa di convergenza α e sia r una costante reale positiva , allora
$$\mathcal{L}\left[v(rt)\right] = \frac{1}{2}V(\frac{s}{r})$$

Vogliamo utilizzare la trasfromata di Laplace per risolvere i sistemi causali LTI descritta da
$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{dit^i} \quad n \geq m \quad \forall t \in \mathbb{R} \quad a_n, b_n \neq 0$$
Se l'ingresso u(t) ha trasformata di Laplace allora anche v(t) ha trasformata di Laplace. Inoltre sfruttando le proprietà della trasformata di Fuorier abbiamo che
$$\mathcal{L}\left[\frac{d^i v(t)}{dt^i}\right] = s^i \mathcal{L}[v(t)] - \sum_{k=0}^{i-1} \frac{d^k v(t)}{dt^k}\bigg|_{t=0^-} s^{i-1-k}$$
$$\mathcal{L}\left[\frac{d^i u(t)}{dt^i}\right] = s^i U(s) \quad \text{(poichè è una segnale causale)}$$
Applicando la trasformata di laplace ad ogni componente del sistema abbiamo che
$$\mathcal{L}\left[\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{dt^i}\right] = \mathcal{L}\left[\sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{dt^i}\right]$$
$$a_0 V(s) + \sum_{i=1}^{n} a_i s^i V(s) - \sum_{i=1}^{n} a_i \left(\sum_{k=0}^{i-1} \frac{d^k v(t)}{dt^k}\bigg|_{t=0^-} s^{i-1-k}\right) = \sum_{j=0}^{m} b_j s^i U(s)$$
$$v(s)\sum_{i=0}^{n} a_i s^i - \sum_{i=1}^{n} a_i \left(\sum_{k=0}^{i-1} \frac{d^k v(t)}{dt^k}\bigg|_{t=0^-} s^{i-1-k}\right) = \sum_{j=0}^{m} b_j s^i U(s)$$
$$Definisco \quad d(s) := \sum_{i=0}^{n} a_i s^i \quad n(s) := \sum_{j=0}^{m} b_j s^i \quad p(s) := \sum_{i=1}^{n} a_i \left(\sum_{k=0}^{i-1} \frac{d^k v(t)}{dt^k}\right)$$
$$d(s)V(s) - p(s) = n(s)U(s)$$
$$V(s) = \frac{n(s)}{d(s)}U(s) + \frac{p(s)}{d(s)} \quad \forall s \in \mathbb{C}$$
$$= V_f(s) + V_l(s)$$

Definizione. (Funzione di trasferimento) Il rapporto tra i polinomi $n(s)$ e $d(s)$

$$H(s) = \frac{n(s)}{d(s)} \quad s \in \mathbb{C}$$

è detta funzione di traferimento di Σ

Inoltre abbiamo che la funzione di trasferimento è la trasformata di Laplace della risposta all'impulso

$$\boxed{H(s) := \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-st}}$$

$$\mathcal{L}[h(t)] = H(s)$$

$$\mathcal{L}\left[d_0 \delta(t) + \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=0}^{\mu_i - 1} d_{i,j} \frac{t^j}{j!} e^{\lambda_i t} \delta_{-1}(t) \right] = H(s)$$

$$Usando \ \ \mathcal{L}[\delta(t)] = 1 \ \ \mathcal{L}[e^{\sigma t}] = \frac{1}{s - \sigma} \ \ \mathbb{L}[t^i f(t)] = (-1)^i \frac{d^i F(s)}{dt^i}$$

$$\boxed{H(s) = d_0 + \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=0}^{\mu_i - 1} \frac{d_{i,j}}{(s - \lambda_i)^{j+1}}}$$

Si ha che l'asse di convergenza della funzione di trasferimento vale

$$max \left\{ Re(\lambda_i) | \exists j : d_{i,j} \neq 0 \right\}$$

Ricordando la formula 3.1 abbiamo che la funzione di trasferimento puo essere riscritta come

$$H(s) = \frac{b_m s^m + b^{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0 s^0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 s^0}$$

La funzione è una funziona razionale nella variabile s , propria se $n \geq m$, strettamente propria se $n > m$. Inoltre definiamo con $Re[s]$ lo spazio dei polinomi a coefficienti reali di s e con $Re(s)$ lo spazio della funzioni razionali di s . Inoltre se esplicitiamo le radici dei polinomi otteniamo

$$H(s) = K \frac{(s - z_1)^{q_1} \ (s - z_2)^{q_2} \ \dots \ (s - z_u)^{q_u}}{(s - p_1)^{\mu_1} \ (s - p_2)^{\mu_2} \ \dots \ (s - p_h)^{\mu_h}} \qquad \begin{cases} \sum q_i = m \\ \sum \mu_i = n \\ K = \frac{b_m}{a_n} \end{cases}$$

Definizione. (Zero)
Gli zeri della funzione di trasferimento H(s) sono i valori di s per i quali H(s) tende a zero (Sono quindi le radici del polinomio n(s)).
Lo zero $z_i \in \mathbb{C}$ ha molteplicità $k \in \mathbb{N}$ se il limite

$$\lim_{s \to z_i} \frac{1}{(s - z_i)^k} H(s)$$

esiste finito e diverso da zero.
Il punto improprio ∞ è uno zero di molteplicità K se il limite

$$\lim_{s \to \infty} s^k H(s)$$

esiste finito e diverso da zero.

Definizione. (Polo)
I poli della funzione di trasferimento H(s) sono i valori per i quali H(s) tende a infinito (Sono quindi le radici del polinomio d(s)).
Il polo $p_i \in \mathbb{C}$ ha molteplicità $k \in \mathbb{N}$ se il limite

$$\lim_{s \to p_i} (s - p_i)^k H(s)$$

esiste finito e diverso da zero .
Il punto improprio ∞ è un polo di molteplicità k se il limite

$$\lim_{s \to \infty} \frac{1}{s^k} H(s)$$

esiste finito e diverso da zero

Teorema 3.1.1 – BIBO stabilità e poli di H(s)

Dato il sistema causale SISO LTI di funzione di trasferimento H(s) con polinomi n(s) e d(s) coprimi , il sistema è BIBO stabile se e solo se tutti i poli sono nel semipiano sinistro aperto del piano complesso , ovvero

$$Re(p_i) < 0, i = 0, \ldots, deg\,\{d(s)\}$$

4 Diagrammi di Bode

4.1 risposta in frequenza

Definizione. (Risposta in frequenza)

$$H : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$$
$$H(jw) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-jwt}dt \quad w \in \mathbb{R}$$

- ⋆ Modulo :
$$A(w) = |H(jw)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-jwt}dt \right| \quad w \in \mathbb{R}$$

- ⋆ Fase :
$$\phi(w) =< H(jw) = arg\left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-jwt}dt \right\} \quad w \in \mathbb{R}$$

- ⋆
$$\overline{H(jw)} = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{h(t)e^{-jwt}}dt = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)\overline{e^{-jwt}}dt = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{jwt} = H(-jw)$$
La risposta in frequenza è una funzione hermitiana.
Da questa proprietà deriviamo che
$$A(w) = A(-w) \qquad phi(w) = -\phi(-w)$$

- ⋆ Per sistemi BIBO stabili con risposta impulsiva senza componenti impulsiva , la riposta in frequenza H(jw) è una funzione continua in w e vale
$$\lim_{w \to \pm\infty} H(jw) = 0$$

I sistemi causali LTI e BIBO stabili descritti da
$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i v(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^i u(t)}{dit^i} \qquad t \in \mathbb{R}$$
rispondono ad un ingresso $u(t) = e^{jwt}$ $t \in \mathbb{R}$ con $v(t) = H(jw)e^{jwt}$ $t \in \mathbb{R}$, sostituendo i termini di u(t) e v(t) nel sistema otteniamo
$$\sum_{i=0}^{n} a_i H(jw)(jw)^i e^{jwt} = \sum_{i=0}^{n} b_i (jw)^i e^{jwt} \quad t \in \mathbb{R}$$
$$H(jw)e^{jwt} \sum_{i=0}^{n} a_i (jw)^i = e^{jwt} \sum_{i=0}^{n} b_i (jw)^i \quad t \in \mathbb{R}$$
$$H(jw) = \frac{\sum_{i=0}^{n} b_i (jw)^i}{\sum_{i=0}^{n} a_i (jw)^i}$$
La riposta in frequenza H(jw) non è altro che la **trasforma di Fourier della risposta impulsiva** quando il sistema LTI è BIBO stabile
$$H(jw) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-jwt}dt$$
Per sistemi causali
$$H(jw) = \int_{0^-}^{+\infty} h(t)e^{-jwt}dt$$
Sempre per i sistemi BiBO stabili vale che
$$H(s) := \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-st}$$
si ha quindi che
$$H(jw) = H(s)\big|_{s=jw}$$

4.2 Diagrammi di Bode

Definizione. (Diagramma di Bode)
I **Diagrammi di Bode** sono una rappresentazione grafica della riposta in frequenza H(jw).

Sfruttando le proprietà di simmetria del modulo e dalla fase della risposta in frequenza $A(w) = A(-w) \quad \phi(w) = -\phi(-w)$ possiamo graficare $w \geq 0$ Inoltre la riposa in frequenza in notazione polare

$$H(jw) = A(w)e^{j\phi(w)}$$
$$ln(H(jw)) = ln(A(w)) + j\phi(w)$$

quindi per graficare il logaritmo della riposta in frequenza dobbiamo graficare

- ⋆ il logaritmo naturale dell'ampiezza (*Diagramma di bode dell'ampiezza*)
- ⋆ il modulo della riposta (*Diagramma di bode della fase*)

Inoltre invece di utilizzare il logaritmo naturale del modulo si usa il **decibel(dB)**

$$|H(jw)|_{db} = 20 \ \log_{10}|H(jw)|$$

Anche nell'asse delle ascisse non utilizzeremo w ma $\log_{10} w$ Data la funzione di trasferimento come rapporto di polinomi

$$H(s) = K\frac{(s-z_1)^{\mu'_1}\ (s-z_2)^{\mu'_2}\ \dots\ (s-z_u)^{\mu'_u}}{(s-p_1)^{\mu_1}\ (s-p_2)^{\mu_2}\ \dots\ (s-p_r)^{\mu_r}}$$

- ⋆ $z_i \in \mathbb{R}$ con molteplicità di μ'_i veranno riscritti come

$$(s-z_i) = -z_i(1+s\tau'_i) \qquad \tau'_i = \frac{-1}{z_i}$$
$$(s-z_i)^{\mu'_i} = (-z_i)^{\mu'_i}(1+s\tau'_i)^{\mu'_i}$$

- ⋆ poli reali $p_i \in \mathbb{R}$ di molteplicità μ_i

$$(s-p_i = -z_i(1+s\tau_i) \qquad \tau_i = \frac{-1}{p_i} \text{ costante di tempo del polo}$$
$$(s-p_i)^{\mu_i} = (-p_i)^{\mu_i}(1+s\tau_i)^{\mu_i}$$

- ⋆ zeri complessi coniugati $z_i, \overline{z_i}$ di molplicità μ'_i

$$\begin{aligned}(s-z_i)(s-\overline{z_i}) &= s^2 - 2Re(z_i) + |z_i|^2 \\ &= |z_i|^2\left(1 + 2\ \frac{Re(z_i)}{|z_i|}\ \frac{s}{|z_i|} + \frac{s^2}{|z_i|^2}\right) \\ &= |z_i|^2\left(1 + 2\zeta'_i\frac{s}{\omega'_i} + \frac{s^2}{\omega'^2_i}\right) \quad \begin{cases}\zeta'_i = -\frac{Re(z_i)}{|z_i|} \\ \omega'_{ni} = |z_i|\end{cases}\end{aligned}$$
$$(s-z_i)^{\mu'_i}(s-\overline{z_i})^{\mu'_i} = |z_i|^{2\mu'_i}\left(1 + 2\zeta'_i\frac{s}{\omega'_{ni}} + \frac{s^2}{\omega'^2_{ni}}\right)^{\mu'_i}$$

- ⋆ poli complessi coniugati $p_i, \overline{z_i}$ di molteplicità μ_i

$$\begin{aligned}(s-p_i)(s-\overline{p_i}) &= s^2 - 2Re(p_i) + |p_i|^2 \\ &= |p_i|^2\left(1 + 2\ \frac{Re(p_i)}{|p_i|}\ \frac{s}{|p_i|} + \frac{s^2}{|p_i|^2}\right) \\ &= |p_i|^2\left(1 + 2\zeta'_i\frac{s}{\omega_{ni}} + \frac{s^2}{\omega^2_{ni}}\right) \quad \begin{cases}\zeta_i = -\frac{Re(p_i)}{|p_i|} \\ \omega_{ni} = |p_i|\end{cases}\end{aligned}$$
$$(s-p_i)^{\mu_i}(s-\overline{p_i})^{\mu_i} = |p_i|^{2\mu_i}\left(1 + 2\zeta_i\frac{s}{\omega_{ni}} + \frac{s^2}{\omega^2_{ni}}\right)^{\mu_i}$$

I parametri $\omega'_{ni}, \omega_{ni}$ vengo detti **pulsazioni naturali**.
I parametri ζ'_i, ζ_i vengono detti **coefficienti di smorzamento**

4.3 Forma di Bode della funzione di trasferimento

$$H(s) = K_B \frac{\prod_i (1+s\tau'_i)^{\mu'_i} \prod_i \left(1 + 2\zeta'_i \frac{s}{\omega'_{ni}} - \frac{s^2}{\omega'^2_{ni}}\right)^{\mu'_i}}{s^v \prod_i (1+s\tau_i)^{\mu_i} \prod_i \left(1 + 2\zeta_i \frac{s}{\omega_{ni}} - \frac{s^2}{\omega^2_{ni}}\right)^{\mu_i}}$$

$$K_B = \frac{b_m \prod_i (\tau_i)^{\mu_i} \prod \left(\frac{1}{\omega^2_{ni}}\right)^{2\mu_i}}{a_n \prod_i (\tau'_i)^{\mu'_i} \prod \left(\frac{1}{\omega'^2_{ni}}\right)^{2\mu'_i}} \quad \textbf{Guadagno di Bode}$$

Ora sapendo che $H(jw) = H(s)\Big|_{s=jw}$ possiamo ricavare la forme di bode della riposta in frequenza

$$\boxed{H(jw) = K_B \frac{\prod_i (1+jw\tau'_i)^{\mu'_i} \prod_i \left(1 + 2\zeta'_i \frac{jw}{\omega'_{ni}} - \frac{w^2}{\omega'^2_{ni}}\right)^{\mu'_i}}{(jw)^v \prod_i (1+jw\tau_i)^{\mu}_i \prod_i \left(1 + 2\zeta_i \frac{jw}{\omega_{ni}} - \frac{w^2}{\omega^2_{ni}}\right)^{\mu_i}}}$$

Utilizzando il logaritmo e l'argomento possiamo sfruttare le proprietà che ci semplificano i conti

$$\begin{cases} ar(ab) = arg(a) + arg(b) \\ arg(\frac{a}{b}) = arg(a) - arg(b) \\ arg(a^k) = k\ arg(a) \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
|H(j\omega)|_{\text{dB}} = 20\log_{10} &\left\{ \frac{|K_B| \prod_{i=1} |1 + j\omega\tau'_i|^{\mu'_i} \prod_{i=1} \left|1 + j2\frac{\zeta'_i}{\omega^2_n}\omega - \frac{1}{\omega^2_n}\omega^2\right|^{\mu'_i}}{|(j\omega)^\nu| \prod_{i=1} |1 + j\omega\tau_i|^{\mu_i} \prod_{i=1} \left|1 + j2\frac{\zeta_i}{\omega^2_n}\omega - \frac{1}{\omega^2_n}\omega^2\right|^{\mu_i}} \right\} \\
= 20\log_{10}|K_B| + &\quad \color{blue}{\text{termine costante}} \\
+ \sum_{i=1} 20\mu'_i \log_{10} |1 + j\omega\tau'_i| + \ldots &\quad \color{blue}{\text{zeri reali}} \\
+ \sum_{i=1} 20\mu'_i \log_{10} \left|1 + j2\frac{\zeta'_i}{\omega^2_n}\omega - \frac{1}{\omega^2_n}\omega^2\right| + \ldots &\quad \color{blue}{\text{zeri complessi coniugati}} \\
- 20\nu \log_{10} |j\omega| - \ldots &\quad \color{blue}{\text{radici nell'origine}} \\
- \sum_{i=1} 20\mu_i \log_{10} |1 + j\omega\tau_i| - \ldots &\quad \color{blue}{\text{poli reali}} \\
- \sum_{i=1} 20\mu_i \log_{10} \left|1 + j2\frac{\zeta_i}{\omega^2_n}\omega - \frac{1}{\omega^2_n}\omega^2\right| &\quad \color{blue}{\text{poli complessi coniugati}}
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
\angle H(j\omega) &= \arg\left\{ K_B \frac{\prod_{i=1}(1+j\omega\tau_i')^{\mu_i'}\prod_{i=1}\left(1+j2\frac{\zeta_i'}{\omega_n'}\omega-\frac{1}{\omega_n'^2}\omega^2\right)^{\mu_i'}}{(j\omega)^{\nu}\prod_{i=1}(1+j\omega\tau_i)^{\mu_i}\prod_{i=1}\left(1+j2\frac{\zeta_i'}{\omega_n'}\omega-\frac{1}{\omega_n'^2}\omega^2\right)^{\mu_i}} \right\} \\
&= \arg(K_B) + \quad \text{termine costante} \\
&\quad + \sum_{i=1}\mu_i' \arg(1+j\omega\tau_i') + \ldots \quad \text{zeri reali} \\
&\quad + \sum_{i=1}\mu_i' \arg\left(1+j2\frac{\zeta_i'}{\omega_n'}\omega-\frac{1}{\omega_n'^2}\omega^2\right) + \ldots \quad \text{zeri complessi coniugati} \\
&\quad - \nu \arg(j\omega) - \ldots \quad \text{radici nell'origine} \\
&\quad - \sum_{i=1}\mu_i \arg(1+j\omega\tau_i) - \ldots \quad \text{poli reali} \\
&\quad - \sum_{i=1}\mu_i \arg\left(1+j2\frac{\zeta_i'}{\omega_n'}\omega-\frac{1}{\omega_n'^2}\omega^2\right) \quad \text{poli complessi coniugati}
\end{aligned}
$$