

Lezione 05

Comportamento non ideale dei componenti

Stefano Selleri

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni
Università di Firenze



Sommario della Lezione

- ❖ Introduzione
- ❖ Fili conduttori
- ❖ Piste su Printed Circuit Board (PCB)
- ❖ Effetto dei connettori
- ❖ Resistori
- ❖ Capacitori
- ❖ Induttori

Introduzione

- ❖ I componenti circuitali (fili conduttori, resistori, capacitori, induttori, ecc.) utilizzati nei sistemi elettronici sia analogici che digitali sono caratterizzati da un comportamento reale che si discosta da quello ideale per il quale sono progettati e realizzati.
- ❖ La non idealità di tali componenti costituisce un aspetto critico per il problema della EMC, poiché incide sulla capacità di sopprimere le emissioni condotte e radiate da parte del sistema in oggetto (EMI).

Fili conduttori

- ❖ Se una coppia di fili conduttori è elettricamente lunga ($L > l/10$) alla frequenza di interesse, la linea si comporta come una linea di trasmissione e non può essere modellata con un circuito a parametri concentrati. Se invece i fili sono elettricamente corti allora il circuito a parametri concentrati fornisce risultati accettabili.
- ❖ Il comportamento dei conduttori all'interno delle bande regolamentari delle emissioni radiate (30 MHz–40 GHz) e delle emissioni condotte (150 kHz–30 MHz) si discosta da quello ideale.
- ❖ Tipicamente la resistenza dei conduttori è importante ai fini del progetto funzionale per la determinazione delle dimensioni del conduttore per garantire la minima caduta di tensione in un circuito di distribuzione della potenza.
- ❖ All'interno della banda delle emissioni radiate anche la capacità e l'induttanza dei conduttori diventa significativa.



Fili conduttori

- ❖ Per filo conduttore (*wire*) si intende uno o più conduttori solidi cilindrici a sezione circolare.
- ❖ Un filo conduttore può essere costituito da un singolo filo (*solid wire*), di traggio r_w e conducibilità σ , o da un fascio di fili (*stranded wire*), ciascuno di raggio r_{ws} .
- ❖ La maggior parte dei conduttori è realizzata utilizzando il rame (Cu - $\sigma_{Cu}=5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$).
- ❖ Normalmente i conduttori non sono ferromagnetici, per cui $\mu = \mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, ed hanno una permittività pari a quella dello spazio libero, $\varepsilon = \varepsilon_0 \approx (1/36\pi) \times 10^{-9} \text{ F/m}$.

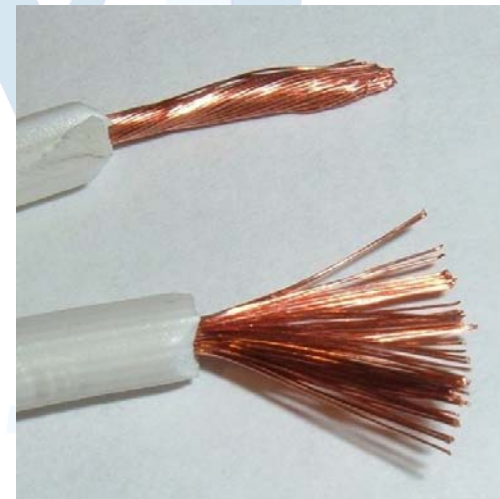
Fili conduttori

Conducibilità relativa (rispetto al Cu)
 σ_r e permeabilità relativa (rispetto allo
spazio libero) μ_r di diversi materiali
conduttori

Conductor	σ_r	μ_r
Silver	1.05	1
Copper—annealed	1.00	1
Gold	0.70	1
Aluminum	0.61	1
Brass	0.26	1
Nickel	0.20	600
Bronze	0.18	1
Tin	0.15	1
Steel (SAE 1045)	0.10	1000
Lead	0.08	1
Monel	0.04	1
Stainless steel (430)	0.02	500
Zinc	0.32	1
Iron	0.17	1000
Beryllium	0.10	1
Mu-metal (at 1 kHz)	0.03	30,000
Permalloy (at 1 kHz)	0.03	80,000

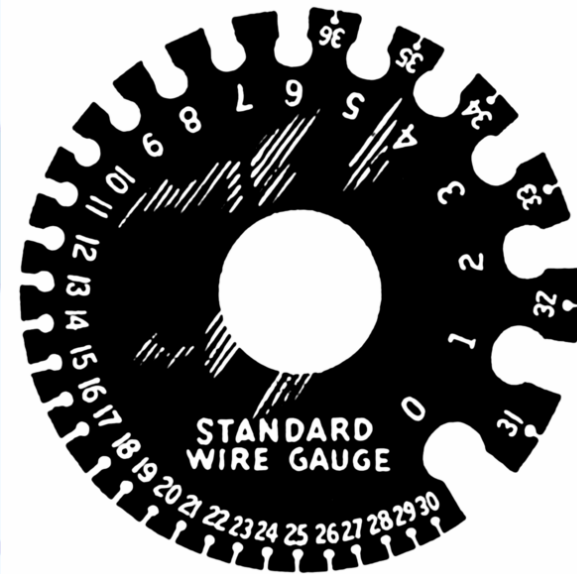
Fili conduttori

- ❖ I fili di tipo stranded sono costituiti da fasci di fili singoli e sottili al fine di ottenere maggiore flessibilità del cavo.
- ❖ Con ragionevole approssimazione la resistenza e l'induttanza interna di un cavo costituito da S fili può essere calcolata dividendo la resistenza e l'induttanza interna di un singolo filo di raggio r_{ws} per il numero di fili S .
- ❖ Per la determinazione della capacità e dell'induttanza esterne si considera il cavo come un unico filo solido di raggio equivalente.



Fili conduttori

- ❖ Una delle unità di misura più diffuse per individuare le dimensioni dei fili conduttori è la American Wire Gauge (AWG).
- ❖ Per i fili singoli c'è una corrispondenza diretta tra la gauge e il raggio del filo, mentre per i cavi si ricorre ad una gauge equivalente che corrisponde approssimativamente al raggio complessivo del fascio di fili.
- ❖ Nei datasheet il raggio dei fili è tipicamente indicato in *mil*, dove $1\text{mil} = 1/1000\text{ in} = 0.001\text{ in}$





Fili conduttori

Wire Gauge	Wire Diameter (mils)				
	Solid	Stranded			
4/0	460.1	522.0 (427 × 23) 522.0 (259 × 21)	16	50.8	59.0 (105 × 36) 59.0 (26 × 30)
3/0	409.6	464.0 (427 × 24) 464.0 (259 × 23)	18	40.3	60.0 (7 × 24) 47.0 (65 × 36) 49.0 (19 × 30)
2/0	364.8	414.0 (259 × 23) 414.0 (133 × 20)	20	32.0	47.0 (16 × 30) 48.0 (7 × 26) 36.0 (41 × 36)
1/0	324.9	368.0 (259 × 24) 368.0 (133 × 21)	22	25.3	36.0 (26 × 34) 37.0 (19 × 32) 35.0 (10 × 30)
1	289.3	328.0 (2109 × 34) 328.0 (817 × 30)	24	20.1	30.0 (26 × 36) 31.0 (19 × 34) 30.0 (7 × 30)
2	257.6	292.0 (2646 × 36) 292.0 (665 × 30)	26	15.9	23.0 (41 × 40) 24.0 (19 × 36) 23.0 (10 × 34)
4	204.3	232.0 (1666 × 36)	28	12.6	24.0 (7 × 32) 19.0 (7 × 34) 20.0 (19 × 38)
6	162.0	184.0 (1050 × 36) 184.0 (259 × 30)	30	10.0	21.0 (10 × 36) 16.0 (19 × 40) 15.0 (7 × 36)
8	128.5	147.0 (655 × 36)	32	8.0	12.0 (7 × 38) 8.0 (7 × 40)
10	101.9	116.0 (105 × 30) 115.0 (37 × 26)	34	6.3	7.5 (7 × 42)
12	80.0	95.0 (165 × 34) 96.0 (7 × 20)	36	5.0	6.0 (7 × 44)
14	64.1	73.0 (105 × 30) 73.0 (41 × 30) 73.0 (7 × 22)	38	4.0	

Fili conduttori

- ❖ I fili sono normalmente ricoperti da materiale dielettrico con funzione protettiva e isolante.
- ❖ Lo spessore del dielettrico è tipicamente dell'ordine del raggio del filo
- ❖ Valori in continua (dc – bassa frequenza) della permittività relativa ϵ_r per vari materiali isolanti

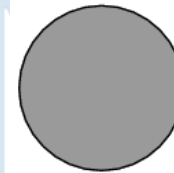
Material	ϵ_r
Air	1.0005
Styrofoam	1.03
Polyethylene foam	1.6
Cellular Polyethylene	1.8
Teflon	2.1
Polyethylene	2.3
Polystyrene	2.5
Silicone rubber	3.1
Nylon	3.5
Polyvinyl chloride (PVC)	3.5
Epoxy resin	3.6
Quartz (fused)	3.8
Glass (pyrex)	4.0
Epoxy glass (PCB substrate)	4.7
Bakelite	4.9
Mylar	5.0
Porcelain	6.0
Neoprene	6.7
Polyurethane	7.0
Silicon	12.0

Fili conduttori

- ❖ Resistenza in continua di un filo a sezione circolare di raggio r_w , conducibilità σ e lunghezza complessiva L
- ❖ Al crescere della frequenza la corrente si addensa verso la periferia del filo per l'effetto pelle e può essere considerata come concentrata in un anello circolare di spessore coincidente con la profondità di penetrazione

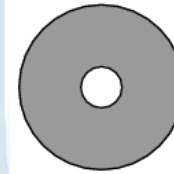
$$R = \frac{L}{\sigma \pi r_w^2} \quad (\Omega)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$$



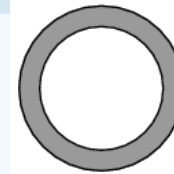
Cross-sectional area of a round conductor available for conducting DC current

"DC resistance"



Cross-sectional area of the same conductor available for conducting low-frequency AC

"AC resistance"



Cross-sectional area of the same conductor available for conducting high-frequency AC

"AC resistance"

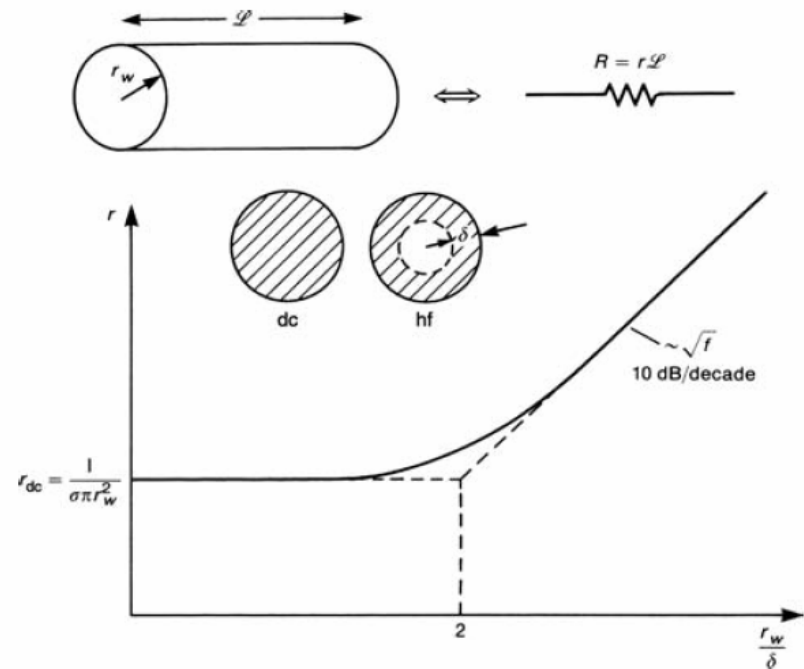
Fili conduttori

Profondità di penetrazione del rame al variare della frequenza

f	δ
60 Hz	8.5 mm
1 kHz	2.09 mm
10 KHz	0.66 mm
100 kHz	0.21 mm
1 MHz	2.6 mils
10 MHz	0.82 mils
100 MHz	0.26 mils
1 GHz	0.0823 mils

Fili conduttori

- ❖ La profondità di penetrazione diventa estremamente ridotta per frequenze all'interno della banda delle emissioni radiate: a 100 MHz $\delta = 0.26$ mils
- ❖ Un filo che conduce una corrente in alta frequenza utilizza soltanto una porzione molto ridotta della sezione del conduttore, per cui anche la resistenza per unità di lunghezza del filo aumenta all'aumentare della frequenza



Fili conduttori

- ❖ resistenza per unità di lunghezza

$$r_{LF} = r_{DC} = \frac{1}{\sigma \pi r_w^2} (\Omega/m) \quad \text{for } r_w \ll \delta$$

$$r_{HF} = \frac{1}{\sigma \left[\pi r_w^2 - \pi (r_w - \delta)^2 \right]} (\Omega/m) \cong$$

$$\cong \frac{1}{\sigma 2\pi r_w \delta} = \frac{r_w}{2\delta} r_{DC} = \frac{1}{2r_w} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi \sigma}} \sqrt{f} (\Omega/m) \quad \text{for } r_w \gg \delta$$

- ❖ La profondità di penetrazione decresce come il reciproco della radice della frequenza, quindi in alta frequenza la resistenza cresce con una pendenza di 10 dB/decade.
- ❖ In bassa frequenza la resistenza rimane costante e pari al valore in continua fino al valore di frequenza per cui gli asintoti si incontrano ovvero $r_w = 2\delta$

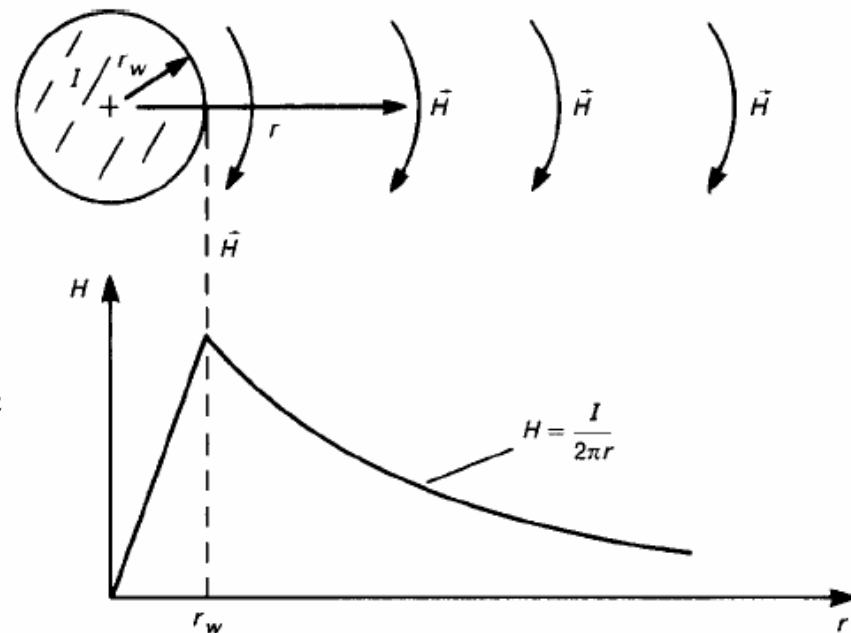
Fili conduttori

- ❖ Un filo conduttore isolato presenta una induttanza interna per unità di lunghezza dipendente dalla frequenza, dovuta al flusso magnetico interno al filo. La corrente è

$$I_0 \rightarrow J = \frac{I_0}{\pi r_w^2} \rightarrow I(r) = \frac{I_0}{\pi r_w^2} \pi r^2 \xrightarrow{H = \frac{I}{2\pi r}} H(r) = \frac{I_0}{2\pi r} \left(\frac{\pi r^2}{\pi r_w^2} \right)$$

- ❖ L'energia immagazzinata nel campo magnetico

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \int_S \mu_0 |H|^2 dS = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{r_w} \int_0^{2\pi} \mu_0 \left[\frac{|I_0|}{2\pi r} \left(\frac{\pi r^2}{\pi r_w^2} \right) \right]^2 dr r d\phi = \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 \left[\frac{I_0}{2\pi r_w^2} \right]^2 2\pi \int_0^{r_w} r^3 dr = \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 \frac{|I_0|^2}{2\pi r_w^4} \left[\frac{1}{4} r^4 \right]_0^{r_w} = \frac{1}{2} \underbrace{\left(\frac{\mu_0}{8\pi} \right)}_{\substack{\text{Induttanza per} \\ \text{unità di lunghezza} \\ L_{iLF} = L_{iDC}}} |I_0|^2 \end{aligned}$$



Fili conduttori

- ❖ In alta frequenza (effetto pelle) l'induttanza per unità di lunghezza è più complessa da calcolare, ma considerando che la *stessa* corrente interessa *un'area più piccola*, considerando la densità di corrente costante si può pensare semplicemente di fare il rapporto fra le aree:

$$L_{i_{HF}} = \frac{\pi r_w^2 - \pi(r_w - \delta)^2}{\pi r_w^2} L_{i_{LF}} = \frac{2\delta}{r_w} L_{i_{LF}}$$

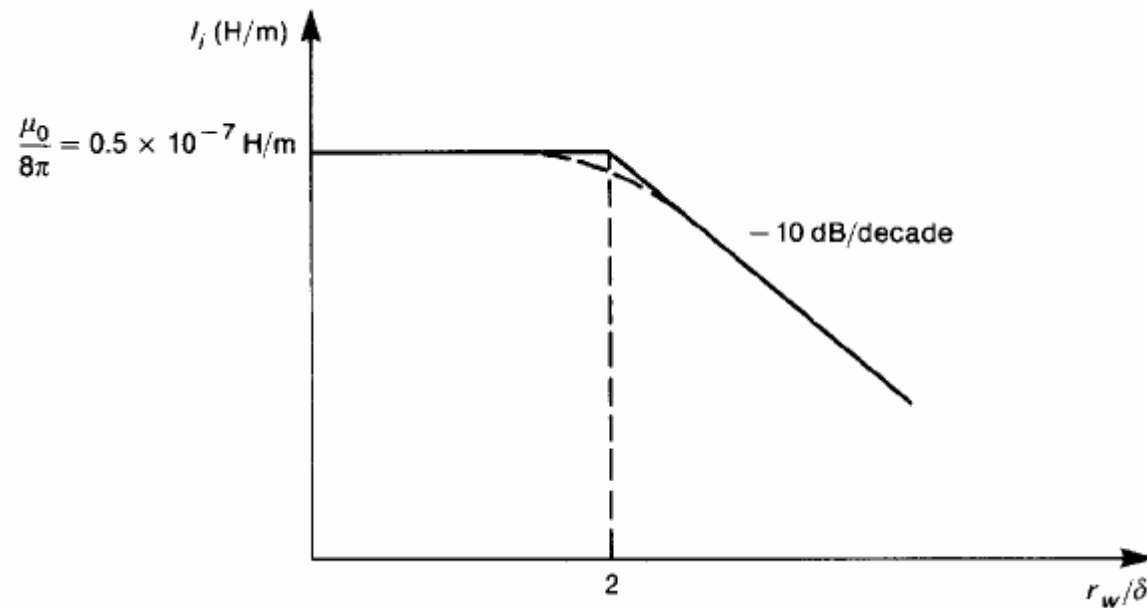
- ❖ Questa vale se $\delta \ll r_w$
- ❖ Esplicitando la dipendenza da f

$$L_{i_{HF}} = \frac{1}{4\pi r_w} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi\sigma}} \frac{1}{\sqrt{f}}$$



Fili conduttori

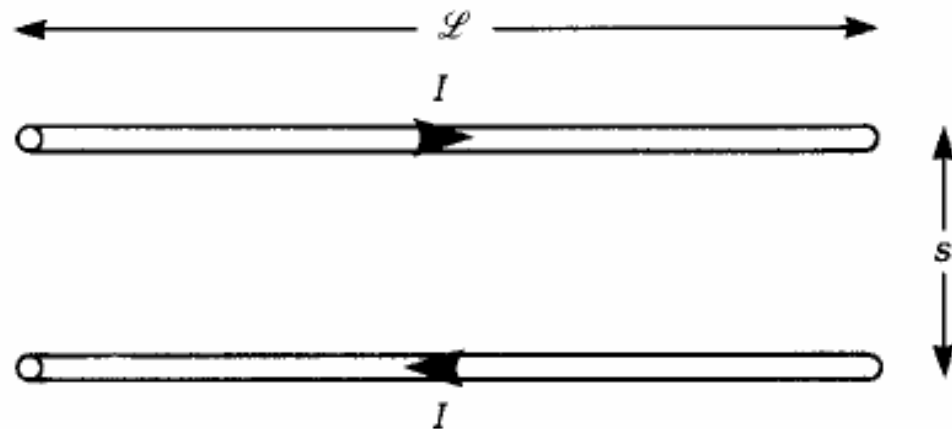
- Poiché la profondità di penetrazione δ decresce come il reciproco della radice quadrata della frequenza in alta frequenza l'induttanza interna per unità di lunghezza decresce con pendenza di 10 dB/decade



Coppia di Fili conduttori

Induttanza e capacità esterne...

- ❖ La configurazione più comune è però la coppia di fili paralleli di raggio r_w , e distanza di separazione s vista nella lezione 4.



Coppia di Fili conduttori

- ❖ Il flusso magnetico esterno attraverso il circuito rende ragione dell'induttanza esterna della coppia di fili
- ❖ L'induttanza esterna per unità di lunghezza L_e è il rapporto tra il flusso ψ_m per unità di lunghezza attraverso il circuito e la corrente che produce tale flusso.
- ❖ Se i due fili sono abbastanza distanti ($s / r_w > 5$) si può trascurare l'effetto di prossimità e l'espressione di L_e diventa

$$L_e = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{s}{r_w}\right) \quad (H/m) \rightarrow \begin{cases} 0.4 \ln\left(\frac{s}{r_w}\right) & (\mu H / m) \\ 10.16 \ln\left(\frac{s}{r_w}\right) & (nH / in.) \end{cases}$$

- ❖ L'induttanza totale è data da

$$L = 2L_i + L_e$$

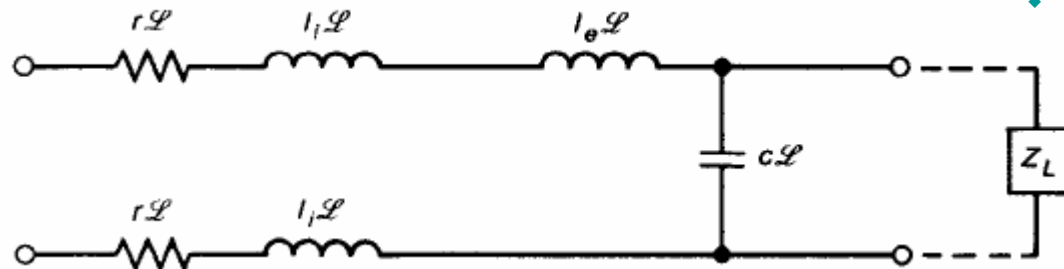
Coppia di Fili conduttori

- ❖ Le cariche sui fili determinano una capacità per unità di lunghezza c tra i due fili che dipende dal raggio dei fili e dalla distanza di separazione. Se i due fili sono abbastanza distanti ($s / r_w > 5$):

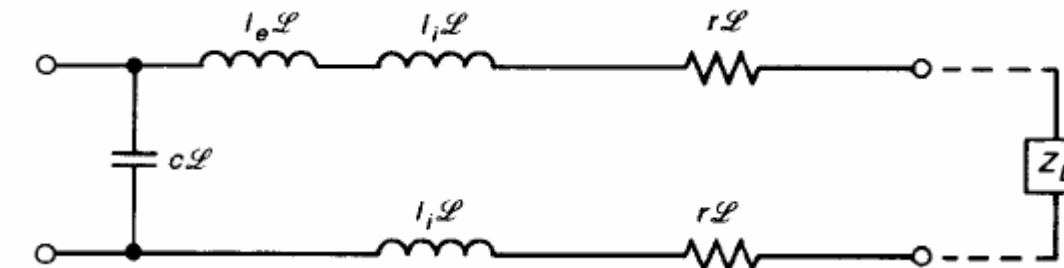
$$L_e = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \left(\frac{s}{r_w} \right)} (F / m) \rightarrow \begin{cases} \frac{27.78}{\ln \left(\frac{s}{r_w} \right)} (pF / m) \\ \frac{0.706}{\ln \left(\frac{s}{r_w} \right)} (pF / in.) \end{cases}$$

Coppia di Fili conduttori

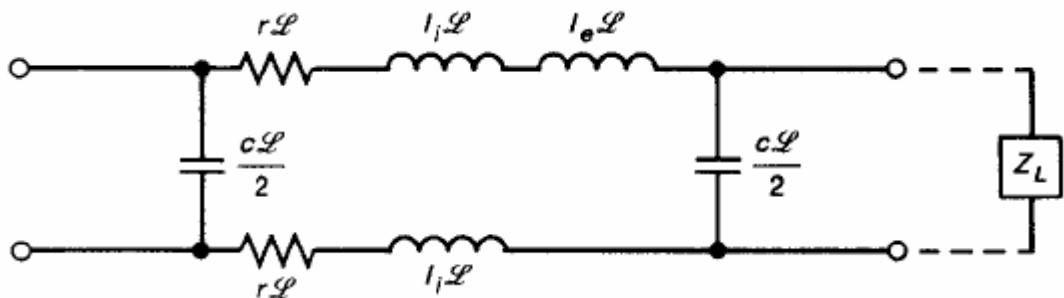
❖ Se la lunghezza del filo è molto inferiore alla lunghezza d'onda (Low Frequency)



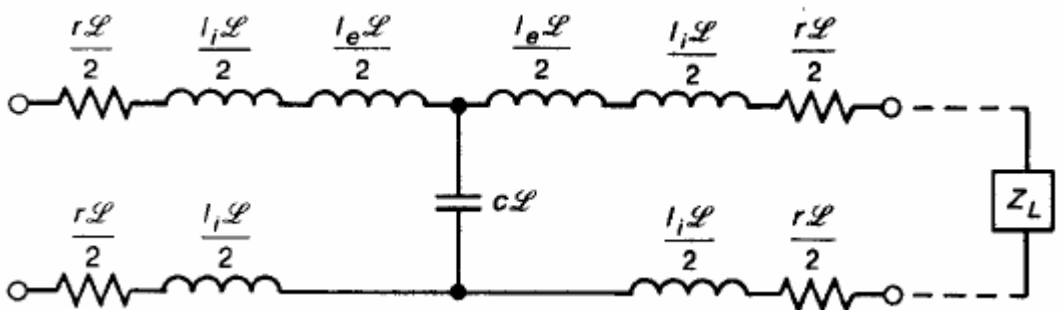
Circuito equivalente a Γ inverso



Circuito equivalente a Γ



Circuito equivalente a Π



Circuito equivalente a T

Coppia di Fili conduttori

- ❖ I termini di induttanza interna sono di solito trascurati nei modelli, infatti, per un caso tipico (Filo di gauge 20, monofilo in rame, conduttori separati da 50 mils.) si ha:

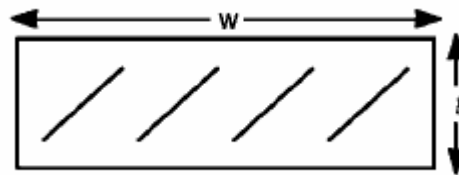
$$L_{i_{DC}} = 0.05 \mu H / m = 1.27 nH / in.$$

$$L_e = 0.456 \mu H / m = 11.58 nH / in.$$

- ❖ Ovvero un fattore 10 di differenza
- ❖ Inoltre le possibili topologie di circuito equivalente non sono tutte uguali. Infatti i primi due hanno il condensatore in parallelo al carico. Se il carico è a bassa impedenza il condensatore viene reso inefficace dalla bassa impedenza in parallelo
- ❖ Analogamente un carico ad alta impedenza in serie all'induttore lo rende inefficace.
- ❖ Questi fenomeni limitano la validità in frequenza dei modelli

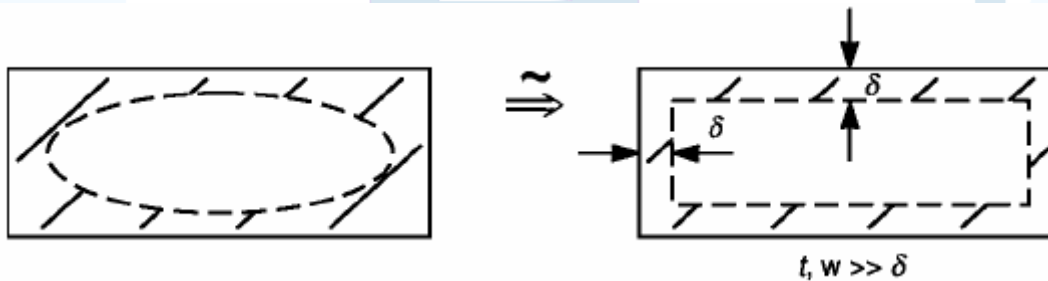
Microstrisce

❖ resistenza per unità di lunghezza



$$R_{LF} = R_{DC} = \frac{1}{\sigma w t} \quad (\Omega/m)$$

La densità di corrente DC è uniforme sulla sezione



$$\begin{aligned} R_{HF} &= \frac{1}{\sigma [wt - (w - 2\delta)(t - 2\delta)]} = \\ &= \frac{1}{\sigma (2w\delta + 2wt - 4\delta^2)} \cong \\ &\cong \frac{1}{\sigma 2\delta(w + t)} (\Omega/m) \end{aligned}$$

Al crescere della frequenza interviene l'effetto pelle

Microstrisce

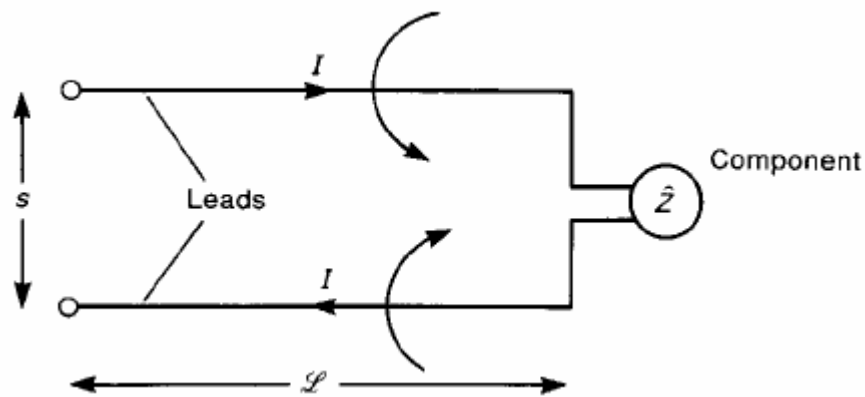
- ❖ Induttanza (esterna) e capacità per unità di lunghezza
- ❖ Il calcolo teorico è molto complesso e in genere si utilizzano metodi numerici
- ❖ Tali metodi consentono il calcolo di una permittività efficace e dell'impedenza caratteristica

$$\epsilon_{eff} \quad Z_0$$
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}\epsilon_0\mu_0}} = \frac{11.8}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ in./ns}$$

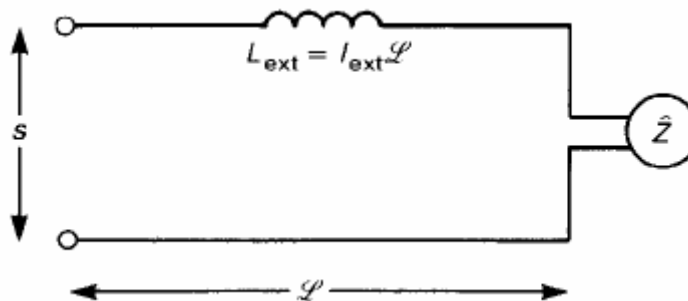
$$L_e = \frac{Z_0}{v} \quad C_e = \frac{1}{Z_0 v}$$

Connettori

Effetto del campo magnetico sui collegamenti: modello fisico

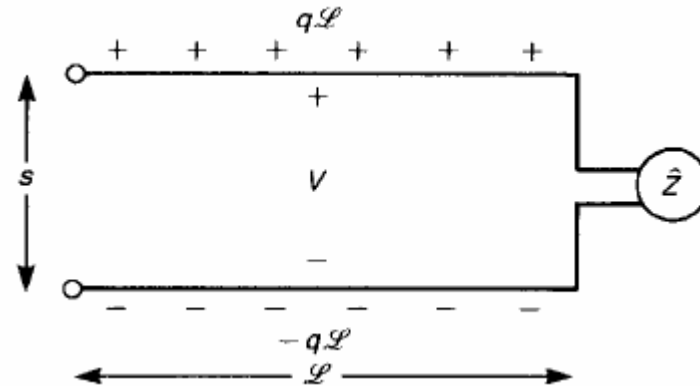


Effetto del campo magnetico sui collegamenti: circuito equivalente

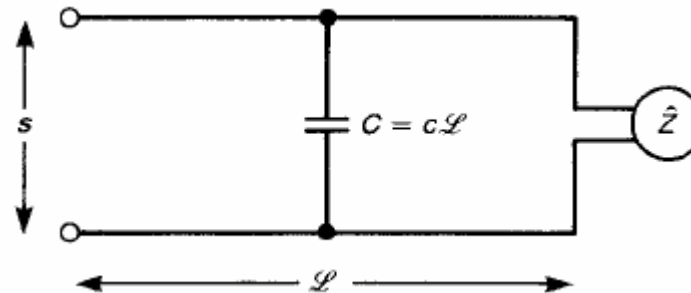


Connettori

Effetto del campo elettrico sui collegamenti: modello fisico

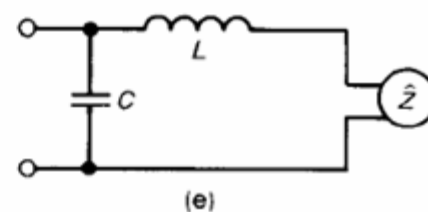
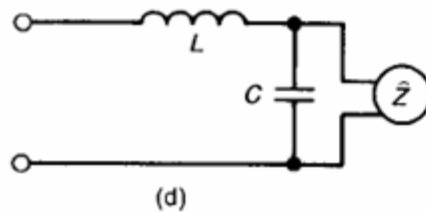
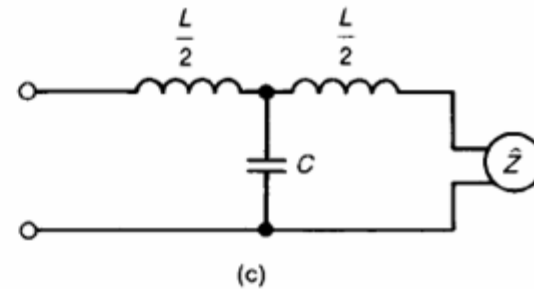
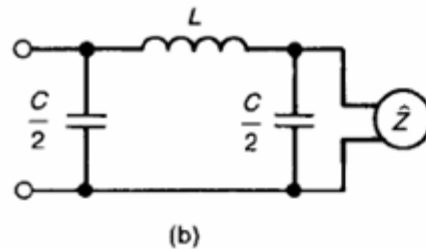
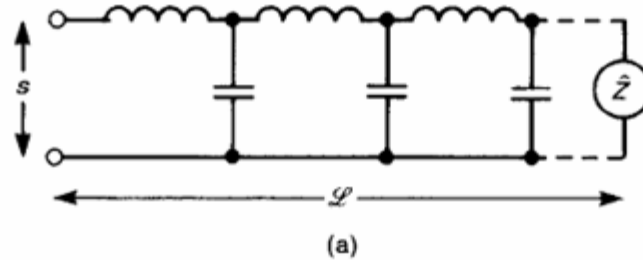


Effetto del campo elettrico sui collegamenti: circuito equivalente



Connettori

Trascurando le perdite...

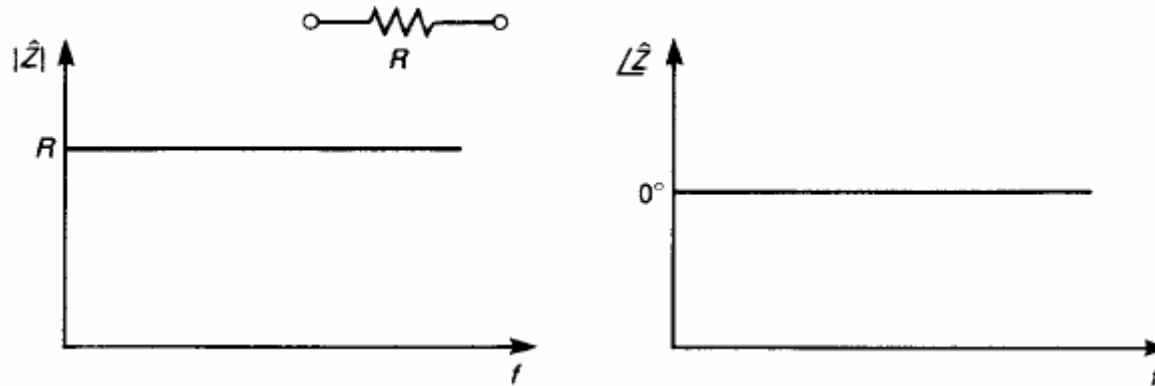


- (a) Circuito a parametri distribuiti
- (b) Circuito a parametri concentrati a Π
- (c) Circuito a parametri concentrati a T
- (d) Circuito a parametri concentrati a Γ rovesciato
- (e) Circuito a parametri concentrati a Γ

Resistori

Comportamento ideale

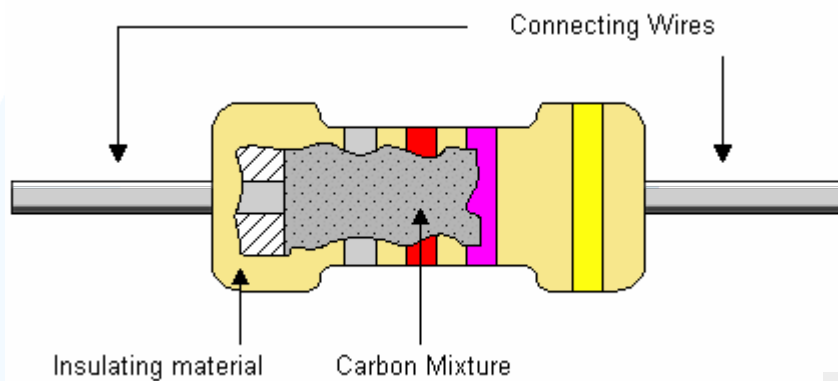
$$Z = R$$



Il comportamento reale presenta un'induttanza (resistori a filo avvolto), una capacità di perdita tra i capi del resistore (di entità molto piccola) l'induttanza e la capacità dei connettori

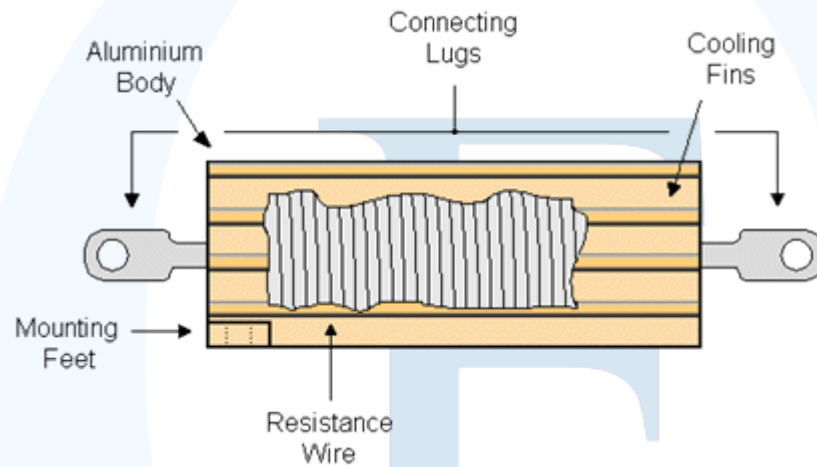
Resistori

Resistori al carbonio



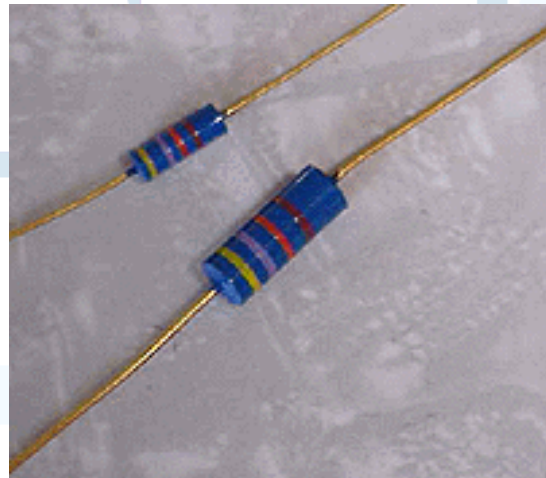
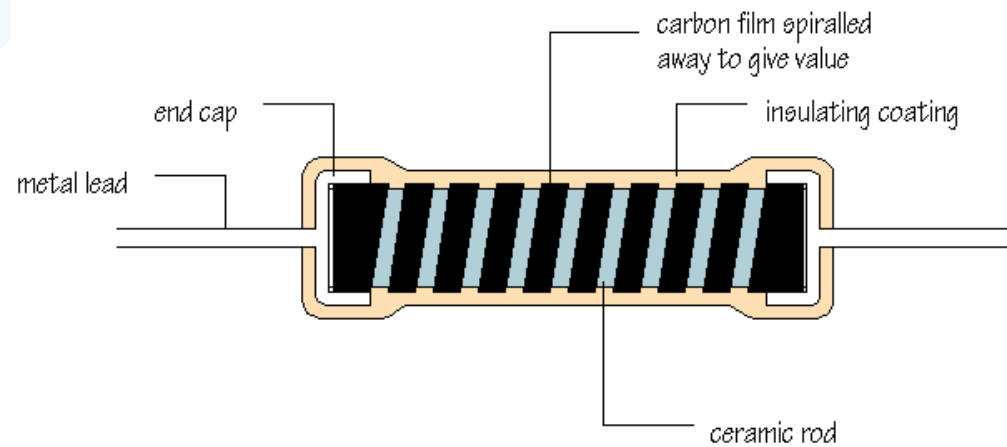
Resistori

Resistori a filo avvolto (wirewound)

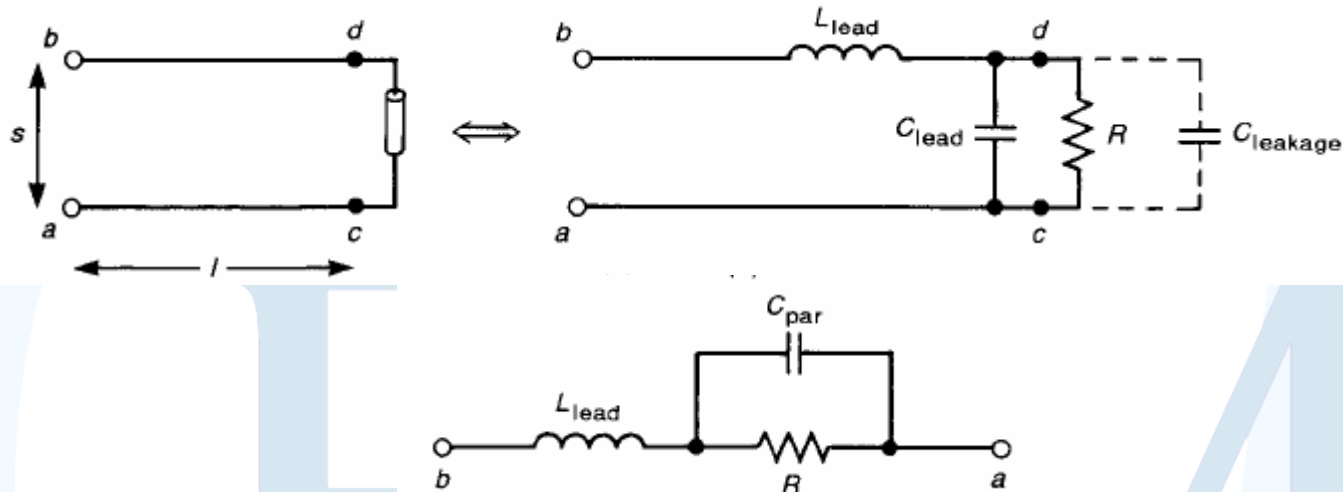


Resistori

Resistori a film resistivo



Resistori



$$C_{par} = C_{lead} + C_{leakage}$$

Per una lunghezza dei conduttori di 0.5 in. conduttori paralleli e mutua distanza di separazione di 0.25 in., con fili gauge 20 ($r_w = 16$ mils)

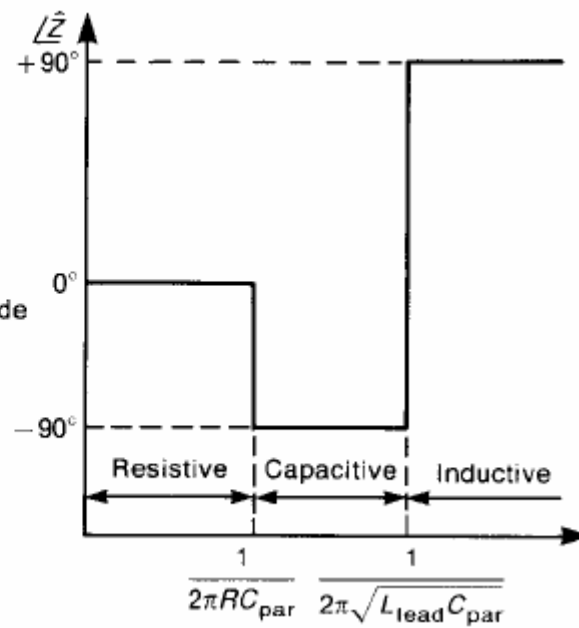
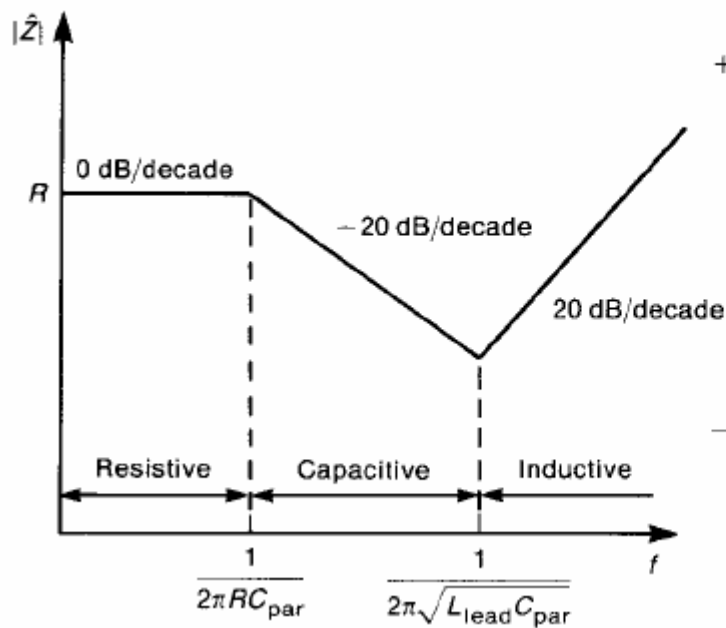
$$C_{par} \cong 1 \div 2 \text{ pF}$$

$$L_{lead} = 14 \text{ nH}$$

Resistori

Risposta in frequenza del modello

$$Z = L_{lead} \frac{\frac{1}{L_{lead} C_{par}} + \frac{j\omega}{RC_{par}} - \omega^2}{j\omega + \frac{1}{RC_{par}}} = \frac{R + j\omega L_{lead} - \omega^2 RC_{par} L_{lead}}{1 + j\omega RC_{par}} \cong R \text{ in bassa frequenza}$$



Resistori

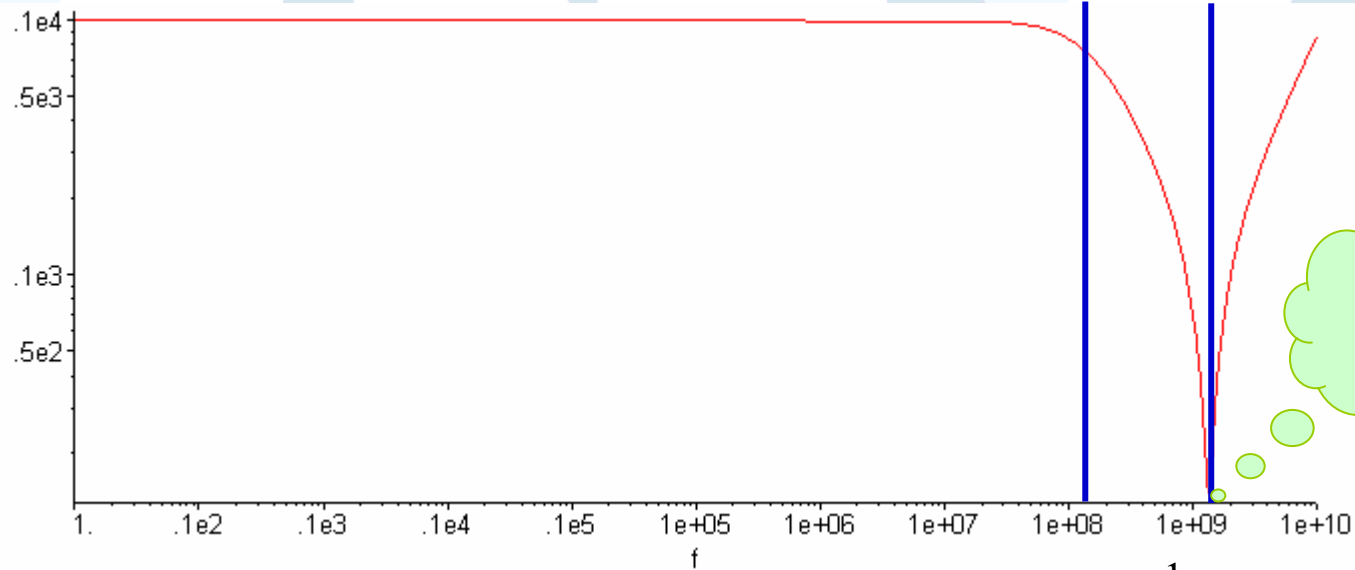
Risposta in frequenza per un resistore

$$R = 1k\Omega$$

$$C_{par} = 1pF$$

$$L_{lead} = 14nH$$

$$\frac{1}{2\pi RC_{par}} = 159MHz$$



$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{lead}C_{par}}} = 1.3GHz$$

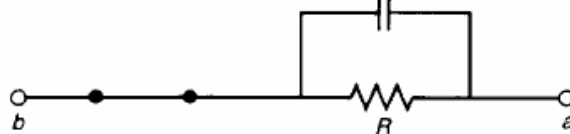
Resistori

Risposta in frequenza del modello: casi limite



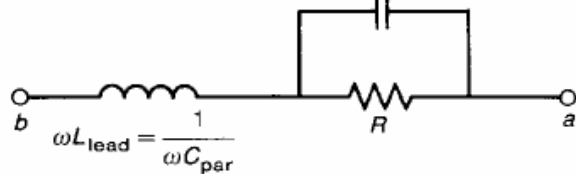
(a) dc

$$\frac{1}{\omega C_{par}} = R$$



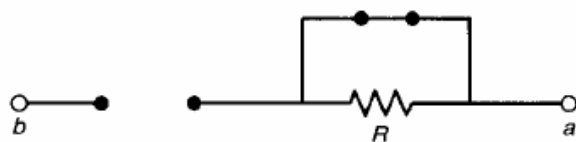
$$(b) f_1 = \frac{1}{2\pi RC_{par}}$$

$$\frac{1}{\omega C_{par}} = \omega L_{lead}$$



$$\omega L_{lead} = \frac{1}{\omega C_{par}}$$

$$(c) f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{lead}C_{par}}}$$



(d) $f \rightarrow \infty$

$$\omega = 0 \rightarrow Z = R$$

$$\omega = \frac{1}{RC_{par}} \rightarrow L_{lead} = 0; \omega C_{par} = \frac{1}{R} \rightarrow Z = \frac{R}{1+j}$$

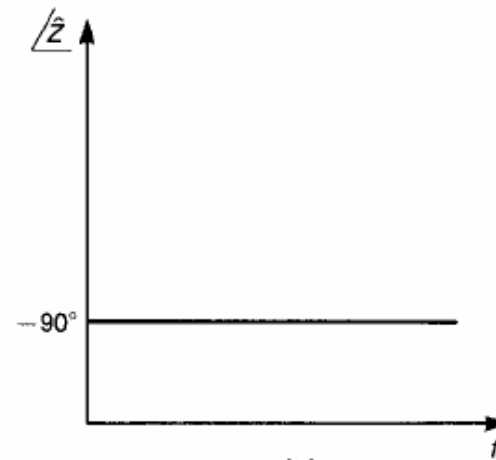
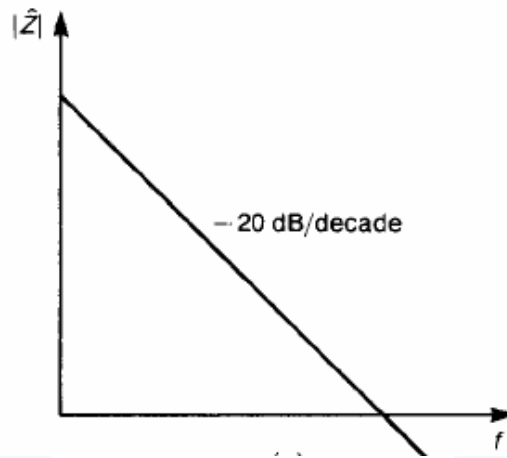
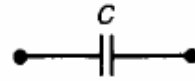
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_{par}L_{lead}}} \rightarrow \frac{1}{\omega C_{par}} = \omega L_{lead} \rightarrow Z = \frac{j\omega L_{lead}}{1+j\omega RC_{par}}$$

$$\omega = \infty \rightarrow Z = \infty$$

Capacitori

Comportamento ideale

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow \begin{cases} |Z| = \frac{1}{2\pi fC} \\ \angle Z = -90^\circ \end{cases}$$



Capacitori



Capacitori ceramici ($1\mu\text{F} - 5\mu\text{F}$) mantengono un comportamento vicino a quello ideale anche per frequenze elevate

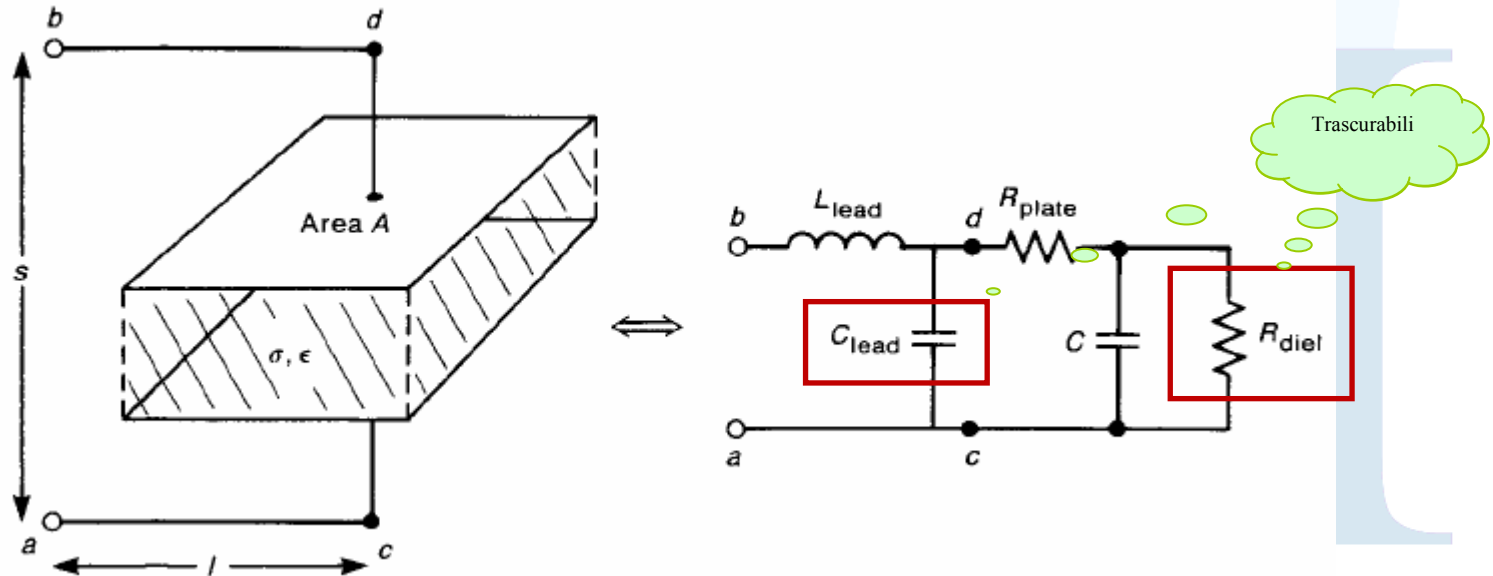
Capacitori elettrolitici al tantalio ($1\mu\text{F} - 1000\mu\text{F}$)



Capacitori

R_{diel} è dovuta alle perdite ohmiche e polarizzazione nel dielettrico (valore molto elevato)

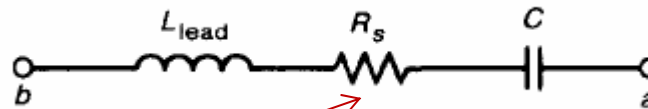
R_{plate} è la resistenza dei piatti del condensatore



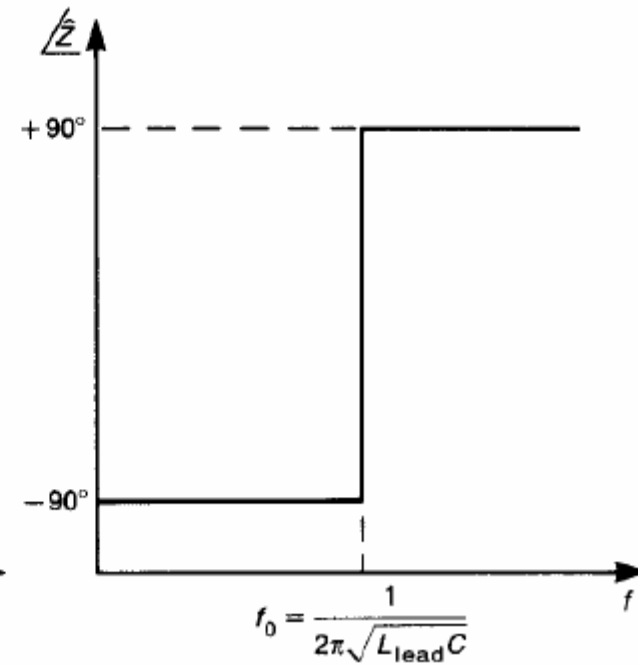
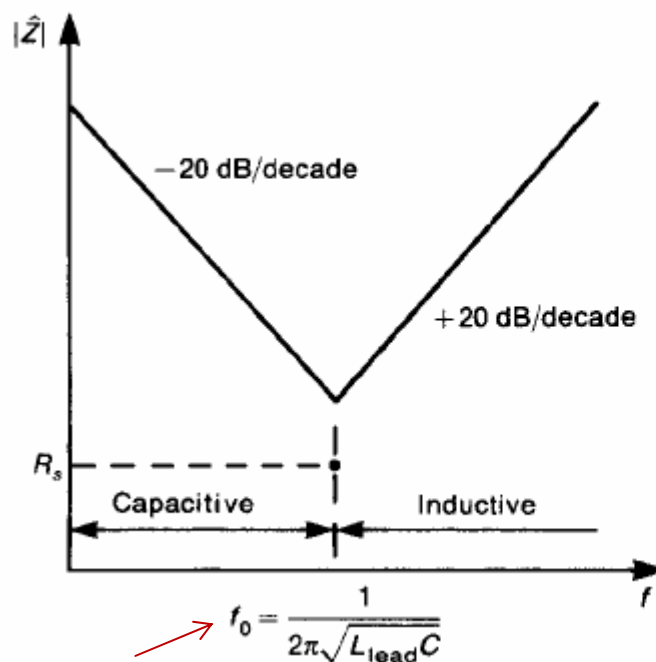
$$Z = L_{lead} \frac{\frac{1}{L_{lead}C} + j\omega \frac{R_s}{L_{lead}} - \omega^2}{j\omega} = \frac{1}{j\omega C} + R_s + j\omega L_{lead} \cong \frac{1}{j\omega C}$$

Capacitori

Risposta in frequenza del modello



ESR (*Equivalent Series Resistance*)



Frequenza di autorisonanza

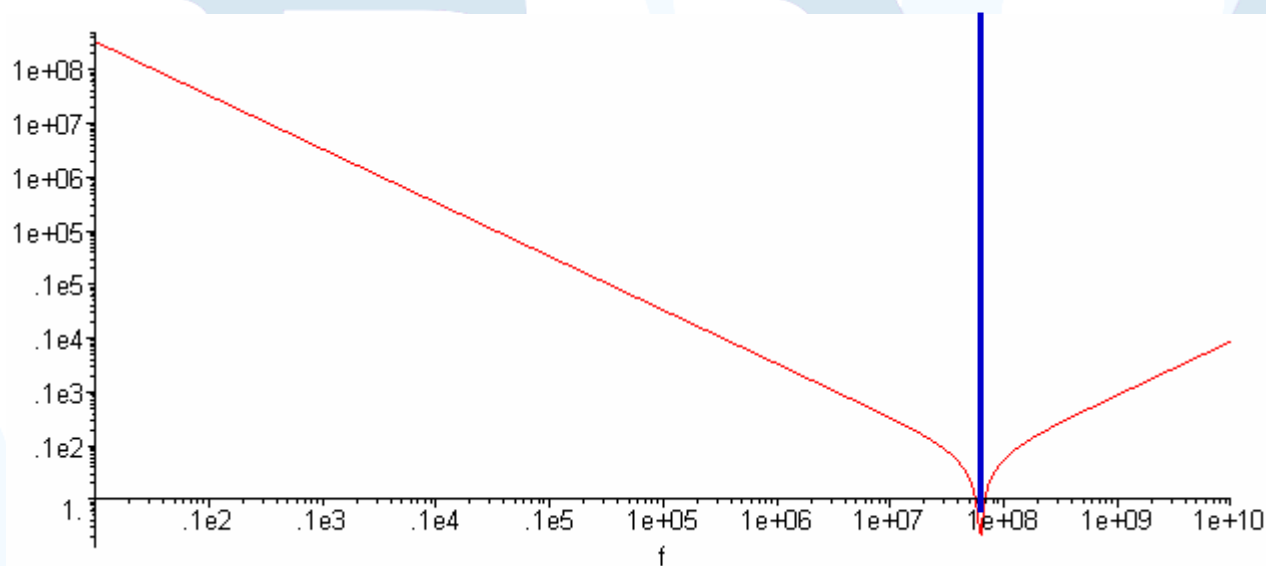
Capacitori

Risposta in frequenza del modello

$$C = 470\text{ pF}$$

$$R_s \cong 4\text{ n}\Omega$$

$$L_{lead} = 14\text{ nH}$$



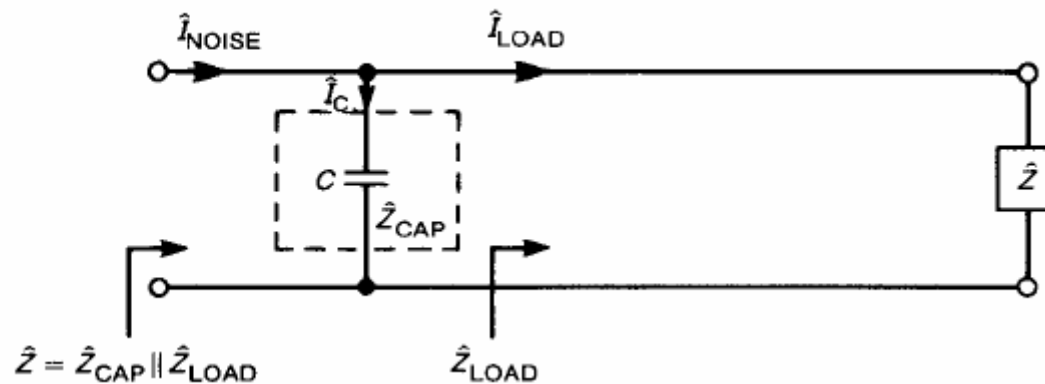
$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{lead}C_{par}}} = 62\text{ MHz}$$

Capacitori

- ❖ Dal punto di vista della EMC, se si impiega un condensatore come elemento a bassa impedenza allo scopo di cortocircuitare le correnti di disturbo verso massa, occorre assicurarsi che la frequenza di lavoro sia inferiore a quella di autorisonanza per evitare che il comportamento reale si discosti troppo da quello ideale
- ❖ A parità di connettori (tipologia, lunghezza e spaziatura) più grande è la capacità del condensatore più bassa è la frequenza di autorisonanza

Capacitori

- ❖ Soppressione delle correnti di disturbo con capacitore in parallelo



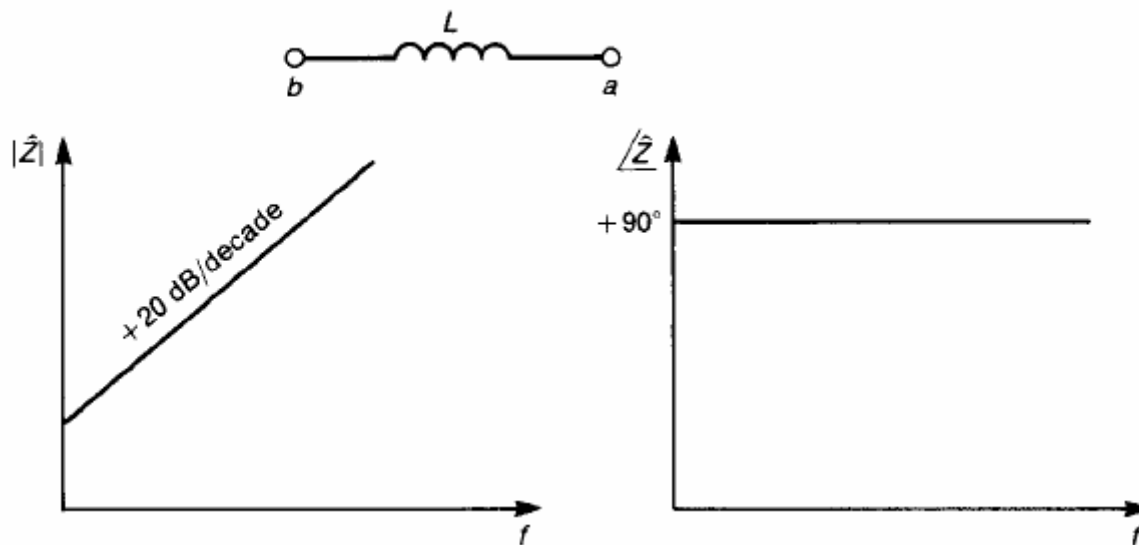
$$I_C = \frac{Z_L}{Z_C + Z_L} I_{Noise}$$

- ❖ Dal punto di vista della EMC il condensatore in parallelo è efficace solo se l'impedenza di carico è molto maggiore dell'impedenza del condensatore.

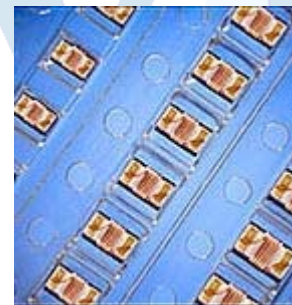
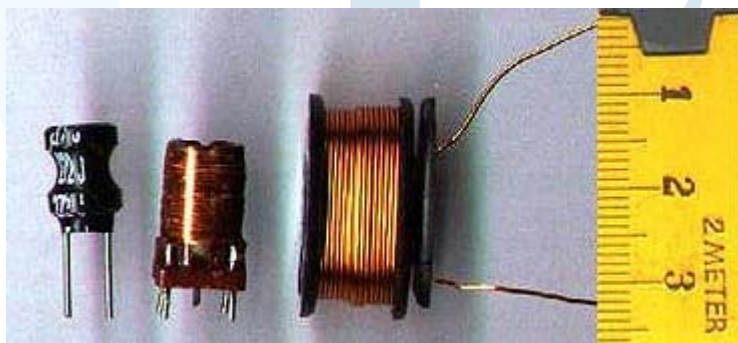
Induttori

Comportamento ideale

$$Z = j\omega L \rightarrow \begin{cases} |Z| = 2\pi fL \\ \angle Z = 90^\circ \end{cases}$$

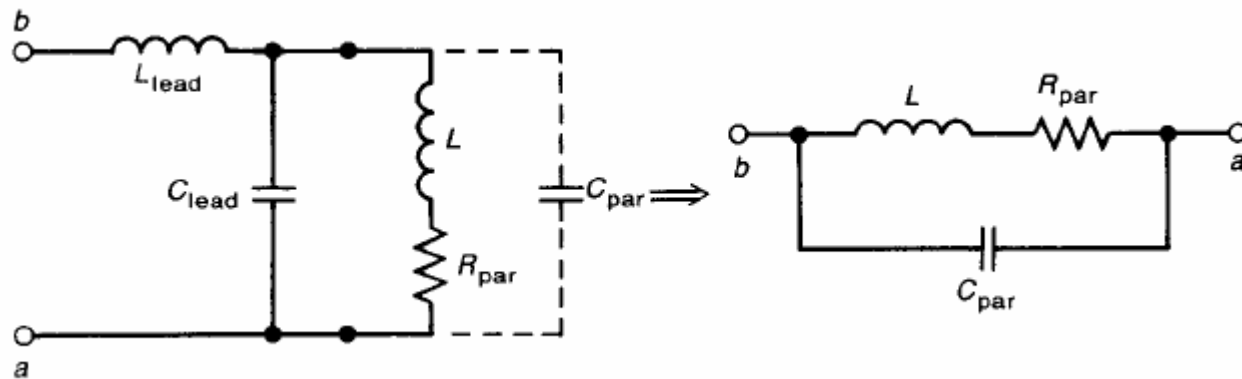


Induttori



Induttori

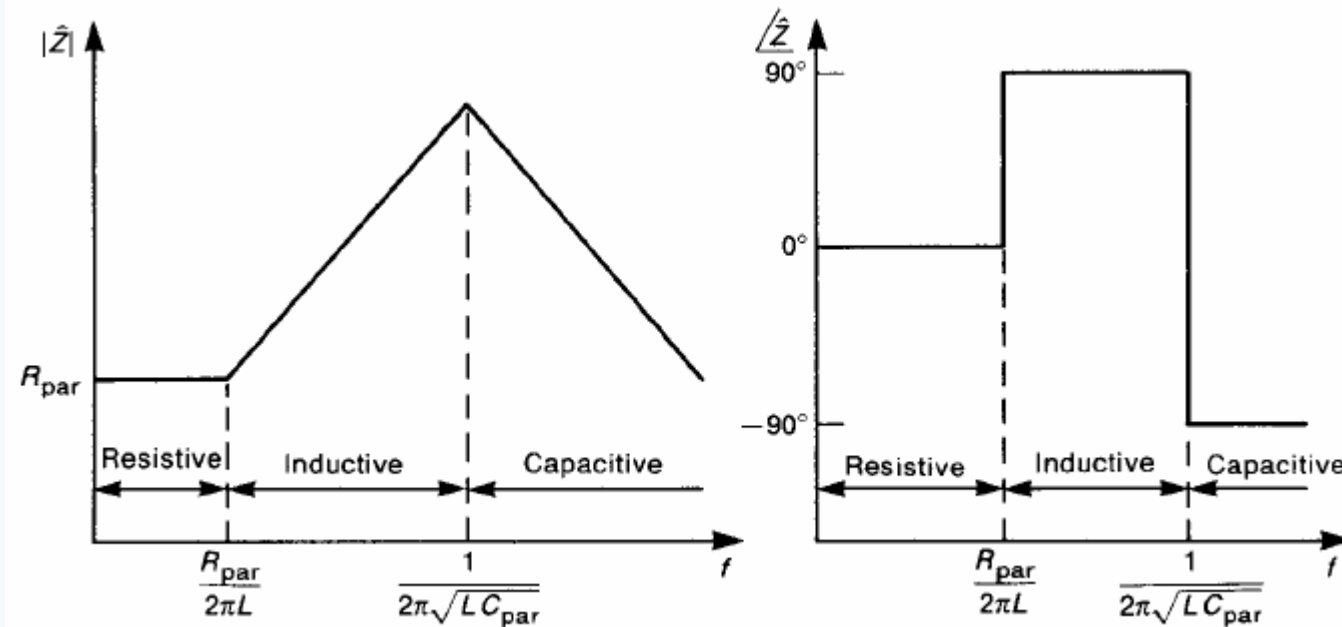
Comportamento reale e risposta in frequenza del modello



$$Z = R_{par} \frac{1 + \frac{j\omega L}{R_{par}}}{1 + j\omega R_{par} C_{par} - \omega^2 L C_{par}} = \frac{R_{par} + j\omega L}{1 + j\omega R_{par} C_{par} - \omega^2 L C_{par}} \cong j\omega L \text{ in bassa frequenza}$$

Induttori

Risposta in frequenza del modello



↑
Frequenza di autorisonanza

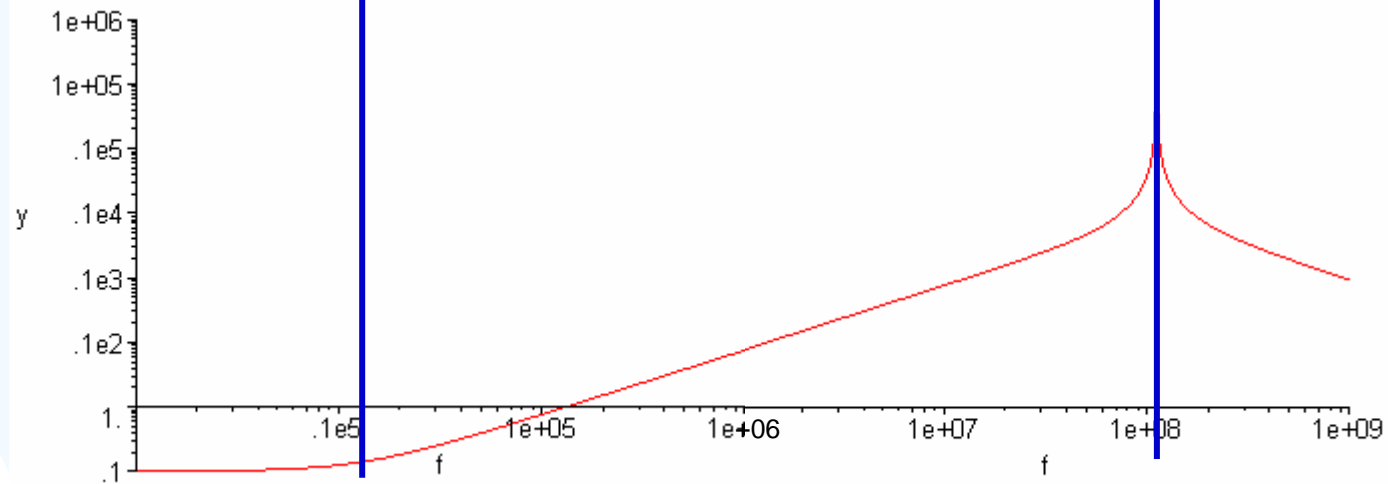
Induttori

Risposta in frequenza del modello

$$L = 1.2 \mu H$$

$$R_{par} = 0.1 \Omega$$

$$C_{par} = 1.7 pF$$



$$\frac{R_{par}}{2\pi L} = 13 kHz$$

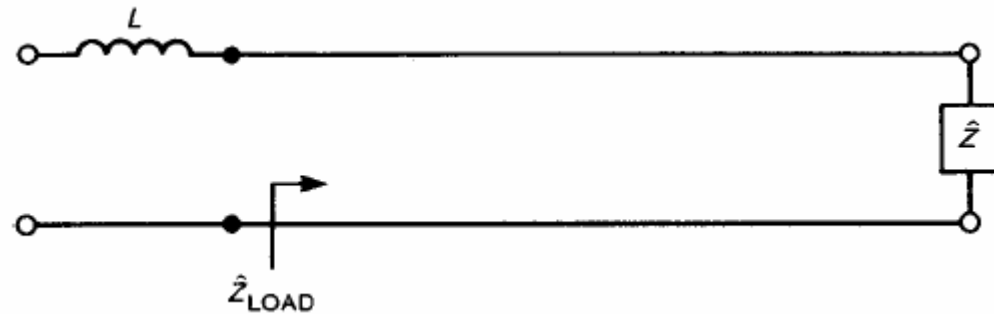
$$\frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{par}}} = 111 MHz$$

Induttori

- ❖ Nella pratica occorre assicurarsi che la frequenza di lavoro sia inferiore a quella di autorisonanza per evitare che il comportamento reale si discosti troppo da quello ideale
- ❖ A parità di connettori (tipologia, lunghezza e spaziatura) più grande è l'induttanza dell'induttore più bassa è la frequenza di autorisonanza

Induttori

- ❖ Soppressione delle correnti di disturbo (bloccaggio) con induttore in serie



- ❖ Là dove il capacitore parallelo cortocircuita il disturbo e protegge il carico, l'induttore serie blocca il disturbo presentando un'alta impedenza. Affinchè il blocco sia efficace l'impedenza dell'induttore deve essere superiore a quella del carico
- ❖ Quindi l'induttore serie è efficace per carichi a bassa impedenza e inefficace per I carichi ad alta impedenza
- ❖ Condizione duale rispetto al capacitore.