Analisi Matematica II

Analisi complessa

Virginia De Cicco
Sapienza Univ. di Roma

Trasformate di Laplace

La trasformata di Laplace

Sia I un intervallo contenente il semiasse reale positivo: $\mathbb{R}_+ = [0, +\infty) \subseteq I$ e sia $f : I \longrightarrow \mathbb{C}$ una funzione a valori reali o complessi.

Funzione $\mathcal{L}$-trasformabile (o trasformabile secondo Laplace)

La funzione f è $\mathcal{L}$-**trasformabile** (o trasformabile secondo Laplace) se $\exists\, s \in \mathbb{C}$ tale che la funzione $t \longrightarrow e^{-st} f(t)$ è sommabile su $\mathbb{R}_+$, cioè tale che

$$\int_0^{+\infty} |e^{-st} f(t)| dt < +\infty.$$

In tal caso chiameremo **integrale di Laplace** l'integrale

$$\int_0^{+\infty} e^{-st} f(t)\, dt.$$

Osservazione

Se l'integrale precedente converge per un assegnato $s = s_0$, cioè $e^{-st}f(t)$ è sommabile su $\mathbb{R}_+$, allora converge $\forall s \in \mathbb{C}$ tale che $Re(s) > Re(s_0)$.

Infatti

$$|e^{-st}\, f(t)| = e^{-Re(s)\, t}\, |f(t)| \leq e^{-Re(s_0)\, t}\, |f(t)| = |e^{-s_0 t}\, f(t)|,$$

e dunque $e^{-st}\, f(t)$ è maggiorata in modulo da una funzione sommabile ed è perciò sommabile a sua volta.

Osservazione

Si ha dunque che se l'insieme degli $s \in \mathbb{C}$ per cui

$$\int_0^{+\infty} e^{-st} f(t)\, dt$$

converge non è vuoto,

allora è costituito da un semipiano (destro), quello dei numeri complessi s per i quali si ha

$$\sigma = Re(s) > \sigma[f],$$

dove $\sigma[f]$ è l'estremo inferiore delle parti reali dei numeri $s \in \mathbb{C}$ per cui $\displaystyle\int_0^{+\infty} e^{-st} f(t)\, dt$ converge.

Trasformata di Laplace

Possiamo dunque dare la seguente
Definizione

Sia $f : I \longrightarrow \mathbb{C}$ (dove $\mathbb{R}_+ \subseteq I$) una funzione $\mathcal{L}$-trasformabile; posto

$$\sigma[f] := inf \left\{ Re(s) : e^{-st} f(t) \text{ è sommabile } \right\},$$

per ogni s tale che $Re(s) > \sigma[f]$ chiameremo **trasformata di Laplace** di f la funzione

$$\mathcal{L}[f](s) = F(s) := \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t)\, dt$$

(unilatera essendo $t > 0$).

Diremo inoltre che $\sigma[f]$ è l'ascissa di convergenza della funzione f.

La trasformata è un operatore funzionale lineare che associa ad una funzione di variabile reale una funzione di variabile complessa. La trasformata di Laplace rientra nella categoria delle trasformate integrali.

Si tratta di una trasformata integrale che gode di numerose proprietà, che la rendono utile in molti contesti. L′aspetto più vantaggioso è che l'integrale e la derivata di una funzione diventano rispettivamente una divisione e una moltiplicazione per la variabile complessa,
analogamente al modo in cui i logaritmi cambiano la moltiplicazione di numeri nella loro addizione.
Essa consente di trasformare le equazioni integrali e le equazioni differenziali in equazioni polinomiali, che sono più immediate da risolvere.
Inoltre nello spazio di Laplace la convoluzione diventa una moltiplicazione.

Osservazione

Se la funzione $f(t)$ è di ordine esponenziale α, cioè verifica una disuguaglianza del tipo

$$|f(t)| \leq M\, e^{\alpha\, t} \qquad \text{con } \alpha \in \mathbb{R}$$

allora $\sigma[f] \leq \alpha$.

Infatti per ogni $s \in \mathbb{C}$ con $Re(s) > \alpha$ si ha

$$|e^{-s\,t}\, f(t)| = e^{-Re(s)\,t}\, |f(t)| \leq e^{-Re(s)\,t}\, M\, e^{\alpha\, t} = Me^{(\alpha - Re(s))t}$$

e l'ultima funzione è sommabile in $\mathbb{R}_+$.

Si osservi inoltre che una funzione di ordine esponenziale $\alpha = 0$ è semplicemente una funzione limitata: $|f(t)| \leq M$.

Esempio 1

Consideriamo la cosiddetta funzione di Heaviside:

$$H(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & \text{altrove.} \end{cases}$$

Si tratta quindi di vedere quando $e^{-s\,t}$ è sommabile su $\mathbb{R}_+$. Si ha

$$|e^{-s\,t}| = e^{-Re(s)\,t}$$

che risulta sommabile su $\mathbb{R}_+$ se (e solo se) $Re(s) > 0$. Dunque si ottiene $\sigma[f] = 0$ e la trasformata di Laplace si calcola come integrale improprio

$$\mathcal{L}[H](s) = \int_0^{+\infty} e^{-st}\,dt = \frac{1}{s}.$$

Si noti che la funzione ottenuta $\dfrac{1}{s}$ è definita e olomorfa in $\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}$, ma essa è la trasformata di Laplace di $H(t)$ solo nel semipiano $Re(s) > 0$.

Esempio 2

Consideriamo $f(t) = e^{at}$ con $a = \alpha + i\,\beta$.

La funzione $t \longrightarrow e^{-st}\,e^{at} = e^{-(s-a)t}$ è sommabile se (e solo se) $Re(s-a) = Re(s) - \alpha > 0$, cioè $Re(s) > \alpha$.

Dunque si ottiene $\sigma[f] = \alpha$.

Il calcolo della trasformata di Laplace in questo semipiano è simile a quello dell'esempio precedente

$$\mathcal{L}[f](s) = \int_0^{+\infty} e^{-(s-a)t}\,dt = \frac{1}{s-a}.$$

Per $a = 0$ si ritrova il risultato relativo alla funzione di Heaviside.

Esempio 3

Consideriamo l'impulso di durata $h > 0$:

$$\mathcal{X}_{[0,h)}(t) = H(t) - H(t-h) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < h \\ 0 & \text{altrove.} \end{cases}$$

Si ha per $s \neq 0$

$$\mathcal{L}[\mathcal{X}_{[0,h)}](s) = \int_0^{+\infty} e^{-st}\, \mathcal{X}_{[0,h)}(t)\, dt = \int_0^h e^{-st}\, dt = \left[\frac{e^{-st}}{s}\right]_{t=h}^{t=0} = \frac{1-e^{-sh}}{s}.$$

C'è dunque una singolarità per $s = 0$, che risulta eliminabile:

$$\lim_{s\to 0} \mathcal{L}[\mathcal{X}_{[0,h)}](s) = \lim_{s\to 0} \frac{1-e^{-sh}}{s} = \lim_{s\to 0} \frac{1-e^{-sh}}{sh}\, h = h = \mathcal{L}[\mathcal{X}_{[0,h)}](0).$$

Possiamo quindi concludere che la trasformata di Laplace, in questo caso, ha ascissa di convergenza $\sigma[f] = -\infty$; questo avviene, più in generale, ogni volta che $f = 0$ fuori di un insieme compatto, i.e. chiuso e limitato.

Proprietà della trasformata di Laplace

Linearità

La trasformata di Laplace è **lineare**,

cioè per ogni coppia f_1 e f_2 di funzioni $\mathcal{L}$-trasformabili con ascisse di convergenza $\sigma[f_1]$ e $\sigma[f_2]$ rispettivamente e per ogni c_1, c_2 costanti si ha

$$\mathcal{L}[c_1 f_1 + c_2 f_2](s) = c_1 \mathcal{L}[f_1](s) + c_2 \mathcal{L}[f_2](s),$$

$$\forall s : \quad Re(s) > max \{\sigma[f_1], \sigma[f_2]\}.$$

Trasformata di seno e coseno

Dall'esempio 2 troviamo

$$\mathcal{L}[e^{\pm\, i\omega t}](s) = \frac{1}{s \mp \, i\omega} \qquad \omega \in \mathbb{R}, \qquad Re(s) > 0.$$

Sfruttando la formula di Eulero e la linearità della trasformata otteniamo

$$\mathcal{L}[sen(\omega t)](s) = \frac{1}{2i}\left[\frac{1}{s - i\omega} - \frac{1}{s + i\omega}\right] = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \qquad Re(s) > 0$$

$$\mathcal{L}[cos(\omega t)](s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \qquad Re(s) > 0,$$

e dunque in particolare

$$\mathcal{L}[sen\, t](s) = \frac{1}{s^2 + 1} \qquad \mathcal{L}[cos\, t](s) = \frac{s}{s^2 + 1} \qquad Re(s) > 0.$$

Trasformata di seno iperbolico e coseno iperbolico

Ancora dall'esempio 2 troviamo

$$\mathcal{L}[e^{\omega t}](s) = \frac{1}{s-\omega} \qquad \omega \in \mathbb{R}, \qquad Re(s) > \omega,$$
$$\mathcal{L}[e^{-\omega t}](s) = \frac{1}{s+\omega} \qquad \omega \in \mathbb{R}, \qquad Re(s) > -\omega.$$

Per $Re(s) > |\omega|$ valgono entrambi i risultati, quindi da

$$senh(\omega t) = \frac{e^{\omega t} - e^{-\omega t}}{2} \qquad cosh(\omega t) = \frac{e^{\omega t} + e^{-\omega t}}{2}$$

segue che

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[senh(\omega t)](s) &= \frac{1}{2}\left[\frac{1}{s-\omega} - \frac{1}{s+\omega}\right] = \frac{\omega}{s^2-\omega^2} \\ \mathcal{L}[cosh(\omega t)](s) &= \frac{s}{s^2-\omega^2}, \end{aligned}$$

e dunque in particolare

$$\mathcal{L}[senh(t)](s) = \frac{1}{s^2-1} \qquad \mathcal{L}[cosh(t)](s) = \frac{s}{s^2-1}, \qquad Re(s) > 1.$$

Limitatezza

Proposizione

Sia f una funzione $\mathcal{L}$-trasformabile con ascissa di convergenza $\sigma[f]$;

allora per ogni $\sigma_0 > \sigma[f]$ la funzione $F(s) = \mathcal{L}[f](s)$ è limitata nel semipiano chiuso $Re(s) \geq \sigma_0$

e inoltre

$$\lim_{Re(s) \to +\infty} F(s) = 0.$$

L'ultima affermazione significa che se $\{s_n\}$ è una successione di punti per cui $\sigma_0 \leq \sigma_n := Re(s_n) \longrightarrow +\infty$, allora

$$\lim_{n \to +\infty} F(s_n) = 0.$$

Derivata della trasformata di Laplace

Proposizione

Sia f una funzione $\mathcal{L}$-trasformabile con ascissa di convergenza $\sigma[f]$;

allora la funzione $F(s) = \mathcal{L}[f](s)$ è olomorfa nel semipiano $Re(s) > \sigma[f]$.

La funzione $t \longrightarrow -tf(t)$ è $\mathcal{L}$-trasformabile con ascissa di convergenza $\sigma[f]$

e abbiamo

$$F'(s) = \mathcal{L}[-tf(t)](s),$$

dove con $F'(s)$ si intende la derivata in campo complesso.

In generale si ha

$$F^{(n)}(s) = \mathcal{L}[(-t)^n f(t)](s) = (-1)^n \mathcal{L}[t^n f(t)] \qquad Re(s) > \sigma[f] \,.$$

Moltiplicazione per t alla n-esima potenza

$$\mathcal{L}[t^n f(t)](s) = (-1)^n F^{(n)}(s).$$

Segnali

La definizione di trasformata coinvolge solo i valori di $f(t)$ per $t \geq 0$.

Se $f(t)$ è definita su $\mathbb{R}$ denotiamo

$$f_+(t) = \begin{cases} f(t) & t \geq 0 \\ 0 & \text{altrimenti,} \end{cases}$$

cioè $f_+(t) = H(t)\,f(t)$.

Ne segue che $\mathcal{L}[f](s) = \mathcal{L}[f_+](s)$.

Definizione
Una funzione nulla per $t < 0$ e $\mathcal{L}$-trasformabile viene chiamata **segnale**.

Trasformata della potenza

Consideriamo la funzione $t \longrightarrow t_+^n$, con $n \in \mathbb{N}$.

Per $n = 0$ abbiamo $t^0 = 1$ e dunque la funzione t_+^0 coincide con $H(t)$.

La sua trasformata di Laplace è allora

$$\mathcal{L}[t_+^0](s) = \frac{1}{s} \qquad Re(s) > 0.$$

Trasformata della potenza

Per $n > 0$ riusciamo a scrivere la seguente formula ricorsiva

$$\mathcal{L}[t_+^n](s) = \int_0^{+\infty} e^{-st}\, t^n\, dt = \left[\frac{-e^{-st}}{s}\, t^n\right]_{t=0}^{t=+\infty} + n \int_0^{+\infty} \frac{e^{-st}}{s}\, t^{n-1}\, dt = \frac{n}{s}\,\mathcal{L}[t_+^{n-1}](s).$$

Abbiamo quindi

$$\mathcal{L}[t_+](s) = \frac{1}{s^2} \qquad \mathcal{L}[t_+^2](s) = \frac{2}{s^3}$$

e in generale

$$\mathcal{L}[t_+^n](s) = \frac{n!}{s^{n+1}} \qquad Re(s) > 0.$$

Appello del 21 settembre 2011

(i) Si dia la definizione di trasformata di Laplace di un segnale $f(t)$.

(ii) Si stabilisca se le seguenti funzioni sono trasformate di Laplace di un segnale

$$F(s) = s^{12}, \qquad F(s) = \frac{1}{s^{12}}.$$

Soluzione:

(ii) La funzione $F(s) = s^{12}$ non può essere la trasformata di Laplace di un segnale per il fatto che essa non è limitata in alcun semipiano destro.

Al contrario, la funzione $F(s) = \frac{1}{s^{12}}$ è la trasformata di Laplace del segnale

$$f(t) = \frac{1}{(11)!} t^{11}.$$

Proprietà

Riportiamo ora alcune proprietà (di facile verifica) della trasformata di Laplace nel caso in cui f sia un segnale.

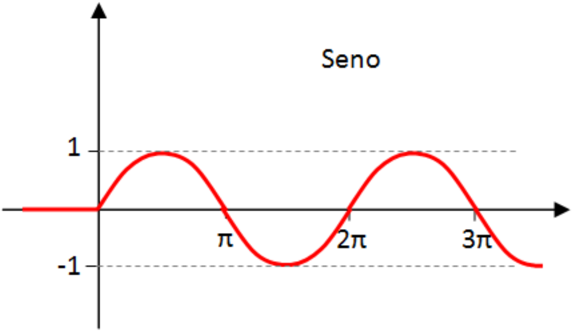
- $\mathcal{L}[f(ct)](s) = \frac{1}{c}\mathcal{L}[f(t)]\left(\frac{s}{c}\right) \qquad \forall c > 0 : \ Re(s) > c\sigma[f];$

- $\mathcal{L}[f(t - t_0)](s) = e^{-t_0 s}\mathcal{L}[f(t)](s) \qquad \forall t_0 > 0 : \ Re(s) > \sigma[f]$
  (Traslazione nel tempo);

- $\mathcal{L}[e^{at} f(t)](s) = \mathcal{L}[f(t)](s - a) \qquad \forall a \in \mathbb{C} : \ Re(s) > \sigma[f] + Re(a)$
  (Traslazione complessa).

Esempio: il segnale seno

Segnale $f(t) = sen_+ t$:



$$\mathcal{L}[sen_+(t)] = \frac{1}{s^2+1}.$$

Esempio: il segnale seno

Usando la formula

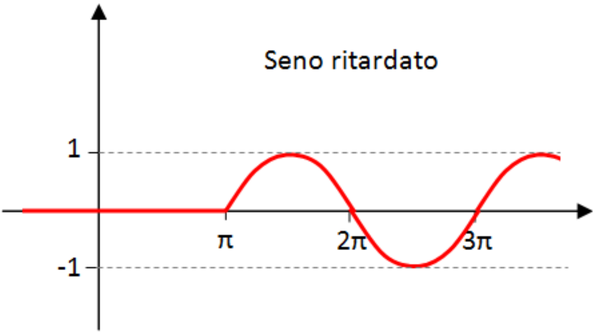
$$\mathcal{L}[f(ct)](s) = \frac{1}{c}\mathcal{L}[f(t)]\left(\frac{s}{c}\right) \qquad \forall c > 0 : \ Re(s) > c\sigma[f],$$

calcoliamo

$$\mathcal{L}[sen_+(\omega t)](s) = \frac{1}{\omega}\ \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega}\right)^2 + 1} = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}.$$

Esempio: il seno ritardato

Segnale ritardato $f(t) = sen_+(t - \pi)$:



$$\mathcal{L}[f(t - t_0)](s) = e^{-t_0 s}\mathcal{L}[f(t)](s) \qquad \forall t_0 > 0: \ Re(s) > \sigma[f]$$

$$\mathcal{L}[sen_+(t - \pi)] = e^{-\pi\, s}\,\frac{1}{s^2 + 1}.$$

Appello del 19 Novembre 2013

(i) Si dia la definizione di trasformata di Laplace di un segnale $f(t)$.

(ii) Si calcolino le trasformate delle seguenti funzioni

$$f(t) = (t-2)^n\,,\ \ n \in \mathbb{N}\,,$$

$$g(t) = \sin(t-\pi)\,,$$

$$h(t) = e^{2t}\cos\, t\,.$$

Soluzione: (ii) Richiamando che

$$\mathcal{L}[f(t-t_0)](s) = e^{-t_0 s}\mathcal{L}[f(t)](s) \qquad \forall t_0 > 0, \forall s \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(s) > \sigma[f]$$

si ha che

$$\forall n \in \mathbb{N} \qquad \mathcal{L}[(t-2)^n](s) = e^{-2s}\frac{n!}{s^{n+1}}, \quad \forall s \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(s) > 0$$

e

$$\mathcal{L}[\sin(t-\pi)](s) = e^{-\pi s}\frac{1}{s^2+1}, \quad \forall s \in \mathbb{C} : \mathrm{Re}(s) > 0\,.$$

Richiamando che

$$\mathcal{L}[e^{at}f(t)](s) = \mathcal{L}[f(t)](s-a) \qquad \forall a \in \mathbb{C}\,, \quad \forall s \in \mathbb{C} :\ \mathrm{Re}(s) > \sigma[f] + \mathrm{Re}(a)$$

si ha che

$$\mathcal{L}[e^{2t}\cos\, t](s) = \mathcal{L}[\cos\, t](s-2) = \frac{s-2}{(s-2)^2+1} \qquad \forall s \in \mathbb{C} :\ \mathrm{Re}(s) > 2\,.$$

Appello del 17 Gennaio 2014

Domanda a risposta multipla

La trasformata di Laplace di

$$f(t) = \cos_+(t - \pi)$$

è la funzione

a) $F(s) = \frac{e^{-\pi s}}{s^2+1}$ b) $F(s) = \frac{e^{-\pi s}s}{s^2+1}$

c) $F(s) = \frac{e^{-\pi s}s}{s^2+\pi}$ d) $F(s) = \frac{e^{-\pi s}}{s^2+\pi}$.

Soluzione: b)

La trasformata di un segnale periodico

Si può dimostrare la seguente proposizione in cui si dà una formula per calcolare la trasformata di un segnale periodico.

Proposizione

Sia f un segnale periodico per $t \geq 0$ di periodo T, cioè $f(t+T) = f(t) \quad \forall t \geq 0$.

Se f è sommabile in $[0, T]$,

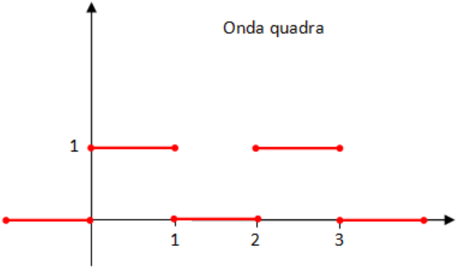
allora

$$\mathcal{L}[f](s) = \frac{1}{1 - e^{-Ts}} \int_0^T e^{-st} f(t)\, dt \qquad Re(s) > 0.$$

Esempio: l'onda quadra

Consideriamo l'onda quadra:

$$f(t) = \begin{cases} 1 & 2n \le t \le 2n+1, \quad n \ge 0 \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



È un segnale periodico per $t \ge 0$ di periodo 2.

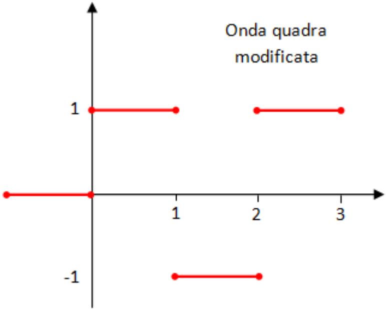
Esempio: l'onda quadra

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}[f(t)](s) &= \frac{1}{1-e^{-2s}} \int_0^1 e^{-st}\,dt = \frac{1}{1-e^{-2s}}\,\frac{1-e^{-s}}{s} = \\
&= \frac{1}{s}\,\frac{1}{1+e^{-s}} \qquad\qquad Re(s) > 0.
\end{aligned}
$$

Esempio: l'onda quadra modificata

Consideriamo l'onda quadra modificata:

$$f(t) = \begin{cases} 1 & 2n \leq t \leq 2n+1, \quad n \geq 0 \\ -1 & 2n+1 < t < 2n+2, \quad n \geq 0 \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



Esempio: l'onda quadra modificata

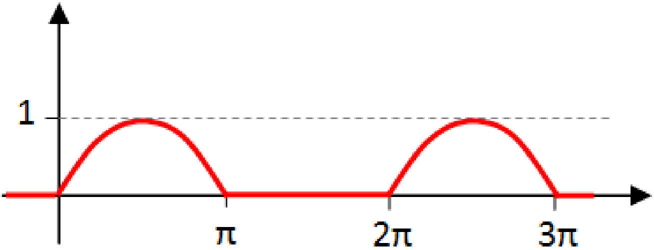
Allora si ottiene

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}[f(t)](s) &= \frac{1}{1-e^{-2s}} \int_0^2 e^{-st} f(t)dt = \frac{1}{1-e^{-2s}} \Big(\int_0^1 e^{-st}dt - \int_1^2 e^{-st}dt \Big) = \\
&= \frac{1}{1-e^{-2s}} \Big(\Big[\frac{e^{-st}}{-s} \Big]_{t=0}^{t=1} - \Big[\frac{e^{-st}}{-s} \Big]_{t=1}^{t=2} \Big) = \\
&= \frac{1}{1-e^{-2s}} \Big(\frac{1}{s}(-e^{-s}+1) + \frac{1}{s}(e^{-2s}-e^{-s}) \Big) = \\
&= \frac{1}{1-e^{-2s}} \frac{1}{s}(e^{-2s}-2e^{-s}+1) = \\
&= \frac{1}{1-e^{-2s}} \frac{1}{s}(1-e^{-s})^2 = \frac{1-e^{-s}}{s(1+e^{-s})}.
\end{aligned}
$$

Esempio

Consideriamo ora il segnale 2π-periodico definito da

$$f(t) = \begin{cases} sen\, t & 2k\pi \leq t \leq (2k+1)\pi, \quad k \geq 0 \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



Esempio:

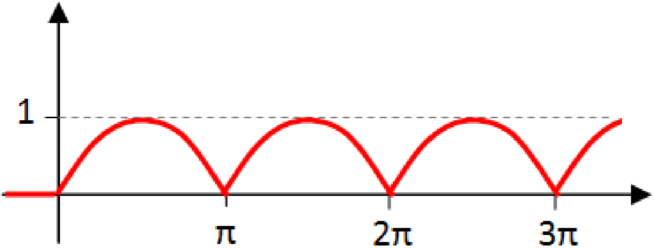
Si ottiene

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[f](s) &= \frac{1}{1-e^{-2\pi s}} \int_0^{\pi} e^{-st} sen\, t\, dt = \frac{1}{1-e^{-2\pi s}} \frac{1+e^{-\pi s}}{s^2+1} = \\ &= \frac{1}{1-e^{-\pi s}} \frac{1}{s^2+1}.\end{aligned}$$

Nel calcolo abbiamo sfruttato il risultato precedente relativo a $\mathcal{L}[sen_+ t + sen_+(t-\pi)](s)$.

Esempio

Consideriamo il segnale π-periodico definito da $f(t) = |sen\, t|_+$.



Per esso si trova

$$\mathcal{L}[|sen|_+](s) = \frac{1}{1-e^{-\pi s}} \int_0^\pi e^{-st} sen\, t\, dt = \frac{1}{1-e^{-\pi s}} \frac{1+e^{-\pi s}}{s^2+1}.$$

$\mathbf{f(t)}$	$\mathcal{L}[\mathbf{f}](\mathbf{s})$	$\sigma(\mathbf{f})$
1	$\frac{1}{s}$	0
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$	$\mathrm{Re}(a)$
$\sin\omega t,\ \omega > 0$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	0
$\cos\omega t,\ \omega > 0$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	0
$e^{at}\sin\omega t,\ \omega > 0$	$\frac{\omega}{(s-a)^2+\omega^2}$	$\mathrm{Re}(a)$
$e^{at}\cos\omega t,\ \omega > 0$	$\frac{s-a}{(s-a)^2+\omega^2}$	$\mathrm{Re}(a)$

$\sinh \omega t,\ \omega > 0$	$\frac{\omega}{s^2-\omega^2}$	ω
$\cosh \omega t,\ \omega > 0$	$\frac{s}{s^2-\omega^2}$	ω
$t^n,\ n \in \mathbb{N}$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$	0
$e^{at} t^n,\ n \in \mathbb{N}$	$\frac{n!}{(s-a)^{n+1}}$	$\mathrm{Re}(a)$

La trasformata della derivata

Studiamo il legame tra la trasformata di un segnale e la trasformata della sua derivata prima.

Teorema

Sia f un segnale continuo per $t \geq 0$,

derivabile con derivata prima continua a tratti e Laplace-trasformabile.

Allora si ha che $\forall s$ con $Re(s) > \max\{\sigma[f], \sigma[f']\}$

$$\mathcal{L}[f'](s) = s\,\mathcal{L}[f](s) - f(0).$$

La trasformata gode di numerose proprietà, che la rendono utile in molti contesti. L'aspetto più vantaggioso è che la derivata di una funzione diventa una moltiplicazione per la variabile complessa.

La trasformata della derivata

Si può iterare il ragionamento:
se f è di classe C^1 e la sua derivata prima verifica le ipotesi del teorema precedente,
possiamo calcolare la trasformata di Laplace di f''.
Si trova

$$\mathcal{L}[f''](s) = s\,\mathcal{L}[f'](s) - f'(0) = s\,[s\,\mathcal{L}[f](s) - f(0)] - f'(0) =$$

$$= s^2\,\mathcal{L}[f](s) - sf(0) - f'(0).$$

In generale, se f è una funzione di classe C^{n-1} e la derivata di ordine $(n-1)$ verifica le ipotesi del teorema precedente, si trova

$$\mathcal{L}[f^{(n)}](s) = s^n\,\mathcal{L}[f](s) - \left(s^{n-1}\,f(0) + s^{n-2}f'(0) + \cdots + f^{(n-1)}(0)\right).$$

La derivata di ordine n di una funzione diventa un polinomio nella variabile complessa.

Esempio

Consideriamo il seguente problema di Cauchy:

$$\begin{cases} y'' + y = 0 \\ y(0) = 0 \\ y'(0) = 1\,. \end{cases}$$

Applichiamo la trasformata di Laplace ai due membri dell'equazione differenziale precedente;
posto $Y(s) = \mathcal{L}[y](s)$ troviamo

$$\mathcal{L}[y'' + y](s) = s^2\, Y(s) - s\, y(0) - y'(0) + Y(s) = Y(s)\,(s^2 + 1) - 1 = 0,$$

(un problema differenziale diventa un problema algebrico)
da cui

$$Y(s) = \frac{1}{s^2 + 1}$$

che riconosciamo essere la trasformata di Laplace della funzione $y(t) = sen\, t$.

Prodotto di convoluzione

Siano f e g due funzioni sommabili su $\mathbb{R}$; si definisce il prodotto di convoluzione di f e g tramite la formula

$$(f * g)(x) := \int_{\mathbb{R}} f(t)\, g(x-t)\, dt.$$

Se f e g sono due segnali si ha

$$(f * g)(x) = \begin{cases} \displaystyle\int_0^x f(t)\, g(x-t)\, dt & x > 0 \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Si hanno le seguenti proprietà :

1. $(f * g)(x) = (g * f)(x)$ commutativa;
2. $((f * g) * h)(x) = (f * (g * h))(x)$ associativa
3. $(f * (g + h))(x) = (f * g)(x) + (f * h)(x)$ distributiva.

Prodotto di convoluzione

Teorema

Se f e g sono due segnali $\mathcal{L}$-trasformabili con ascisse di convergenza $\sigma[f]$ e $\sigma[g]$ rispettivamente,

allora $(f * g)$ è $\mathcal{L}$-trasformabile nel semipiano $Re(s) > max\{\sigma[f], \sigma[g]\}$,

e si ha

$$\mathcal{L}[f * g](s) = \mathcal{L}[f](s) \cdot \mathcal{L}[g](s).$$

Prodotto di convoluzione

Osservazione:
Si tratta di una trasformata integrale che gode di numerose proprietà, che la rendono utile in molti contesti. L'aspetto più vantaggioso è che l'integrale e la derivata di una funzione diventano rispettivamente una divisione (lo vedremo alla prossima slide) e una moltiplicazione per la variabile complessa.
Essa consente di trasformare le equazioni integrali e le equazioni differenziali in equazioni polinomiali, che sono più immediate da risolvere.
Inoltre nello spazio di Laplace la convoluzione diventa una moltiplicazione.

Esempio

Sia f un segnale $\mathcal{L}$-trasformabile con ascissa di convergenza $\sigma[f]$ e trasformata $F(s)$. Calcoliamone la convoluzione con la funzione di Heaviside.

$$(f * H)(t) = (H * f)(t) = \int_0^t f(\tau)\, d\tau \qquad t > 0.$$

Si ottiene dunque la primitiva di f nulla nell'origine.
Per la trasformata di Laplace si trova

$$\mathcal{L}[H * f](s) = \mathcal{L}[H](s)\mathcal{L}[f](s) = \frac{F(s)}{s}, \qquad Re(s) > max\left\{0, \sigma[f]\right\}.$$

Quindi la primitiva nulla nell'origine ha come trasformata la trasformata di f divisa per s

$$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(\tau)\, d\tau\right](s) = \frac{\mathcal{L}[f](s)}{s}.$$

Quindi l'integrale e la derivata di una funzione diventano rispettivamente una divisione e una moltiplicazione per la variabile complessa.

Inversione della trasformata di Laplace

Studiamo una formula di inversione (detta di Riemann-Fourier), cioè uno strumento analitico per riottenere il segnale f a partire dalla sua trasformata F. Sia $F(s)$ una funzione razionale fratta tale che il grado del numeratore sia minore di quello del denominatore (ci si può sempre ricondurre a ciò).

Esempio

Consideriamo $F(s) = \dfrac{s}{s^2+1}$ che sappiamo essere la trasformata di $cos\, t$.
Possiamo scrivere

$$F(s) = \frac{s}{s^2+1} = \frac{1}{s} + \left(\frac{s}{s^2+1} - \frac{1}{s}\right) = \frac{1}{s} + \left(\frac{s^2 - s^2 - 1}{s(s^2+1)}\right) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s(s^2+1)}.$$

Il primo addendo è la trasformata di $H(t)$.

Il secondo è la trasformata di

$$(sen\, t * \ H(t)) = \int_0^{+\infty} sen\, \tau \, H(t-\tau)\, d\tau = \int_0^t sen\, \tau d\tau = 1 - cos\, t \qquad t \geq 0.$$

Dunque sommando si ottiene $cos\, t$.

Esempio di antitrasformata

Consideriamo $F(s) = \dfrac{s}{(s-1)^2}$ e determiniamo il segnale di cui è la trasformata.

Per determinarlo applichiamo la decomposizione in fratti semplici:

$$F(s) = \frac{s}{(s-1)^2} = \frac{a}{(s-1)} + \frac{b}{(s-1)^2}, \qquad \text{con } a, b \in \mathbb{R}.$$

Svolgendo i conti si trova $a = 1$, $b = 1$ e dunque

$$F(s) = \frac{1}{s-1} + \frac{1}{(s-1)^2}.$$

Allora si ottiene facilmente che il segnale è $f(t) = e^t + te^t$.

Appello del 30 maggio 2012

(i) Si discuta l'esistenza o meno dell'antitrasformata delle seguenti funzioni:

$$F_1(s) = \frac{1}{s-4}\,, \qquad F_2(s) = \frac{1}{\sin(s-4)}\,, \qquad F_3(s) = \frac{1}{(s-4)^2}\,,$$

$$F_4(s) = \frac{e^{-2s}}{s-4}\,, \qquad F_5(s) = \frac{\sin(s-4)}{s-4}\,, \qquad F_6(s) = \frac{1}{s^2-4}\,.$$

(ii) Si calcoli l'antitrasformata laddove essa esiste e negli altri casi si motivi la non esistenza dell'antitrasformata usando le condizioni necessarie.

Appello del 30 maggio 2012

Soluzione: L'antitrasformata di

$$F_1(s) = \frac{1}{s-4}$$

è

$$f_1(t) = e^{4t};$$

l'antitrasformata di

$$F_2(s) = \frac{1}{\sin(s-4)}$$

non esiste in quanto questa funzione non è olomorfa su alcun semipiano destro, a causa degli infiniti punti in cui si annulla il denominatore;
l'antitrasformata di

$$F_3(s) = \frac{1}{(s-4)^2}$$

è

$$f_3(t) = te^{4t};$$

Appello del 30 maggio 2012

l'antitrasformata di

$$F_4(s) = \frac{e^{-2s}}{s-4}$$

è

$$f_4(t) = e^{4(t-2)};$$

l'antitrasformata di

$$F_5(s) = \frac{\sin(s-4)}{s-4}$$

non esiste in quanto questa funzione non è limitata su alcun semipiano destro;
l'antitrasformata di

$$F_6(s) = \frac{1}{s^2-4}$$

è

$$f_6(t) = \frac{1}{2}\sinh(2t)\,.$$

Appello del 26 giugno 2013

Domanda a risposta multipla

L'antitrasformata di Laplace della funzione

$$F(s) = e^{-3s}\frac{s}{s^2-3}$$

è

a) $f(t) = \cosh(\sqrt{3}(t-3))$
b) $f(t) = \cosh(\sqrt{3}t-3)$
c) $f(t) = \cosh(t-\sqrt{3})$
d) $f(t) = \cosh(3t-\sqrt{3})$.

Soluzione: a)

Da Casalvieri-De Cicco

Si calcoli l'antitrasformata $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)](t)$ delle seguenti funzioni:

$$\text{(a)} \quad F(s) = \frac{se^{-3s}}{s^2-3}$$

$$\text{(b)} \quad F(s) = \frac{s}{4s^2+5}$$

Da Casalvieri-De Cicco

Soluzioni

(a Utilizzando la formula della traslazione con $t_0 = 3$ si ricava che

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{se^{-3s}}{s^2-3}\right](t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2-3}\right](t-3).$$

Si ha che

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2-3}\right](t) = \cosh\left(\sqrt{3}t\right)$$

e quindi

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{se^{-3s}}{s^2-3}\right](t) = \cosh\left[\sqrt{3}(t-3)\right].$$

Da Casalvieri-De Cicco

(b) Raccogliendo il fattore 4 a denominatore si può scrivere

$$F(s) = \frac{1}{4} \cdot \frac{s}{s^2 + \frac{5}{4}}.$$

Utilizzando la proprietà di linearità si ricava che

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{4}\frac{s}{s^2 + \frac{5}{4}}\right](t) = \frac{1}{4}\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2 + \frac{5}{4}}\right](t) = \frac{1}{4}\cos\left(\frac{\sqrt{5}}{2}t\right).$$

Inversione della trasformata di Laplace

La funzione $f(t)$ è data dalla formula di inversione

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)](t) = \sum_{j=1}^{n} res(e^{st}\,F(s), s_j),$$

dove gli s_j sono i punti singolari della funzione $e^{st}\,F(s)$.

Questa formula è dovuta essenzialmente al teorema dei residui e viene utilizzata negli esercizi per ricostruire il segnale.

Da Casalvieri-De Cicco

Si calcoli l'antitrasformata $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)](t)$ della seguente funzione:

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2(s+2)}\right](t).$$

Da Casalvieri-De Cicco

Soluzione:
Utilizzando il metodo dei residui, si ottiene per il polo semplice $s = -2$

$$res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+2)}, -2\right) = \lim_{s\to -2} \frac{e^{st}}{s^2(s+2)}(s+2) = \frac{1}{4}e^{-2t}$$

mentre, per il polo doppio $s = 0$

$$res\left(\frac{s^{st}}{s^2(s+2)}, 0\right) = \lim_{s\to 0} \frac{d}{ds}\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+2)}s^2\right)$$

$$= \lim_{s\to 0} \frac{d}{ds}\left(\frac{e^{st}}{s+2}\right) = \lim_{s\to 0} \frac{te^{st}(s+2) - e^{st}}{(s+2)^2} = \frac{1}{2}t - \frac{1}{4}.$$

Pertanto

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2(s+2)}\right](t) = res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+2)}, -2\right)$$

$$+res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+2)}, 0\right) = \frac{1}{4}e^{-2t} + \frac{1}{2}t - \frac{1}{4}.$$

Calcolo di trasformate e antitrasformate

Si calcoli la trasformata di Laplace dei seguenti segnali.

$$(a) \quad f(t) = (t-2)^n, \quad n \in \mathbb{N}, \qquad t \geq 2$$

$$(b) \quad f(t) = \sin(t-\pi), \qquad t \geq \pi$$

$$(c) \quad f(t) = e^{2t}\left(\cos t - \sinh(t-1)\right), \qquad t \geq 1$$

$$(d) \quad f(t) = t^2 \cosh t, \qquad t \geq 0$$

$$(e) \quad f(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } 2k\pi \leq t \leq (2k+1)\pi \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \qquad t \geq 0$$

Soluzioni

(a) Utilizzando la proprietà sulla traslazione temporale con $t_0 = 2$ si ottiene

$$\mathcal{L}\left[(t-2)^n\right](s) = e^{-2s}\mathcal{L}\left[t^n\right](s).$$

L'ultima trasformata è elementare e ricavabile dalla tabella:

$$\mathcal{L}\left[t^n\right](s) = \frac{n!}{s^{n+1}}.$$

Pertanto

$$\mathcal{L}\left[(t-2)^n\right](s) = \frac{n!}{s^{n+1}}e^{-2s} \qquad \mathrm{Re}\, s > 0.$$

(b) Utilizzando la proprietà sulla traslazione temporale con $t_0 = \pi$ si ottiene

$$\mathcal{L}\left[\sin(t-\pi)\right](s) = e^{-\pi s}\mathcal{L}\left[\sin t\right].$$

L'ultima trasformata è elementare e ricavabile dalla tabella :

$$\mathcal{L}[\sin t](s) = \frac{1}{s^2+1}.$$

Pertanto

$$\mathcal{L}[\sin(t-\pi)](s) = \frac{e^{-\pi s}}{s^2+1} \qquad \mathrm{Re}\, s > 0.$$

(c) Utilizzando la linearità della trasformata di Laplace si ha che

$$\mathcal{L}\left[e^{2t}\left(\cos t - \sinh(t-1)\right)\right](s) = \mathcal{L}\left[e^{2t}\cos t\right] - \mathcal{L}\left[e^{2t}\sinh(t-1)\right].$$

La prima trasformata è calcolabile utilizzando la proprietà sulla traslazione complessa con $a = 2$ e la tabella:

$$\mathcal{L}\left[e^{2t}\cos t\right](s) = \mathcal{L}[\cos t](s-2) = \frac{s-2}{(s-2)^2+1}$$

$$\mathrm{Re}\, s > \sigma[cos] + \mathrm{Re}\, a = 0 + 2 = 2.$$

Per quanto riguarda il secondo termine si osservi che, moltiplicando e dividendo per il numero e^2, si ottiene

$$\mathcal{L}\left[e^{2t}\sinh(t-1)\right] = e^2\mathcal{L}\left[e^{2(t-1)}\sinh(t-1)\right]$$

in modo da poter applicare la proprietà della traslazione temporale con $t_0 = 1$ ottenendo

$$e^2\mathcal{L}\left[e^{2(t-1)}\sinh(t-1)\right](s) = e^{2-s}\mathcal{L}\left[e^{2t}\sinh t\right](s).$$

(c) Sfruttando infine la proprietà sulla traslazione complessa con $a = 2$ e la tabella si ricava che

$$e^{2-s}\mathcal{L}\left[e^{2t}\sinh t\right](s) = e^{2-s}\mathcal{L}\left[\sinh t\right](s-2) = \frac{e^{2-s}}{(s-2)^2-1}$$

$$\mathrm{Re}\, s > \sigma[\sinh] + \mathrm{Re}\, a = 1 + 2 = 3.$$

In definitiva

$$\mathcal{L}\left[e^{2t}\left(\cos t - \sinh(t-1)\right)\right] = \frac{s-2}{(s-2)^2+1} - \frac{e^{-(s-2)}}{(s-2)^2-1}$$

con ascissa di convergenza

$$\sigma(f) = \max\{2, 3\} = 3.$$

(d) Utilizzando la definizione di coseno iperbolico e la proprietà di linearità si ha che

$$\mathcal{L}\left[t^2 \cosh t\right](s) = \frac{1}{2}\mathcal{L}\left[t^2 e^t\right] + \frac{1}{2}\mathcal{L}\left[t^2 e^{-t}\right].$$

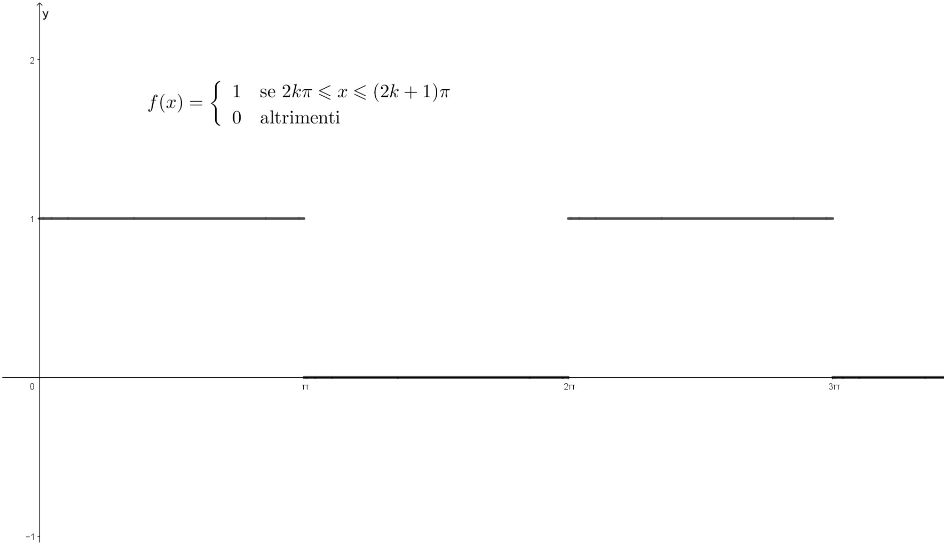
Le due trasformate di Laplace sono elementari, entrambe ricavabili dalla tabella, ottenendo

$$\mathcal{L}\left[t^2 \cosh t\right] = \frac{1}{2}\frac{2!}{(s-1)^3} + \frac{1}{2}\frac{2!}{(s+1)^3} = \frac{1}{(s-1)^3} + \frac{1}{(s+1)^3}$$

con ascissa di convergenza

$$\sigma(f) = \max\{-1, 1\} = 1.$$

(e) Il segnale ha l'andamento riportato in figura.



$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } 2k\pi \leqslant x \leqslant (2k+1)\pi \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Figure: Esercizio (e)

Esso è un segnale periodico, di periodo 2π. Utilizzando quindi la formula del segnale periodico con $T = 2\pi$ si ottiene

$$
\begin{aligned}
L[f](s) &= \frac{1}{1-e^{-2\pi s}} \int_0^{2\pi} e^{-st} f(t)dt = \frac{1}{1-e^{-2\pi s}} \int_0^{\pi} e^{-st} dt \\
&= \frac{1}{1-e^{-2\pi s}} \left(-\frac{1}{s} e^{-st} \right)\Bigg|_0^{\pi} = \frac{1-e^{-\pi s}}{s\left(1-e^{-2\pi s}\right)} \\
&= \frac{1-e^{-\pi s}}{s\left(1-e^{-\pi s}\right)\left(1+e^{-\pi s}\right)} = \frac{1}{s\left(1+e^{-\pi s}\right)}.
\end{aligned}
$$

Si calcoli l'antitrasformata $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)](t)$ delle seguenti funzioni.

(a) $F(s) = \frac{se^{-3s}}{s^2-3}$

(b) $F(s) = \frac{s}{4s^2+5}$

(c) $F(s) = \frac{3}{s^2+3} + \frac{\sqrt{3}}{s}$

(d) $F(s) = \frac{1}{s^2(s+1)}$

(e) $F(s) = \frac{s-2}{(s-2)^2-3}$

Soluzioni
(a) Utilizzando la proprietà della traslazione temporale con $t_0 = 3$ si ricava che

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{se^{-3s}}{s^2-3}\right](t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2-3}\right](t-3).$$

Dalla tabella risulta che

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2-3}\right](t) = \cosh\left(\sqrt{3}t\right)$$

e quindi

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{se^{-3s}}{s^2-3}\right](t) = \cosh\left[\sqrt{3}(t-3)\right].$$

(b) 1^o modo: raccogliendo il fattore 4 a denominatore si può scrivere

$$F(s) = \frac{1}{4} \cdot \frac{s}{s^2 + \frac{5}{4}}.$$

Utilizzando la proprietà di linearità e la tabella si ricava che

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{4}\frac{s}{s^2+\frac{5}{4}}\right](t) = \frac{1}{4}\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2+\frac{5}{4}}\right](t) = \frac{1}{4}\cos\left(\frac{\sqrt{5}}{2}t\right).$$

2^o modo: si osservi che

$$F(s) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2s}{(2s)^2+5} = \frac{1}{2}F(2s) = \frac{1}{2}F\left(\frac{s}{1/2}\right).$$

Utilizzando la proprietà vista prima con $c = \frac{1}{2}$ si ottiene che

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{(2s)^2+5}\right](t) = \frac{1}{2}\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{(2s)^2+5}\right](t) = \frac{1}{4}f\left(\frac{t}{2}\right)$$

essendo $f\left(\frac{t}{2}\right)$ la antitrasformata di $\frac{s}{s^2+5}$. Dalla tabella si ricava quindi che

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{2s}{(2s)^2+5}\right](t) = \frac{1}{4}\cos\left(\sqrt{5}\frac{t}{2}\right).$$

(c) Utilizzando la linearità e la tabella si ha che

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)](t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{3}{s^2+3}\right](t) + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\sqrt{3}}{s}\right](t)$$

$$= \sqrt{3}\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{\sqrt{3}}{s^2+3}\right](t) + \sqrt{3}\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s}\right](t)$$

$$= \sqrt{3}\sin(\sqrt{3}t) + \sqrt{3} = \sqrt{3}\left(\sin(\sqrt{3}t) + 1\right).$$

(d) 1^o modo: scomponendo $F(s)$ in fratti semplici si ottiene che

$$\frac{1}{s^2(s+1)} = \frac{A}{s+1} + \frac{B}{s} + \frac{C}{s^2} = \frac{As^2 + Bs^2 + Bs + Cs + C}{s^2(s+1)}$$

e quindi i coefficienti devono soddisfare il seguente sistema

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ B + C = 0 \\ C = 1 \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} A = 1 \\ B = -1 \\ C = 1. \end{cases}$$

Si ha pertanto che

$$\frac{1}{s^2(s+1)} = \frac{1}{s+1} - \frac{1}{s} + \frac{1}{s^2}.$$

Per la proprietà di linearità ed utilizzando la tabella si ottiene

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2(s+1)}\right](t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+1}\right](t) - \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s}\right](t) + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2}\right](t)$$
$$= e^{-t} - 1 + t.$$

2^o modo: $F(s)$ ha un polo singolo in $s=-1$ ed un polo doppio in $s=0$. Utilizzando la formula d'inversione, si ha allora che

$$f(t) = res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+1)}, -1\right) + res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+1)}, 0\right).$$

Poiché

$$res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+1)}, -1\right) = \lim_{s\to -1} \frac{e^{st}}{s^2(s+1)}(s+1) = e^{-t}$$

ed inoltre

$$res\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+1)}, 0\right) = \lim_{s\to 0} \frac{d}{ds}\left(\frac{e^{st}}{s^2(s+1)}s^2\right) = \lim_{s\to 0} \frac{d}{ds}\left(\frac{e^{st}}{s+1}\right)$$

$$= \lim_{s\to 0} \frac{te^{st}(s+1) - e^{st}}{(s+1)^2} = t-1,$$

segue che

$$f(t) = e^{-t} + t - 1$$

3^o modo: la funzione $F(s)$ può essere vista come il prodotto di due funzioni

$$F(s) = \frac{1}{s^2} \cdot \frac{1}{s+1} := F_1(s)F_2(s)$$

con $F_1(s) = \frac{1}{s}$ ed $F_2(s) = \frac{1}{s+1}$. Utilizzando la proprietà della convoluzione si può allora scrivere che

$$\begin{aligned}&\mathcal{L}^{-1}\left[F_1(s)F_2(s)\right](t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\mathcal{L}[f_1(t)](s) \cdot \mathcal{L}[f_2(t)](s)\right]\\&= \mathcal{L}^{-1}\left[\mathcal{L}[f_1 * f_2](s)\right](t) = (f_1 * f_2)(t)\end{aligned}$$

dove $f_1(t)$ ed $f_2(t)$ sono rispettivamente le antitrasformate di $F_1(s)$ e di $F_2(s)$. Esse sono immediate da calcolare mediante la tabella :

$$f_1(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2}\right](t) = t$$

$$f_2(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+1}\right](t) = e^{-t}$$

e quindi la antitrasformata richiesta è il prodotto di convoluzione di $f_1(t)$ con $f_2(t)$:

$$\begin{aligned}&f(t) = (f_1 * f_2)(t) = \int_0^t \tau e^{-(t-\tau)} d\tau = \tau e^{-(t-\tau)}\Big|_{\tau=0}^{\tau=t} - \int_0^t e^{-(t-\tau)} d\tau\\&= t - e^{-(t-\tau)}\Big|_{\tau=0}^{\tau=t} = t - 1 + e^{-t}.\end{aligned}$$

(e) La trasformata di Laplace assegnata è in realtà funzione dell'argomento $s - 2$. Utilizzando allora la proprietà sulla traslazione complessa con $a = 2$ si ricava

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s-2}{(s-2)^2-3}\right](t) = e^{2t}\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{s}{s^2-3}\right](t) = e^{2t}\cosh(\sqrt{3}t).$$