

# Disturbi e schermature

## Introduzione

Cause di degrado di un segnale:

- il **rumore**, un contributo legato alla fisica del moto dei portatori di carica nei dispositivi, descritto da leggi statistiche;
  - Filtraggio
  - Adeguato progetto dell'elettronica
- i **disturbi**, dovuti ad accoppiamenti elettromagnetici o condotti con segnali provenienti da altri dispositivi.
  - Filtraggio selettivo
  - Adeguato progetto delle connessioni elettriche
  - Schermatura

## Tipologie di disturbi

### ● disturbi condotti

- tipicamente dovuti a correnti che scorrono in conduttori comuni

### ● accoppiamenti capacitivi

- dovuti a campi elettrici variabili che inducono correnti

### ● accoppiamenti induttivi

- dovuti a campi magnetici variabili che inducono tensioni

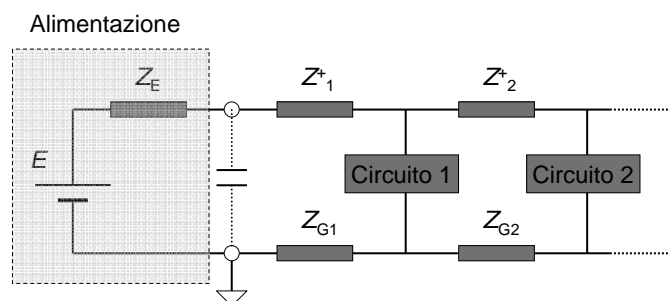
### ● accoppiamenti per radiazione

- dovuti alla propagazione di campi elettromagnetici

3

## Disturbi condotti

- Due circuiti con impedenze o tratti di conduttore in comune possono interferire tra di loro, in quanto la **corrente in un circuito** può generare una **tensione sull'altro**.
- Tipicamente questi tratti di conduttore in comune riguardano le alimentazioni e le connessioni di massa.



4

## Induttanza di un filo

- Le impedenze in gioco sono tipicamente dei banali fili, la cui componente induttiva però cresce di importanza all'aumentare della frequenza
- Per stimare un ordine di grandezza di questa tipologia di disturbi, consideriamo l'induttanza  $L$  per unità di lunghezza  $l$  di un filo a sezione circolare di diametro  $d$  e la sua resistenza  $R$

$$\frac{L}{l} \approx 2 \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu_r}{4} + \frac{0.778d}{2l} \right) \text{nH/cm} \quad R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{\pi d^2 / 4}$$

- Regola "a spanne": l'induttanza di una connessione è dell'ordine di 10 nH/cm
- Per un filo di rame (permeabilità magnetica relativa  $\mu_r=1$ , conducibilità  $\sigma = 58 \cdot 10^6$  S/m) di diametro 1 mm e lunghezza 20 cm, otteniamo  $L \cong 240$  nH, mentre la sua resistenza vale  $R \cong 4.4$  m $\Omega$ . Il valore di impedenza del filo, ad esempio alla frequenza di 10 MHz, vale

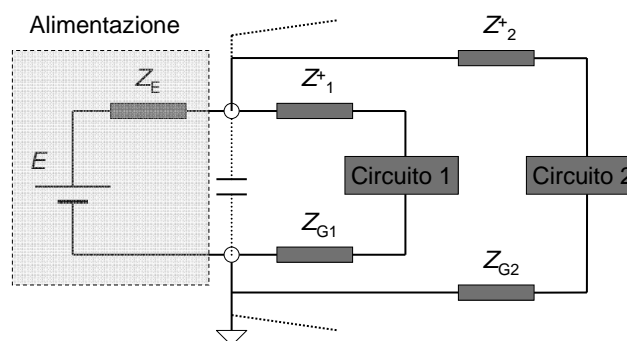
$$|Z| = |R + j\omega L| = \sqrt{(4.4 \cdot 10^{-3})^2 + (\pi \cdot 10^7 \cdot 240 \cdot 10^{-9})^2} \cong 7.5 \Omega$$

- Questo significa che se il circuito precedente ha un transitorio di corrente con frequenza di 10 MHz e ampiezza ad esempio di 10 mA, (un'onda quadra, con tempo di salita di circa 35 ns), sulle alimentazioni del circuito 2 compare un picco di tensione (*spike*) di ampiezza  $V = |Z \cdot I| \cong 75$  mV.

5

## Disturbi condotti

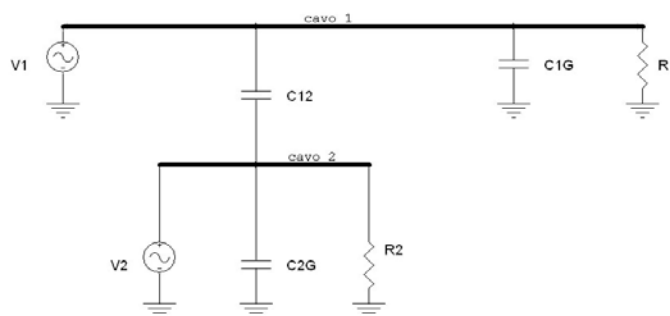
- La connessione corretta per minimizzare questa tipologia di disturbi è a stella
- è necessario separare accuratamente le alimentazioni di circuiti che potrebbero disturbarsi, ad esempio la parte analogica e la parte digitale.



6

## Accoppiamento capacitivo

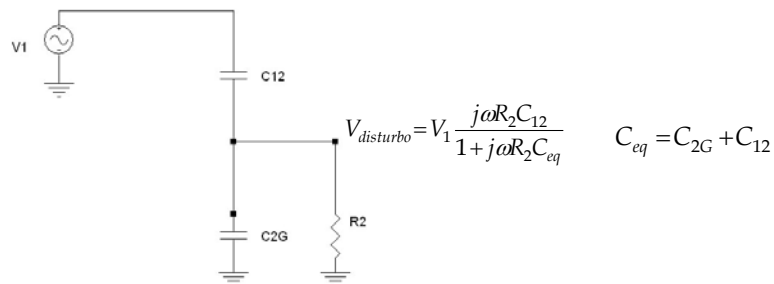
- Accoppiamento di tipo capacitivo: c'è una capacità parassita tra due cavi e perciò si ha un accoppiamento del campo elettrico, la cui variazione induce una corrente nel circuito disturbato
- Esempio : due conduttori affacciati.
  - Ogni cavo presenta una capacità parassita verso massa,  $C_{1G}$  e  $C_{2G}$ , oltre a una capacità mutua fra i cavi,  $C_{12}$



7

## Accoppiamento capacitivo

- La tensione di disturbo ai capi del resistore  $R_2$  dipende dalla tensione  $V_1$  ripartita attraverso i condensatori  $C_{12}$  e  $C_{2G}$



- Il trasferimento è perciò quello tipico di un filtro passa-alto (detto *cross-talk* capacitivo).
- frequenza di *corner*  $f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_{eq}}$

8

## Accoppiamento capacitivo

- L'entità del disturbo decresce al diminuire della capacità di accoppiamento tra i fili  $C_{12}$ 
  - si può ridurre aumentando la distanza tra i cavi o variando la geometria del sistema.
- Una ulteriore soluzione per minimizzare il disturbo può essere quella di aumentare  $C_{2G}$ ; ma questa scelta implica una diminuzione della banda del circuito 2, pertanto spesso non è una via praticabile.
- Schermatura
- L'accoppiamento capacitivo induce un disturbo di **corrente**, per cui è particolarmente dannoso per circuiti ad alta impedenza (grandi valori di  $R_2$ , ad esempio l'ingresso di un amplificatore di tensione), mentre può essere spesso meno importante per circuiti a bassa impedenza (ad esempio adattati a  $50 \Omega$ ).
- La capacità mutua per unità di lunghezza  $l$ , tra due conduttori a sezione circolare di raggio  $r$  posti a distanza  $d$ , vale

$$\frac{C_{12}}{l} = \frac{2\pi\epsilon}{\operatorname{arcosh}\left[\frac{(2d)^2 - 2r^2}{2r^2}\right]}$$

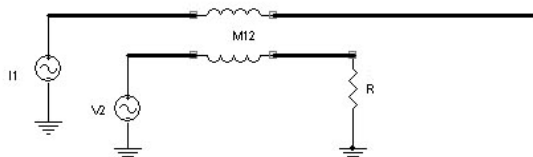
- **la capacità di un cavo vale all'incirca 100 pF/m**

9

## Accoppiamento induttivo

- Nasce quando in un circuito chiuso scorre una corrente, perciò si produce un **flusso magnetico** che si concatena a causa di una mutua induttanza su un altro circuito, inducendo un disturbo in **tensione**.
- Consideriamo un generico accoppiamento: un conduttore percorso da una corrente  $I_1$  agisce da generatore di disturbo per un secondo circuito, attraverso una mutua induttanza  $M_{12}$ .
- La tensione di disturbo che si genera ai capi dell'induttore del circuito 2, e che perciò è in serie alla sorgente di tensione  $V_2$  di questo circuito, è pari a:

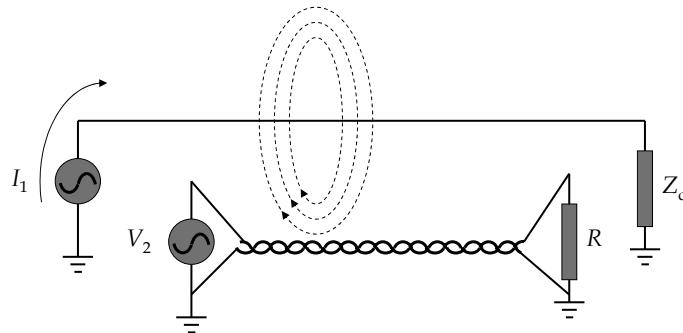
$$V_{\text{disturbo}} = j\omega M_{12} I_1$$



10

## Accoppiamento induttivo

- Convienne rendere il più piccolo possibile il parametro  $M_{12}$ 
  - dipende fortemente dalla disposizione geometrica dei conduttori.
  - l'indicazione di massima è di porre i fili o le piste il più distante possibile e possibilmente perpendicolari tra loro.
- Intrecciare i conduttori del circuito da proteggere
  - spire adiacenti concatenano flussi di intensità comparabile ma con verso opposto, portando a un accoppiamento totale praticamente nullo.
  - buona immunità ai disturbi di tipo induttivo;
  - soluzione è molto usata nella pratica (doppino telefonico, RS-485, USB).

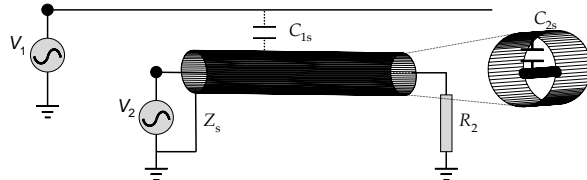


## Accoppiamento per radiazione

- Gli accoppiamenti di tipo capacitivo ed induttivo sono stati studiati ricorrendo all'ipotesi semplificativa di campo vicino, (dimensioni geometriche  $\ll \lambda$ ).
- Esempio  $f=1$  MHz  $\rightarrow \lambda = c / f \cong 300$  m ( $c$  è la velocità della luce nel vuoto).
- Per frequenze superiori alle decine di MHz è facile trovarsi in un regime di **radiazione**, in cui l'onda elettromagnetica si propaga, portando con se un trasferimento di potenza (al contrario del regime di campo vicino in cui i campi sono solo reattivi).
- I circuiti elettronici in questo caso possono essere visti come delle antenne, più o meno efficienti, che ricevono o emettono segnali elettromagnetici radiati, che per i circuiti stessi rappresentano dei disturbi.
- Un metodo usato nel calcolo dell'emissione irradiata da un filo è basato sull'uso delle equazioni dei campi generati da un dipolo elettrico.
- Una regola generale per diminuire i disturbi radiati è sempre quella di diminuire le lunghezze dei conduttori (e quindi le dimensioni dei circuiti), diminuendo così l'efficienza delle antenne parassite.

## Schermature

- Per diminuire gli accoppiamenti -> cavi e conduttori schermati.
- Essi sono costituiti da un cavo avvolto da uno schermo, formato tipicamente da una maglia metallica data dall'intreccio di molti fili.

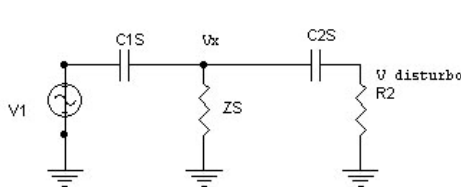


- Ponendo la calza dello schermo a massa, si riesce idealmente a disaccoppiare i circuiti 1 e 2, cioè a fare in modo che la tensione generata dal primo non influenzi quella del secondo, in quanto l'accoppiamento capacitivo cade interamente sullo schermo, che va a massa con impedenza nulla, quindi non esibisce tensioni causate dalle correnti indotte.

13

## Schermature accoppiamento capacitivo

- Nel caso reale lo schermo è connesso a massa con una sua impedenza  $Z_s$ , che dipende sia dalla resistenza che dall'induttanza dello schermo stesso.
- È necessario inoltre considerare l'accoppiamento dello schermo sia con il circuito disturbante che con quello disturbato. Schematizziamo quindi con  $C_{1s}$  la capacità tra schermo e circuito disturbante e con  $C_{2s}$  la capacità tra lo schermo e il conduttore contenuto.



$$Z_s \ll R_2 + \frac{1}{j\omega C_{2s}} \Rightarrow V_x \cong V_1 \frac{Z_s}{Z_s + \frac{1}{j\omega C_{1s}}}$$

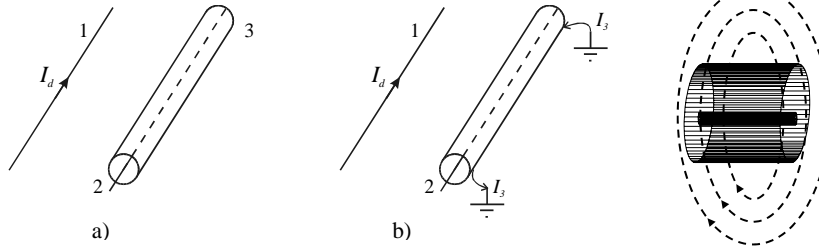
$$V_{\text{disturbo}} = V_x \frac{R_2}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_{2s}}} \cong V_1 \frac{R_2}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_{2s}}} \frac{Z_s}{Z_s + \frac{1}{j\omega C_{1s}}}$$

- Se l'impedenza dello schermo è trascurabile  $Z_s = R_s + j\omega L_s \ll \frac{1}{j\omega C_{1s}}$   
 $V_x$  e quindi  $V_{\text{disturbo}}$  tendono ad essere nulle

- Va precisato che è bene **porre lo schermo a massa da un solo lato** 14

## Schermature accoppiamento induttivo

- Effetto di uno **schermo** in caso di **accoppiamento induttivo**, tra un conduttore non schermato (cavo 1) percorso da corrente ed un conduttore (cavo 2) con schermo (3)



- Poiché un tubo cilindrico (lo schermo) percorso da corrente non crea campo magnetico al suo interno, tutte le linee di campo generate dallo schermo circondano anche il conduttore 2.
- Pertanto  $M_{23}$  tra il conduttore 2 e lo schermo coincide con l'autoinduttanza  $L_3$  dello schermo stesso

15

## Schermature: accoppiamento induttivo

- Considerando trascurabile il flusso generato dalla corrente in 1 all'interno dello schermo (diametro dello schermo piccolo rispetto alla distanza tra i conduttori 1 e 2), si ottiene anche che la mutua induttanza tra conduttore 1 e schermo è all'incirca uguale alla mutua induttanza tra conduttore 1 e conduttore 2:  $M_{13} \cong M_{12}$

- Se 2 e 3 sono tra loro non raccordati avremo sui due conduttori delle tensioni indotte  $V_{20}$  e  $V_{30}$  proporzionali alle loro mutue induttanze con il conduttore 1 e alla corrente  $I_d$ , in particolare

$$V_{20} = j\omega M_{12} I_d \quad V_{30} = j\omega M_{13} I_d$$

- Se gli estremi dello schermo vengono collegati entrambi a massa, risulterà che la tensione ai capi dello schermo deve essere nulla, per cui

$$j\omega M_{13} I_d - (R_3 + j\omega L_3) I_3 = 0$$

- avendo supposta nulla l'impedenza del circuito di terra ed essendo  $R_3$  ed  $L_3$  resistenza e autoinduttanza dello schermo.

- Su 2, cavo schermato, si avrà pertanto una tensione indotta

$$V_2 = j\omega M_{12} I_d - j\omega M_{23} I_3$$

- ove come già detto  $M_{23} = L_3$ .

16



## Schermature: accoppiamento induttivo

- Per sostituzione si ottiene quindi la tensione di disturbo sul cavo schermato

$$V_2 = j\omega M_{12} I_d \left( 1 - \frac{j\omega M_{13} M_{23} / M_{12}}{R_3 + j\omega L_3} \right) =$$

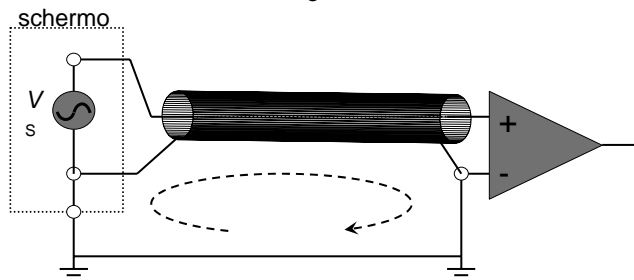
$$= j\omega M_{12} I_d \left( 1 - \frac{j\omega L_3}{R_3 + j\omega L_3} \right) = V_{20} \left( \frac{1}{1 + j\omega \frac{L_3}{R_3}} \right)$$

- $V_{20}$  = tensione che ci sarebbe sul conduttore 2 senza schermo
- La schermatura ha il comportamento di un sistema del primo ordine passa-alto con pulsazione di taglio  $\omega_c = R_3 / L_3$  (~10 kHz).
- Il valore di  $V_2$  cresce con  $\omega$  fino al valore asintotico  $|V_{2\infty}| = M_{12} |I_d| R_3 / L_3$
- Per ridurre  $V_2$  si può
  - diminuire  $M_{12}$ , (come già si faceva in assenza di schermo),
  - introdurre uno schermo di materiale ferromagnetico, ad alta permeabilità
  - abbassare  $\omega_c$  aumentando la sezione della calza (riduzione di  $R_3$ ) e/o accrescendone l'autoinduttanza con l'aggiunta di una calza ad alta permeabilità

17

## Collegamenti di massa

- Oltre ai disturbi condotti, una scorretta messa a massa di un circuito può portare ad accoppiamenti (tipicamente induttivo) chiamati “**giri di massa**”.
  - percorsi chiusi di connessione a massa: questi percorsi formano delle maglie (di solito di grande area) con cui si possono accoppiare i campi magnetici variabili, che inducono una forza elettromotrice all'interno della maglia di massa e quindi una corrente. Questa corrente a sua volta può generare altre tensioni indotte all'interno del circuito e conseguentemente disturbi.

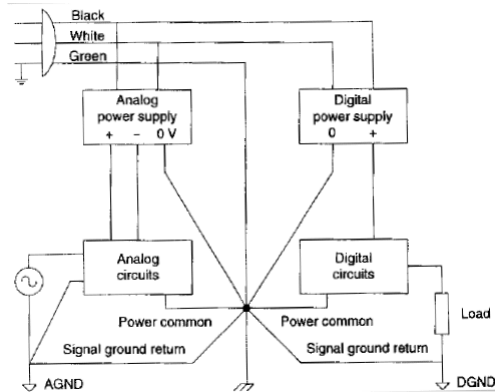


- Un esempio tipico di giro di massa:
  - Il generatore è chiuso in un contenitore, che **deve essere messo a terra per motivi di sicurezza**.
  - Errata connessione a terra sia dal lato generatore che la dato ricevitore.
  - Questo anello ha un'area spesso considerevole

18

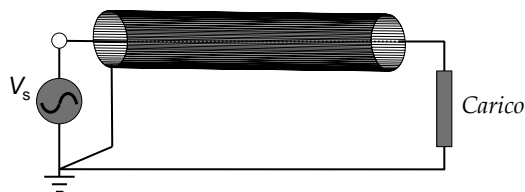
## Corretta connessione a massa

- Oltre agli accoppiamenti induttivi, i problemi derivanti dai giri di massa riguardano anche la possibilità che le varie masse non siano esattamente allo stesso potenziale.
  - particolarmente fastidiosa in quanto il percorso di massa è normalmente a bassa impedenza, per cui anche piccole variazioni di tensione possono indurre elevate correnti, che quindi inducono intensi campi magnetici di disturbo.
- Per evitare questi problemi di “giri di massa”, è buona norma connettere gli schermi a terra solo da un lato
- Oltre ai giri di massa è necessario evitare anche i disturbi di tipo condotto
- tipologia “a stella”
  - un unico punto di messa a massa
- due separate alimentazioni e due separati ritorni di massa (*Analog Ground* e *Digital Ground*)
- Ogni circuito è quindi connesso alla terra con una connessione a stella attraverso conduttori a bassa impedenza

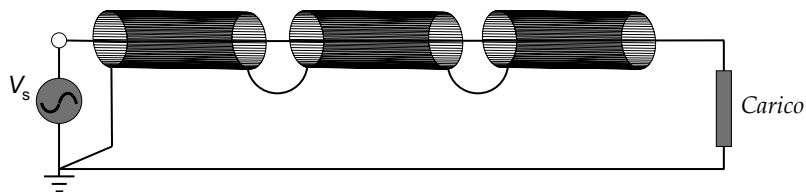


## Connessione di uno schermo

- Di norma lo schermo deve essere connesso al potenziale di riferimento (normalmente massa) del generatore di segnale



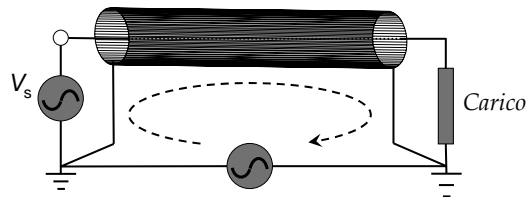
- Nel caso di più spezzoni di schermo, la connessione deve essere effettuata in serie, con un solo collegamento iniziale alla massa



20

## Connessione di uno schermo

- Se si hanno più segnali da trasmettere, ciascuno schermo deve essere connesso direttamente al potenziale di riferimento del corrispondente segnale, per evitare che lo schermo esibisca un segnale rispetto al proprio conduttore.
- Tipicamente non bisogna connettere entrambe le terminazioni dello schermo a terra. L'eventuale differenza di potenziale tra le terre differenti causerebbe una corrente nello schermo (giro di massa)

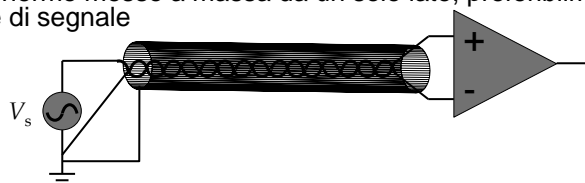


- Ricordando però che uno schermo è efficace contro i campi magnetici solo se in esso può scorrere una corrente, è possibile connettere il secondo estremo dello schermo a terra tramite un condensatore. In questo modo si evitano giri di massa, inoltre lo schermo ai disturbi induttivi resta valido, dato che comunque la schermatura ai campi magnetici è valida solo per alte frequenze

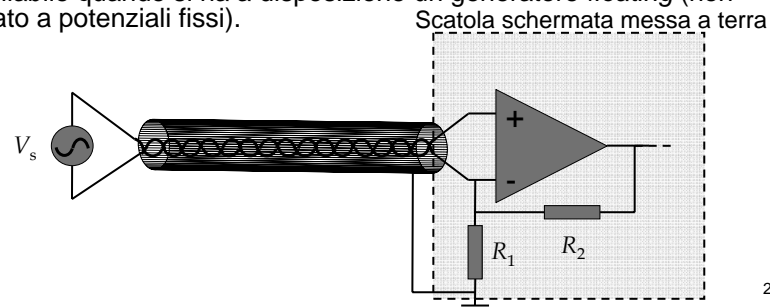
21

## Connessione di uno schermo

- Tipicamente una buona soluzione per la trasmissione di segnali a basse frequenze (fino a circa 10 MHz) è l'utilizzo di una coppia di cavi intrecciati, con uno schermo messo a massa da un solo lato, preferibilmente il lato del generatore di segnale



- La connessione dello schermo al lato di lettura del segnale è invece consigliabile quando si ha a disposizione un generatore *floating* (non vincolato a potenziali fissi).



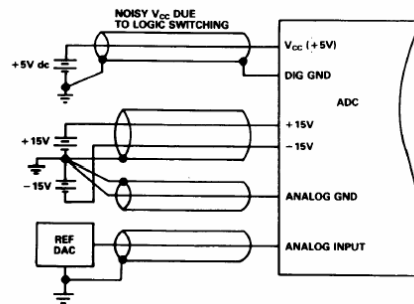
22

## Connessione di uno schermo

- Per quanto riguarda infine la schermatura delle **sorgenti di disturbo**, quindi con elevate correnti e veloci transitori (tipicamente circuiti digitali), è conveniente invece portare la corrente di ritorno attraverso lo stesso schermo.
- In questo caso lo scopo non è proteggere la sorgente di disturbo, ma i restanti circuiti. Se la corrente dello schermo è uguale e opposta a quella del conduttore centrale, i campi magnetici generati dal conduttore e dallo schermo si possono elidere, producendo un campo netto nullo. In questo caso, che viola la regola di non avere corrente nello schermo, la geometria della calza esterna non è utilizzata per schermare, ma per realizzare una cancellazione di campo magnetico.

Esempio di connessioni schermate

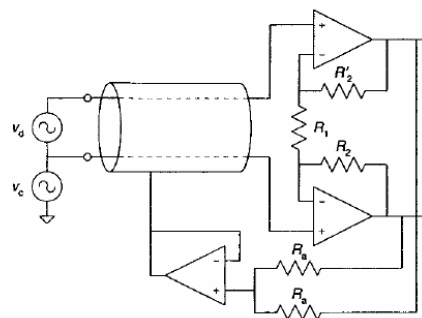
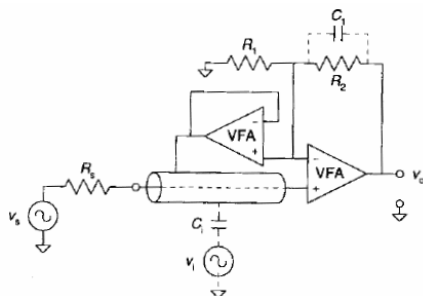
- il primo conduttore, che porta l'alimentazione alla parte digitale, viene schermato con una calza che fa anche da conduttore per la corrente di ritorno, chiusa sulla massa digitale
- i conduttori centrali portano le alimentazioni analogiche, con schermo connesso ad un solo lato dalla parte della sorgente
- il segnale analogico è schermato con una calza connessa a massa solo dal lato del generatore.



43

## Guardie

- La **schermatura elettrica**, oltre all'aumento dei costi economici, comporta anche dei **costi circuitali**.
- La **capacità tra il conduttore schermato e lo schermo** è infatti abbastanza elevata, data la loro prossimità.
- Lo schermo implica una capacità in parallelo che può generare un filtraggio passa-basso, in funzione dell'impedenza del generatore di segnale.
- La tecnica di **guardia** consiste nel **connettere lo schermo** a un **potenziale uguale al modo comune del segnale** schermato, utilizzando un amplificatore a bassa impedenza



44