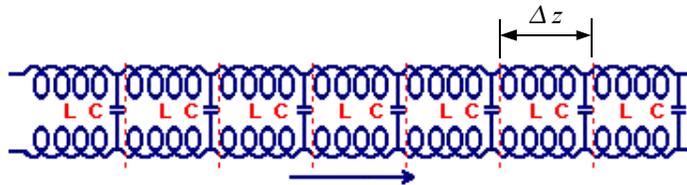
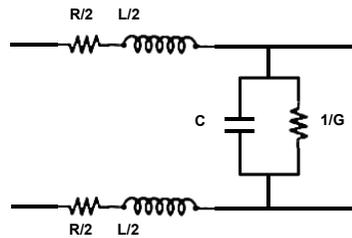


Cavi

Propagazione dei segnali nei cavi

Un elemento di cavo di lunghezza Δz può essere rappresentato da un circuito equivalente costituito da una induttanza L e una capacità C , accompagnate da una resistenza R e da una conduttanza G .



PGI 2005 lect_4A 1

Tensione V e corrente I variano attraverso l'elemento di cavo:

$$\Delta V(z,t) = -R \Delta z I(z,t) - L \Delta z \frac{\partial I}{\partial t}(z,t)$$

$$\Delta I(z,t) = -G \Delta z V(z,t) - C \Delta z \frac{\partial V}{\partial t}(z,t)$$

Dividendo per Δz si ottengono le equazioni:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -GV - C \frac{\partial V}{\partial t}$$

Differenziando rispetto a z e a t rispettivamente e sostituendo:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial V}{\partial t} + RGV \quad (1)$$

L'equazione (1) è l' "equazione dei telegrafi"

PGI 2005 lect_4A 2

Se le perdite ohmiche e nel dielettrico sono nulle, si ottiene l'equazione della propagazione ondosa,

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2)$$

con **velocità di propagazione** $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Si può pensare a una soluzione della (2) in serie di Fourier: per ogni frequenza ω si ha per V e per I una soluzione del tipo

$$V(z,t) = V(z) \exp(i\omega t)$$

PGI 2005 lect_4A 3

L'**impedenza caratteristica** in ogni punto del cavo è data dal rapporto

$$Z = \frac{V(z)}{I(z)} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Soluzioni della (1), in presenza di perdite, si propagano

con la stessa velocità $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$,

ma con un'**impedenza caratteristica** $Z = \frac{V(z)}{I(z)} = \sqrt{\frac{R+i\omega L}{G+i\omega C}}$

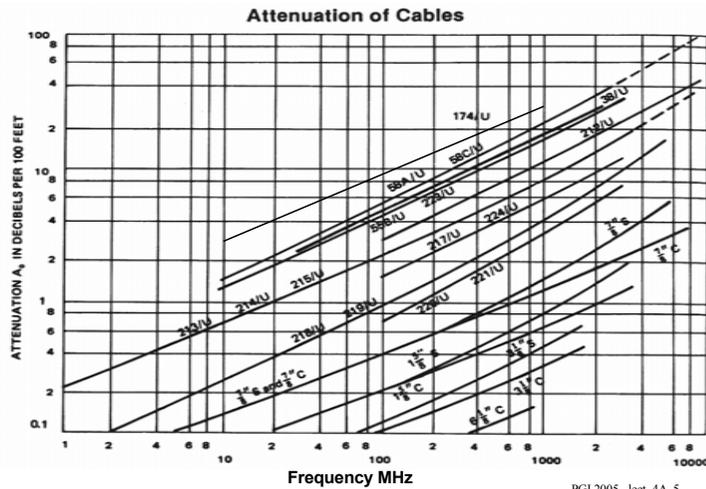
e un'**attenuazione esponenziale** lungo il cavo $\exp(-\alpha z)$.

Ad alta frequenza $Z = \sqrt{L/C}$ e $\alpha = \frac{1}{2}(R\sqrt{C/L} + G\sqrt{L/C})$

se R e G sono piccoli

PGI 2005 lect_4A 4

In cavi reali R aumenta come $\sqrt{\omega}$ a causa dello *skin effect* nei conduttori e G aumenta come ω a causa delle perdite nel dielettrico.



PGI2005 lect_4A 5

Decibel dB

In ampiezza, per esempio **tensione**:

$$20 \log\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

In intensità, **potenza**:

$$10 \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Voltage ratio	Power ratio	- dB +	Voltage ratio	Power ratio
1	1	0	1	1
0.99	0.98	0.1	1.01	1.02
0.94	0.89	0.5	1.06	1.12
0.89	0.79	1	1.12	1.26
0.84	0.71	1.5	1.19	1.41
0.79	0.63	2	1.26	1.59
0.75	0.56	2.5	1.33	1.78
0.71	0.5	3	1.41	2
0.63	0.4	4	1.59	2.51
0.56	0.32	5	1.78	3.16
0.5	0.25	6	2	4
0.45	0.2	7	2.24	5.01
0.4	0.16	8	2.51	6.31
0.32	0.1	10	3.16	10
0.25	0.06	12	4	16
0.2	0.04	14	5	25
0.14	0.02	17	7.08	50.1
0.1	0.01	20	10	100

PGI2005 lect_4A 6

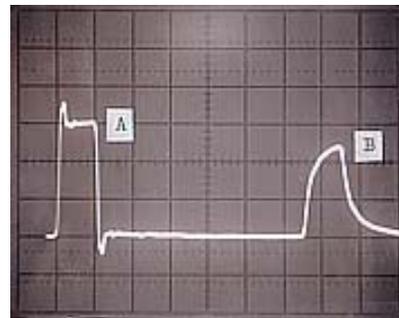
Distorsione dei segnali

Le perdite influenzano in modo diverso le varie frequenze e il segnale si deforma

Effetti sul tempo di salita e sull'ampiezza

A - Impulso di ingresso, *width* ~100 ns

B - Impulso dopo 128 m di RG58, misurato con un TDR (*Time Domain Reflectometer*) dopo riflessione all'estremità in circuito aperto



PGI2005 lect_4A 7

Cavo coassiale di raggio interno a e esterno b

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\text{H/m}] \quad C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad [\text{F/m}]$$

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\Omega] \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad [\text{m/s}]$$

In pratica Z tra 50 e 93 Ω , v tra $0.65c$ e $0.99c$

Tipo	impedenza [ohm]	ritardo [ns/m]	diametro [mm]	capacità [pF/m]	tensione [kV]
RG58/U	50	5.14	3.1	93.5	1.9
RG174/U	50	5.14	1.5	98.4	1.5
RG59/U	73	5.14	3.8	68.9	2.3

LEMO \rightarrow

PGI2005 lect_4A 8

Per aumentare la velocità di propagazione bisogna ridurre $C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}$,
 ossia ridurre la costante dielettrica, e per ridurre le perdite ad alta
 frequenza si deve migliorare la qualità del dielettrico.

Cavi con dielettrico cellulare (alveoli, foam ...), per es. Cellflex™

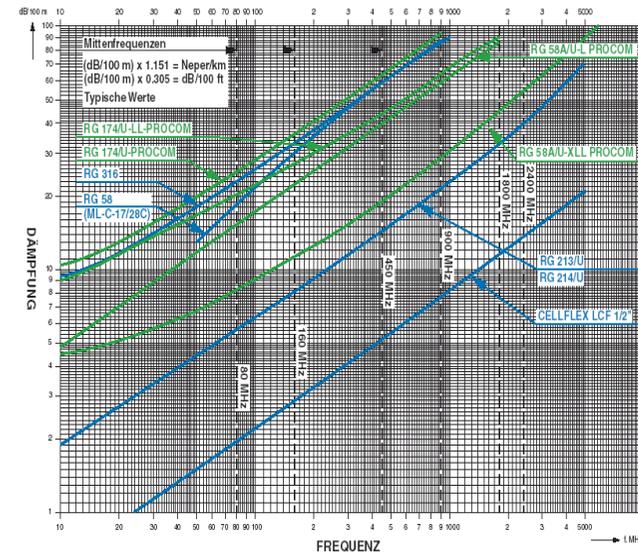
	AIRCOM PLUS	RG 58/U
velocity ratio to c	0,83	0,66
attenuation dB/100 m at 10 MHz	1,2	5,0
100 MHz	3,8	17,0
500 MHz	9,0	39,0
1000 MHz	13,4	54,6
3000 MHz	25,9	118,0



aircom™ plus: 50 ohm
 outer diameter 10.3 mm

Cavi ad aria (air core), per es. Heliflex™, velocità fino a 0.97 c

PGI 2005 lect_4A_9



PGI 2005 lect_4A_10

Due fili paralleli (vale anche per *twisted pairs*), di diametro d e
 distanza b tra i centri dei fili

$$L = \frac{\mu}{\pi} \operatorname{arccosh}\left(\frac{b}{d}\right) \quad [\text{H/m}] \quad C = \frac{\pi\epsilon}{\operatorname{arccosh}(b/d)} \quad [\text{F/m}]$$

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\mu}{\epsilon}\right) \operatorname{arccosh}\left(\frac{b}{d}\right)} \quad [\Omega] \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad [\text{m/s}]$$

Per $b \gg d$ $\operatorname{arccosh}\left(\frac{b}{d}\right) \approx \ln\left(2\frac{b}{d}\right)$

In pratica Z tra 90 e 115 Ω, v tra 0.6c e 0.8c

PGI 2005 lect_4A_11



Two-wire twisted-pair unshielded cable, **UTP** Two-wire twisted-pair shielded cable, **STP**

Dal catalogo 3M:

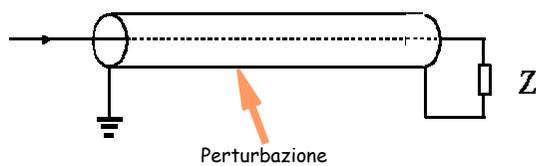
Tipo	impedenza [ohm]	ritardo [ns/m]	sezione [mm ²]	distanza [mm]	capacità [pF/m]
piattina	110	4.1	0.06	0.64	60
twisted pairs	110	4.9	0.06	0.64	43
piattina	110	4.1	0.09	1.27	40
twisted pairs	100	5.3	0.09	1.27	46

Siccome la sezione del conduttore è piccola la resistenza è di centinaia di ohm per chilometro e l'attenuazione DC può creare difficoltà

PGI 2005 lect_4A_12

I cavi coassiali sono in generale ben protetti contro perturbazioni esterne fino ad alta frequenza. Possono anche avere **doppio schermo**

Possono presentare problemi per segnali parassiti che di propagano lungo lo schermo, principalmente tra sorgente e destinazione o per connessioni di terra a potenziale diverso alle due estremità



PGI2005 lect_4A 13

I **twisted pairs** senza schermo (*Unshielded Twisted Pairs, UTP*) sono in generale poco sensibili alle perturbazioni, a condizione di preservare alle estremità connessioni appropriate



È necessario inoltre che i circuiti connessi alle estremità siano protetti contro perturbazioni che si propagano sincrone su entrambi i conduttori del cavo (*common mode rejection*)



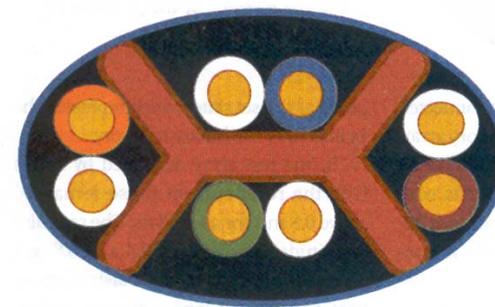
PGI2005 lect_4A 14

Passo diverso: protezione da *cross talk*



PGI2005 lect_4A 15

Distanza controllata: protezione da *cross talk*



PGI2005 lect_4A 16

