

Inversione della trasformata di Laplace (Metodi Matematici e Calcolo per Ingegneria)

Enrico Bertolazzi

DIMS - Università di Trento

anno accademico 2008/2009



Outline

- 1 Antitrasformata di Laplace
 - Formula di Bromwich-Mellin o di Riemann-Fourier
- 2 Forma standard della trasformata di Laplace
 - Decomposizione in fratti semplici
 - Trattamento delle radici complesse
- 3 Formula generale di inversione



Formula di Bromwich-Mellin o di Riemann-Fourier

Teorema (Inversione della trasformata)

Sia $f(t)$ una funzione trasformabile con trasformata $\hat{f}(s)$ e ascissa di convergenza λ_0 . Detto α un qualsiasi numero reale tale che $\alpha > \lambda_0$ vale

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{\alpha - j\beta}^{\alpha + j\beta} e^{st} \hat{f}(s) ds$$

nei punti di continuità, dove $f(t)$ è discontinua vale

$$\frac{f(t+0) + f(t-0)}{2} = \frac{1}{2\pi i} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{\alpha - j\beta}^{\alpha + j\beta} e^{st} \hat{f}(s) ds$$

La retta $x = \alpha$ nel piano di Gauss prende il nome di retta di Bromwich. Si noti che la formula non dipende dal valore di α purché sia $\alpha > \lambda_0$.



La formula di Bromwich-Mellin non è molto comoda per il calcolo pratico della trasformata inversa. Consideriamo ad esempio la antitrasformata di $1/s$ che sappiamo essere la funzione di Heaviside:

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{1}{2\pi i} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{\alpha - j\beta}^{\alpha + j\beta} \frac{e^{st}}{s} ds \\ &= \frac{1}{2\pi i} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{e^{(\alpha + i\gamma)t}}{\alpha + i\gamma} d\gamma \\ &= \frac{e^{\alpha t}}{2\pi} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{\cos(\gamma t)(\alpha - i\gamma) + \sin(\gamma t)(i\alpha + \gamma)}{\alpha^2 + \gamma^2} d\gamma \end{aligned}$$

sfruttando il fatto che $\sin(\gamma t)$ e $\gamma \cos(\gamma t)$ sono funzioni dispari rispetto a γ :

$$h(t) = \frac{e^{\alpha t}}{2\pi} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{\alpha \cos(\gamma t) + \gamma \sin(\gamma t)}{\alpha^2 + \gamma^2} d\gamma$$



Gli integrali

$$h(t) = \frac{e^{\alpha t}}{2\pi} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{\alpha \cos(\gamma t) + \gamma \sin(\gamma t)}{\alpha^2 + \gamma^2} d\gamma$$

per $t \neq 0$ e

$$h(0) = \frac{1}{2\pi} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{\alpha}{\alpha^2 + \gamma^2} d\gamma$$

per $t = 0$ sono difficili da calcolare. Usando ad esempio MAPLE otteniamo la soluzione

$$h(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } t < 0 \\ 1/2 & \text{per } t = 0 \\ 1 & \text{per } t > 0 \end{cases}$$



Forma standard della trasformata di Laplace

(1/2)

- Nelle applicazioni elettriche o meccaniche la trasformata di Laplace si può normalmente scrivere nella forma:

$$G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{(s - p_1)^{m_1} (s - p_2)^{m_2} \dots (s - p_n)^{m_n}}$$

dove $p_i \neq p_j$ se $i \neq j$.

- Possiamo sempre assumere che $\partial P(s) < \partial Q(s)$ in caso contrario usando la divisione di polinomi con resto:

$$P(s) = Q(s)A(s) + B(s) \quad \partial B(s) < \partial Q(s)$$

e quindi

$$\frac{P(s)}{Q(s)} = A(s) + \frac{B(s)}{Q(s)}$$



- Il modo **giusto** di calcolare gli integrali precedenti è usare il metodo dei residui e l'analisi complessa.
- Anche con i residui il calcolo risulta piuttosto laborioso.
- In generale è molto più facile calcolare la trasformata che non l'antitrasformata.

Questa ultima considerazione permette di capire perché il metodo delle tabelle che vedremo in seguito è (in generale) il metodo più rapido per antitrasformare.



Forma standard della trasformata di Laplace

(2/2)

- La antitrasformata di un polinomio

$$A(s) = a_0 + a_1 s + \dots + a_n s^n$$

formalmente è la seguente

$$\mathcal{L}\{A(s)\}^{-1}(t) = a_0 \delta(t) + a_1 \delta^{(1)}(t) + \dots + a_n \delta^{(n)}(t)$$

- Le "funzioni" $\delta^{(k)}(t)$ sono le derivate k -esime nel senso delle distribuzioni della delta di Dirac ed hanno la proprietà:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta^{(k)}(t) dt = (-1)^k f^{(k)}(0)$$

- A parte l'impulso unitario ($\delta(t)$) normalmente le derivate dell'impulso non si trovano nelle applicazioni considerate.
- Possiamo quindi considerare unicamente l'antitrasformata della funzione razionale $P(s)/Q(s)$ con $\partial P(s) < \partial Q(s)$.



Caso radici semplici

Data la funzione razionale nella variabile complessa s ;

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)} \quad (m < n)$$

dove $p_i \neq p_j$ se $i \neq j$. Possiamo riscrivere $G(s)$ come somma di fratti semplici

$$G(s) = \frac{\alpha_1}{s-p_1} + \frac{\alpha_2}{s-p_2} + \dots + \frac{\alpha_n}{s-p_n}$$

dove:

$$\alpha_i = \lim_{s \rightarrow p_i} (s-p_i)G(s)$$

infatti

$$(s-p_i)G(s) = \alpha_i + \sum_{j \neq i} \alpha_j \frac{s-p_i}{s-p_j}$$

Caso generale

Nel caso generale

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{(s-p_1)^{m_1}(s-p_2)^{m_2}\dots(s-p_k)^{m_n}} \quad (m < m_1 + m_2 + \dots + m_n)$$

dove m_i è la molteplicità della radice p_i . Possiamo ancora riscrivere $G(s)$ come somma di fratti semplici come segue

$$G(s) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} \frac{\alpha_{jk}}{(s-p_j)^k}$$

dove $(0! = 1)$:

$$\alpha_{j,m_j-k} = \frac{1}{k!} \lim_{s \rightarrow p_j} \frac{d^k}{ds^k} [(s-p_j)^{m_j} G(s)], \quad k = 0, 1, \dots, m_j - 1$$

Caso radici multiple

Nel caso di radici multiple ad esempio nel caso di una singola radice p di molteplicità n

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{(s-p)^n} \quad (m < n)$$

Possiamo ancora riscrivere $G(s)$ come somma di fratti semplici come segue

$$G(s) = \frac{\alpha_1}{s-p} + \frac{\alpha_2}{(s-p)^2} + \dots + \frac{\alpha_n}{(s-p)^n}$$

dove $(0! = 1)$:

$$\alpha_{n-k} = \frac{1}{k!} \lim_{s \rightarrow p} \frac{d^k}{ds^k} [(s-p)^n G(s)], \quad k = 0, 1, \dots, n-1$$

infatti

$$(s-p)^n G(s) = \alpha_1 (s-p)^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} (s-p) + \alpha_n$$

Formula esplicita della soluzione

Avendo scritto $G(s)$ come somma di fratti semplici come segue

$$G(s) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} \frac{\alpha_{jk}}{(s-p_j)^k}$$

formalmente l'inversa diventa consultando la tabella delle trasformate:

$$G(t) = \mathcal{L} \{G(s)\}^{-1}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} \frac{\alpha_{jk}}{(k-1)!} e^{p_j t} t^{k-1}$$

Attenzione in questa espressione p_j in generale è un numero complesso il termine corrispondente è una funzione a valori complessi della quale non abbiamo definito la trasformata di Laplace.

Lemma

Sia $p_j = \bar{p}_i$ allora vale $m_i = m_j$ e inoltre

$$\alpha_{jk} = \bar{\alpha}_{ik} \quad k = 1, 2, \dots, m_i$$

Per prima cosa osserviamo che $\alpha_{jm_j} = \bar{\alpha}_{im_i}$:

$$\begin{aligned} \alpha_{jm_j} &= \lim_{s \rightarrow p_j} (s - p_j)^{m_j} G(s) = \overline{\lim_{\bar{s} \rightarrow \bar{p}_j} (\bar{s} - \bar{p}_j)^{m_j} G(\bar{s})} \\ &= \overline{\lim_{\bar{s} \rightarrow \bar{p}_i} (\bar{s} - \bar{p}_i)^{m_i} G(\bar{s})} = \overline{\lim_{s \rightarrow p_i} (s - p_i)^{m_i} G(s)} = \bar{\alpha}_{im_i} \end{aligned}$$

e per gli altri coefficienti in modo analogo

$$\begin{aligned} \alpha_{jm_j-k} &= \lim_{s \rightarrow p_j} \frac{d^k [(s - p_j)^{m_j} G(s)]}{ds^k} = \lim_{s \rightarrow p_j} \frac{d^k [(\bar{s} - \bar{p}_j)^{m_j} G(\bar{s})]}{d\bar{s}^k} \\ &= \lim_{s \rightarrow p_j} \frac{d^k [(\bar{s} - \bar{p}_i)^{m_i} G(\bar{s})]}{d\bar{s}^k} = \lim_{s \rightarrow p_i} \frac{d^k [(s - p_i)^{m_i} G(s)]}{ds^k} = \bar{\alpha}_{im_i-k} \end{aligned}$$

consideriamo ora $f(t) = \beta e^{pt} + \bar{\beta} e^{\bar{p}t}$ dove

$$\beta = a + ib, \quad p = \gamma + i\omega,$$

allora avremo

$$\begin{aligned} f(t) &= (a + ib)e^{(\gamma+i\omega)t} + (a - ib)e^{(\gamma-i\omega)t} \\ &= e^{\gamma t} [(a + ib)(\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)) \\ &\quad + (a - ib)(\cos(\omega t) - i \sin(\omega t))] \\ &= e^{\gamma t} [2a \cos(\omega t) - 2b \sin(\omega t)] \end{aligned}$$

cioè in generale

$$f(t) = 2e^{\operatorname{Re}(p)t} [\operatorname{Re}(\beta) \cos(\operatorname{Im}(p)t) - \operatorname{Im}(\beta) \sin(\operatorname{Im}(p)t)]$$

Dal lemma precedente segue che nel caso di poli reali i coefficienti corrispondenti nello sviluppo in fratti semplici sono reali. Sia ora $G(s)$ con n radici dove le radici complesse vengono contate una volta sola allora abbiamo

$$G(s) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_{jk}}{(s - p_j)^k} + \frac{\bar{\beta}_{jk}}{(s - \bar{p}_j)^k} \right]$$

dove

$$\beta_{jk} = \begin{cases} \alpha_{jk} & \text{se } \alpha_{jk} \text{ è un numero reale} \\ 2\alpha_{jk} & \text{se } \alpha_{jk} \text{ è un numero complesso} \end{cases}$$

a questo punto l'antitrasformata diventa

$$G(t) = \mathcal{L} \{G(s)\}^{-1}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} \frac{\beta_{jk} e^{p_j t} + \bar{\beta}_{jk} e^{\bar{p}_j t}}{2(k-1)!} t^{k-1}$$

Formula generale di inversione

- In generale se $G(s) = P(s)/Q(s)$ con $\partial P(s) \leq \partial Q(s)$ e $Q(s)$ che ha n radici distinte p_k di molteplicità m_k (le coppie di radici complesse coniugate si contano 1) scriverà come:

$$G(s) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} \frac{1}{2} \left[\frac{\beta_{jk}}{(s - p_j)^k} + \frac{\bar{\beta}_{jk}}{(s - \bar{p}_j)^k} \right]$$

- Usando le considerazioni dei lucidi precedenti e ponendo $r_k = \operatorname{Re}(p_k)$ e $\omega_k = \operatorname{Im}(p_k)$ otteniamo

$$G(t) = \sum_{j=1}^n e^{r_j t} [\operatorname{Re}(P_j(t)) \cos(\omega_j t) - \operatorname{Im}(P_j(t)) \sin(\omega_j t)]$$

dove

$$P_j(t) = \sum_{k=1}^{m_j} t^{k-1} \frac{\beta_{jk}}{(k-1)!}$$

Calcolo pratico dei coefficienti α_{ki}

(2/2)

Moltiplicando l'espansione precedente per $Q(s)$ otteniamo una uguaglianza tra polinomi

$$P(s) = Q(s)G(s) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{m_k} \frac{Q(s)}{2} \left[\frac{\alpha_{ki}}{(s-p_k)^i} + \frac{\bar{\alpha}_{ki}}{(s-\bar{p}_k)^i} \right]$$

I coefficienti α_{km_k} si ottengono immediatamente dalla relazione

$$P(p_k) = Q(p_k)G(p_k)$$

gli altri coefficienti si ottengono tramite derivazione e usando i risultati precedenti

$$\alpha_{j,m_k-j} := \text{risolve per } \alpha_{j,m_k-j} \quad \frac{d^j}{ds^j} P(s) \Big|_{s=p_k} = 0$$

per capire come funziona conviene fare un semplice esempio



Esempio Pratico molto complesso

(1/10)

Vogliamo trovare l'espansione in fratti semplici del seguente polinomio razionale

$$\frac{s^2 + s + 1}{(s-1)(s-3)^3(s-(1+i))^2(s-(1-i))^2}$$

le radici sono ovviamente $p_1 = 1$, $p_2 = 3$, $p_3 = 1 + i$ con molteplicità $m_1 = 1$, $m_2 = 3$ ed $m_3 = 2$. L'espansione in fratti semplici prende la forma (i fattori 1/2 li metto solo alla fine)

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{a}{s-1} + \frac{b_1}{s-3} + \frac{b_2}{(s-3)^2} + \frac{b_3}{(s-3)^3} \\ &+ \frac{c_1 + id_1}{s-(1+i)} + \frac{c_1 - id_1}{s-(1-i)} \\ &+ \frac{c_2 + id_2}{(s-(1+i))^2} + \frac{c_2 - id_2}{(s-(1-i))^2} \end{aligned}$$



Esempio Pratico molto complesso

(2/10)

Calcoliamo ora

$$\begin{aligned} P(s)G(s) &= a(s-3)^3(s-(1+i))^2(s-(1-i))^2 \\ &+ b_1(s-1)(s-3)^2(s-(1+i))^2(s-(1-i))^2 \\ &+ b_2(s-1)(s-3)(s-(1+i))^2(s-(1-i))^2 \\ &+ b_3(s-1)(s-(1+i))^2(s-(1-i))^2 \\ &+ (c_1 + id_1)(s-1)(s-3)^3(s-(1+i))(s-(1-i))^2 \\ &+ (c_1 - id_1)(s-1)(s-3)^3(s-(1+i))^2(s-(1-i)) \\ &+ (c_2 + id_2)(s-1)(s-3)^3(s-(1-i))^2 \\ &+ (c_2 - id_2)(s-1)(s-3)^3(s-(1+i))^2 \end{aligned}$$



Esempio Pratico molto complesso

(3/10)

Espandendo i polinomi

$$\begin{aligned} Q(s)G(s) &= (a + b_1 + 2c_1)s^7 \\ &+ (2c_2 - 11b_1 + b_2 - 13a - 26c_1 - 2d_1)s^6 \\ &+ (-24c_2 - 8b_2 + b_3 - 4d_2 + 51b_1 + 71a + 24d_1 + 140c_1)s^5 \\ &+ (-116d_1 - 215a - 133b_1 - 408c_1 + 27b_2 - 5b_3 + 44d_2 + 112c_2)s^4 \\ &+ (12b_3 + 706c_1 + 400a - 52b_2 + 292d_1 + 216b_1 - 184d_2 - 252c_2)s^3 \\ &+ (60b_2 - 738c_1 - 16b_3 - 468a + 270c_2 - 220b_1 - 414d_1 + 360d_2)s^2 \\ &+ (324a + 12b_3 + 132b_1 - 108c_2 - 40b_2 + 432c_1 - 324d_2 + 324d_1)s \\ &- 108a - 36b_1 + 12b_2 - 4b_3 - 108c_1 - 108d_1 + 108d_2 \end{aligned}$$

Notate che è un polinomio a coefficienti reali in s .



Esempio Pratico molto complesso

(4/10)

Calcoliamo ora i polinomi in $s = 1$ (la prima radice)

$$Q(1)G(1) = -8a, \quad P(1) = 3, \quad a = -\frac{3}{8}$$

Calcoliamo ora i polinomi in $s = 3$ (la seconda radice)

$$Q(3)G(3) = 50b_3, \quad P(3) = 13, \quad b_3 = \frac{13}{50}$$

Calcoliamo ora i polinomi in $s = 1 + i$ (la terza radice)

$$Q(1+i)G(1+i) = 44c_2 - 8d_2 + i(8c_2 + 44d_2), \quad P(1+i) = 2 + 3i,$$

da cui otteniamo il sistema

$$44c_2 - 8d_2 = 2, \quad 8c_2 + 44d_2 = 3.$$

che risolto da come risultato $c_2 = 7/125$ e $d_2 = 29/500$.

Esempio Pratico molto complesso

(5/10)

Calcoliamo ora

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds}(Q(s)G(s)) &= 7(a + b_1 + 2c_1)s^6 \\ &+ 6(2c_2 - 11b_1 + b_2 - 13a - 26c_1 - 2d_1)s^5 \\ &+ 5(-24c_2 - 8b_2 + b_3 - 4d_2 + 51b_1 + 71a + 24d_1 + 140c_1)s^4 \\ &+ 4(-116d_1 - 215a - 133b_1 - 408c_1 + 27b_2 - 5b_3 + 44d_2 + 112c_2)s^3 \\ &+ 3(12b_3 + 706c_1 + 400a - 52b_2 + 292d_1 + 216b_1 - 184d_2 - 252c_2)s^2 \\ &+ 2(60b_2 - 738c_1 - 16b_3 - 468a + 270c_2 - 220b_1 - 414d_1 + 360d_2)s \\ &+ 324a + 12b_3 + 132b_1 - 108c_2 - 40b_2 + 432c_1 - 324d_2 + 324d_1 \end{aligned}$$



Esempio Pratico molto complesso

(6/10)

Calcoliamo ora i polinomi in $s = 3$ (la seconda radice)

$$\frac{d}{ds}Q(s)G(s)|_{s=3} = 50b_2 + 105b_3, \quad P'(3) = 7,$$

usando il valore precedentemente calcolato $b_3 = -\frac{13}{50}$ otteniamo $b_2 = -203/500$. Calcoliamo ora i polinomi in $s = 1 + i$ (la terza radice)

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds}Q(s)G(s)|_{s=1+i} &= 44c_1 - 8d_1 - 32c_2 + 124d_2 \\ &+ 8ic_1 + 44id_1 - 32id_2 - 124ic_2 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{ds}P(s)|_{s=1+i} = 3 + 2i$$

mettendo a sistema e usando i valori di c_2 e d_2 otteniamo $c_1 = -6/625$ e $d_1 = 309/1250$.

Esempio Pratico molto complesso

(7/10)

Calcoliamo ora

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{ds^2}(Q(s)G(s)) &= (42a + 42b_1 + 84c_1)s^5 \\ &+ (60c_2 - 330b_1 + 30b_2 - 390a - 780c_1 - 60d_1)s^4 \\ &+ (1420a - 480c_2 + 1020b_1 + 480d_1 + 2800c_1 + 20b_3 - 160b_2 - 80d_2)s^3 \\ &+ (-4896c_1 + 1344c_2 + 528d_2 - 2580a - 60b_3 - 1596b_1 - 1392d_1 + 324b_2)s^2 \\ &+ (72b_3 - 1512c_2 + 4236c_1 + 2400a + 1296b_1 - 312b_2 + 1752d_1 - 1104d_2)s \\ &- 936a + 540c_2 - 440b_1 + 720d_2 - 32b_3 - 828d_1 - 1476c_1 + 120b_2 \end{aligned}$$



Esempio Pratico molto complesso

(8/10)

Calcoliamo ora i polinomi in $s = 3$ (la seconda radice)

$$\frac{d^2}{ds^2} Q(s)G(s)|_{s=3} = 100b_1 + 210b_2 + 184b_3, \quad P''(3) = 2,$$

usando il valore precedentemente calcolato $b_3 = -\frac{13}{50}$ e $b_2 = -203/500$ otteniamo $b_1 = 1971/5000$.



Esempio Pratico molto complesso

(9/10)

Mettendo tutto assieme otteniamo

$$G(s) = \frac{-3/8}{s-1} + \frac{1971}{5000(s-3)} + \frac{-203}{500(s-3)^2} + \frac{13}{50(s-3)^3} \\ + \frac{-6/625 + 309/1250i}{s-(1+i)} + \frac{-6/625 - 309/1250i}{s-(1-i)} \\ + \frac{7/125 + 29/500i}{(s-(1+i))^2} + \frac{7/125 - 29/500i}{(s-(1-i))^2}$$



Esempio Pratico molto complesso

(10/10)

E usando le relazioni sulle radici complesse coniugate

$$G(t) = e^t \frac{(560t - 96) \cos(t) - (2472 + 580t) \sin(t) - 1875}{5000} \\ + e^{3t} \frac{1971 - 2030t + 650t^2}{5000}$$



Riferimenti

-  Joel L. Schiff
The Laplace Transform, theory and applications
Springer-Verlag, 1999.
-  U. Graf
Applied Laplace Transforms and z-Transforms for Scientists and Engineers
Birkh"user, 2004.
-  Spiegel Murray R.
Laplace transforms
Schaum's outline series, 1965.

