

ASSOCIAZIONE RADIOAMATORI ITALIANI



LINEE DI TRASMISSIONE

LINEE DI TRASMISSIONE

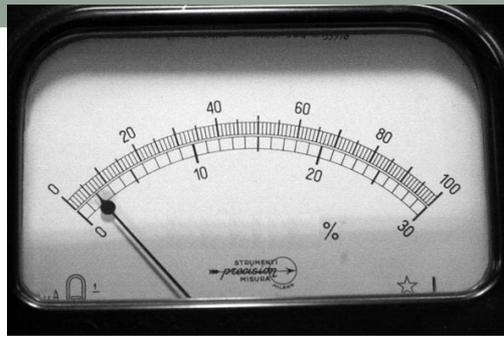
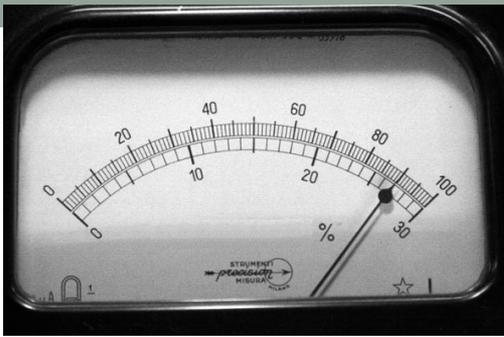
A cura di Giovanni Holzer in3hog



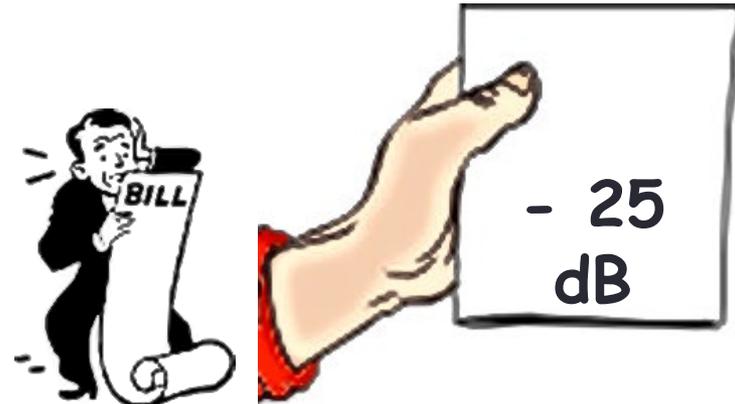
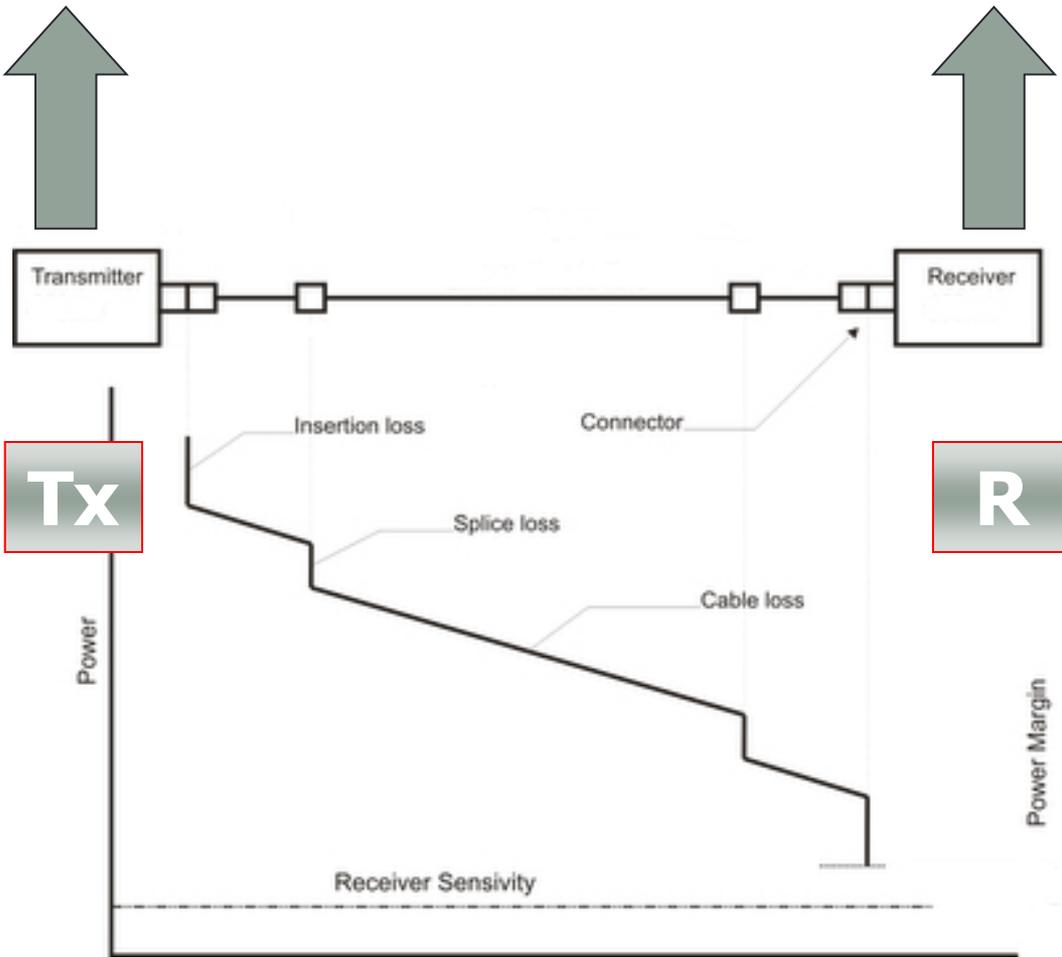
Una linea serve per
trasportare i
segnali tra due
punti

in modo comodo





con la
minima
perdita
possibile

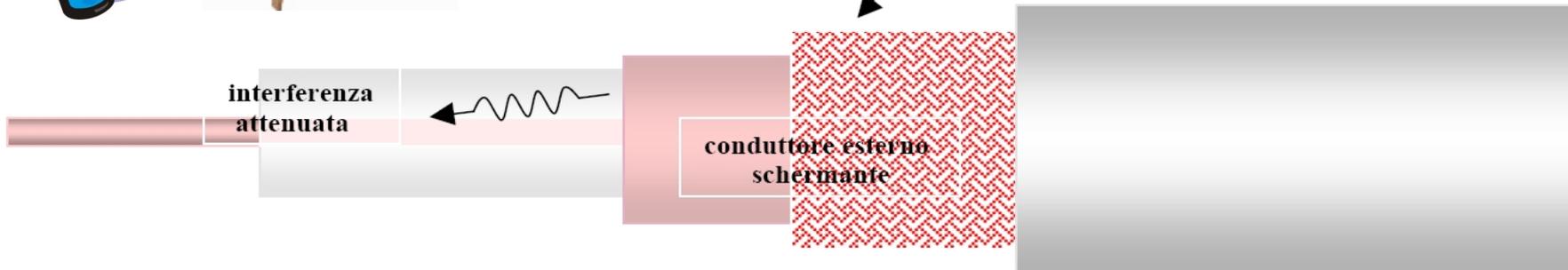
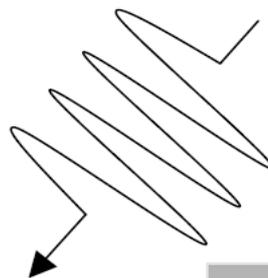




senza subire o irradiare interferenze



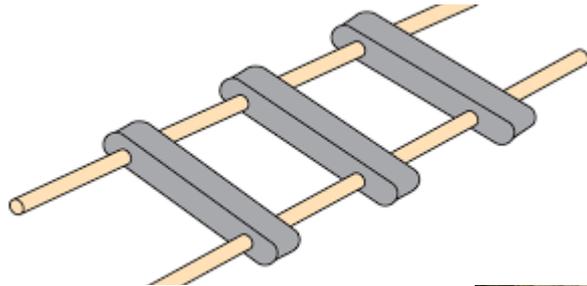
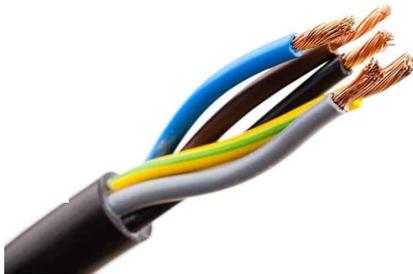
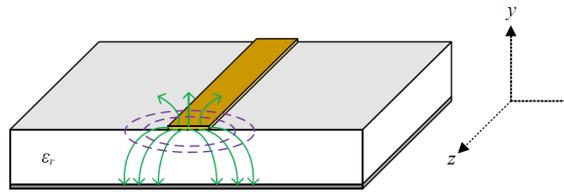
segnale esterno interferente





**e resistere
agli agenti
atmosferici e
corrosivi**

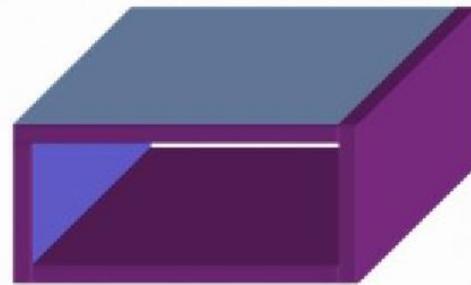




In questa sessione saranno trattate le linee di trasferimento a radiofrequenza



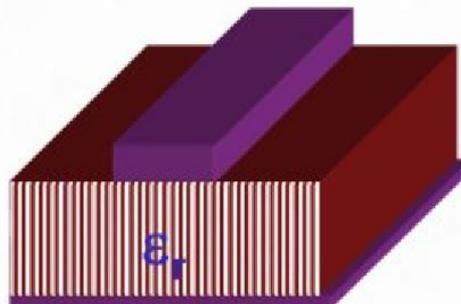
Coaxial



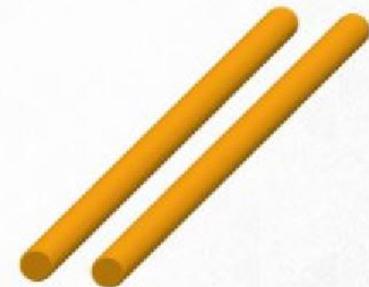
**Rectangular
Waveguide**



Stripline

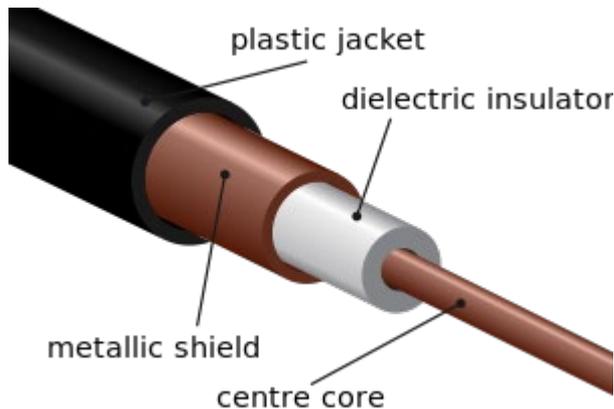
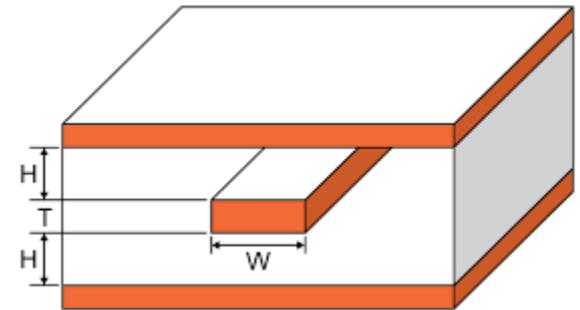


Microstrip



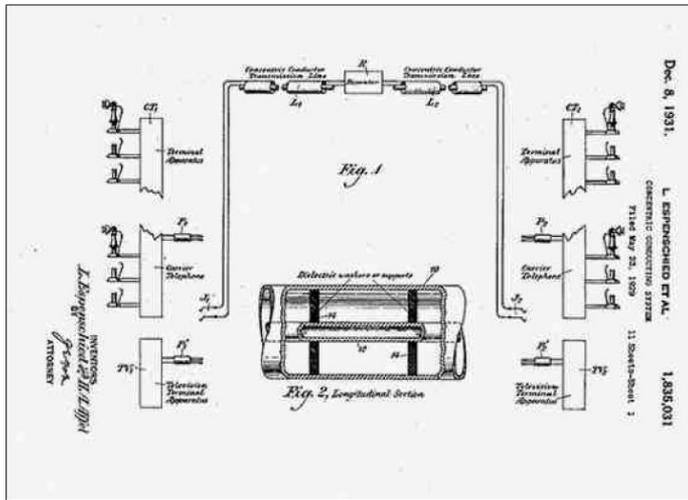
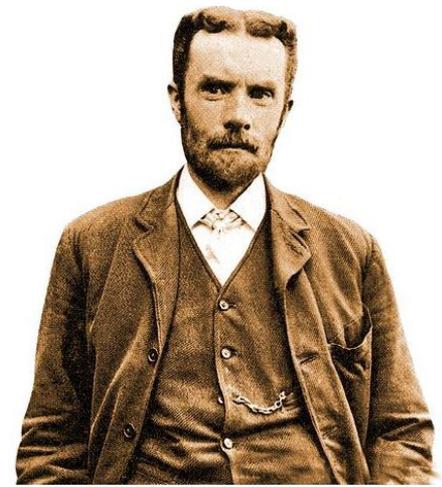
**Parallel
Conductors**

in particolare quelle sbilanciate realizzate in cavo coassiale o costruzioni similari



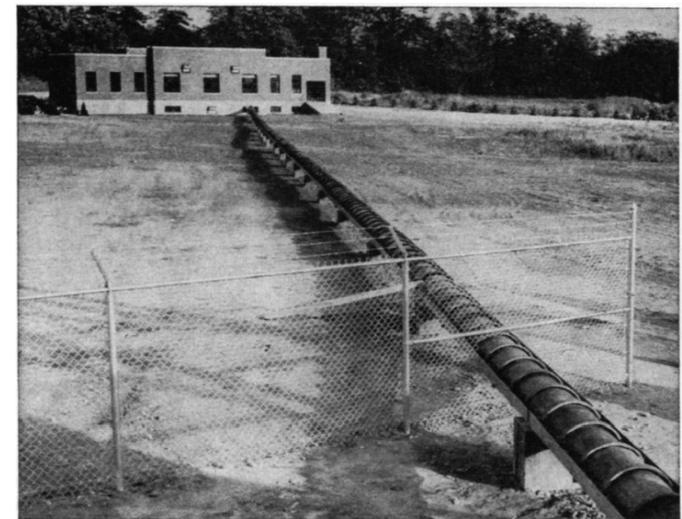
Nel 1880 nasce il cavo coassiale

L'idea si sviluppò per merito di Oliver Heaviside noto anche per aver coniato i termini 'Induttanza' e 'Impedenza' e studi sull'effetto pelle.

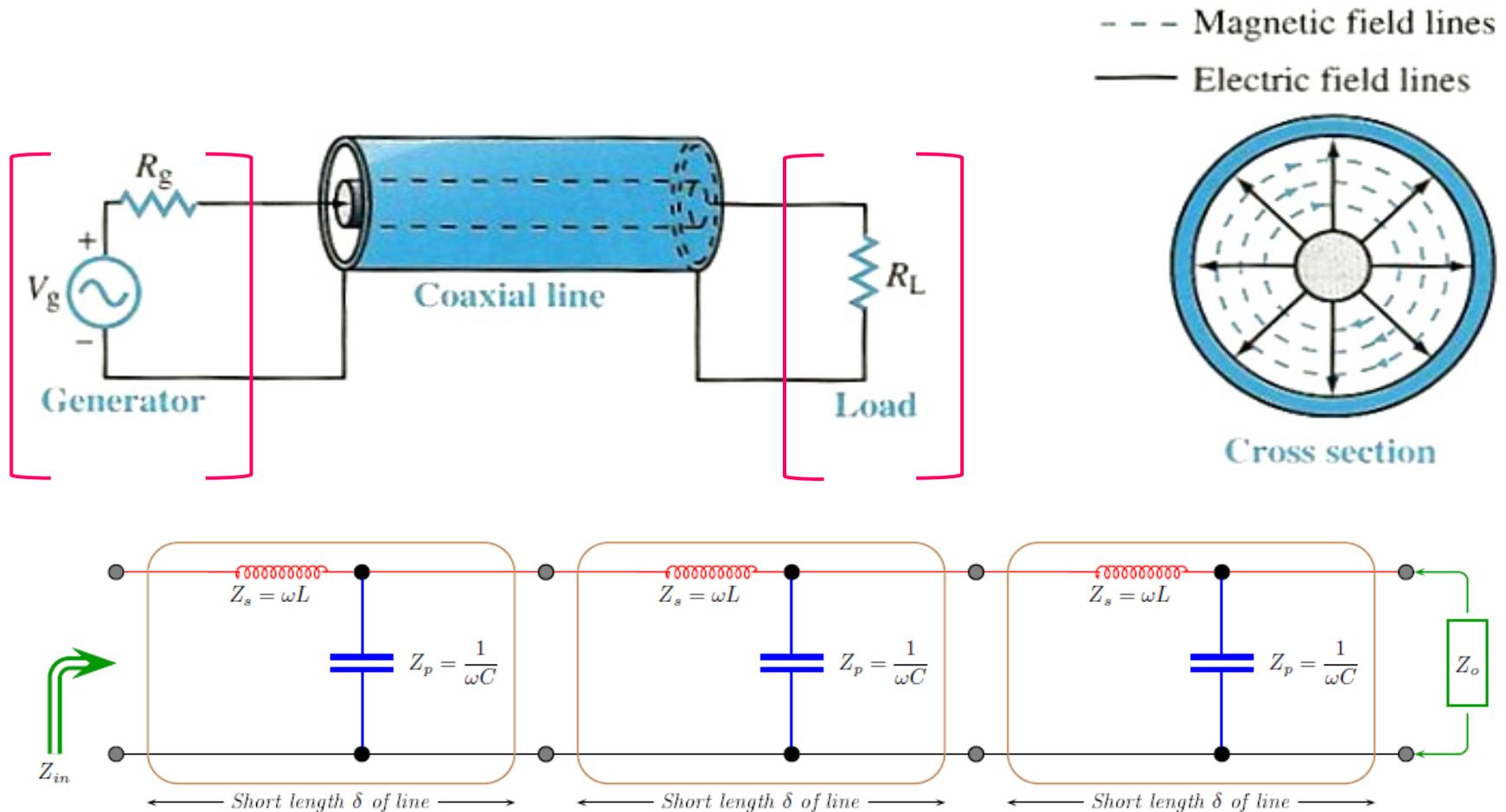


Nel 1930 la Bell brevettò e presentò la pratica realizzazione di un cavo coassiale telefonico realizzato un tubo nel quale veniva collocato un conduttore centrale distanziato da dischi isolanti

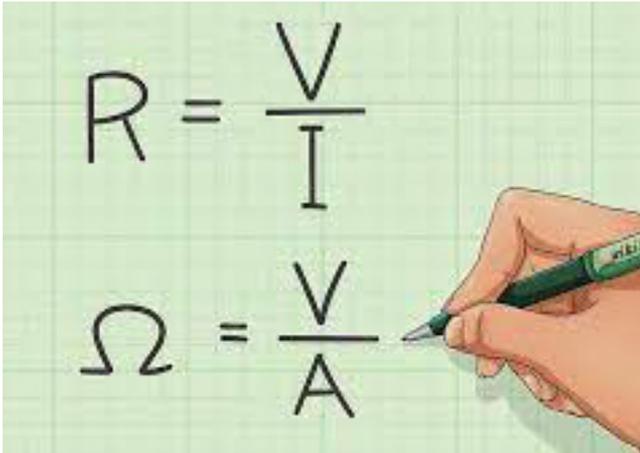
Sempre nel 1930 l'emittente AM WNBC utilizzò tale sistema per alimentare le proprie antenne trasmettenti



Schematizzazione semplificata di una linea in cavo coassiale

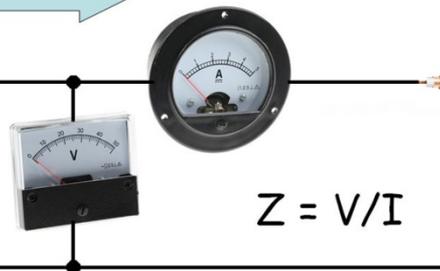


Impedenza caratteristica di un cavo coassiale


$$R = \frac{V}{I}$$
$$\Omega = \frac{V}{A}$$

$$Z = R$$

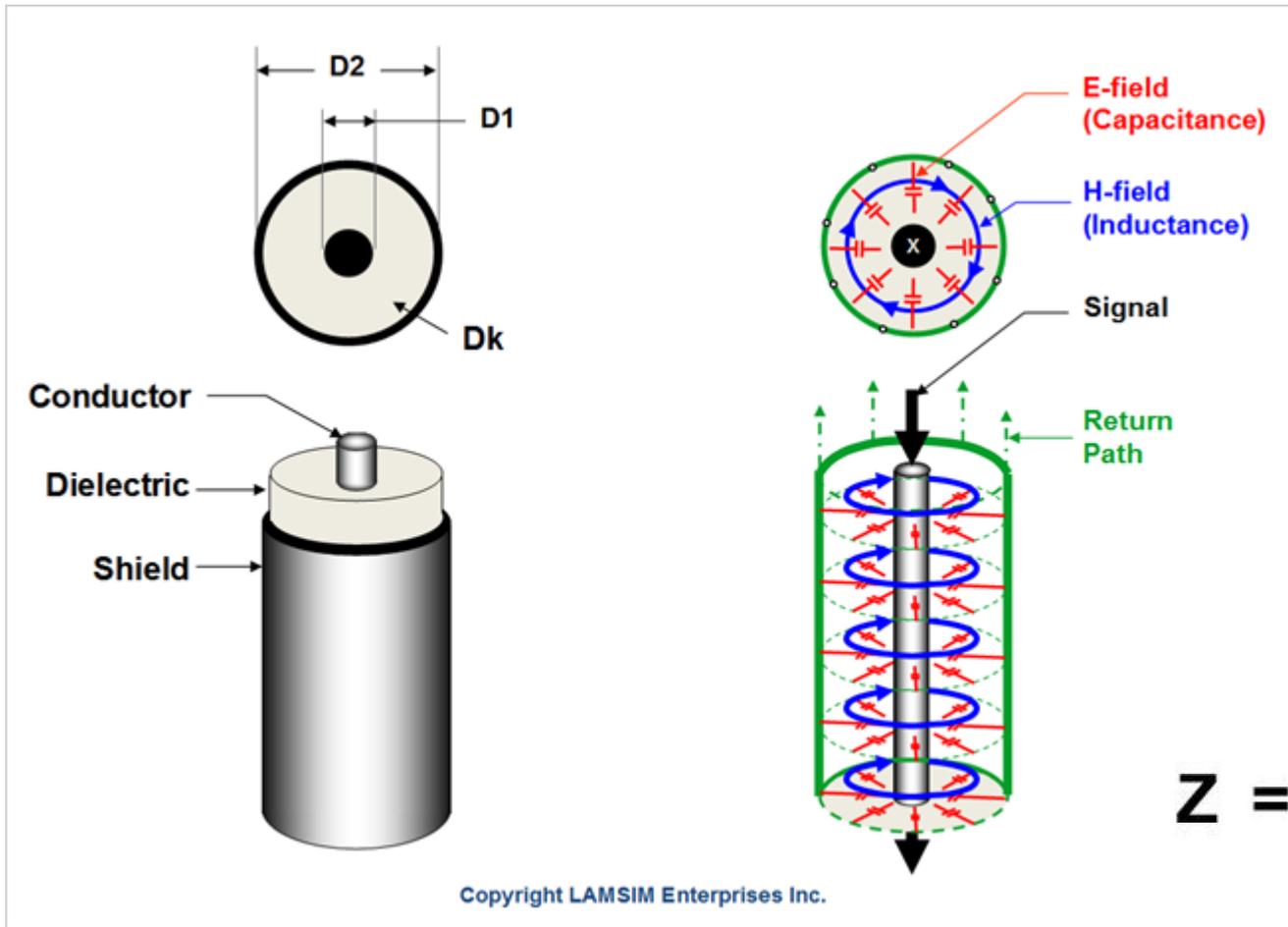
Generatore RF



Cavo molto lungo

La struttura meccanica impone l'impedenza

(o meglio la resistenza equivalente caratteristica)



D=diametro calza
schermante

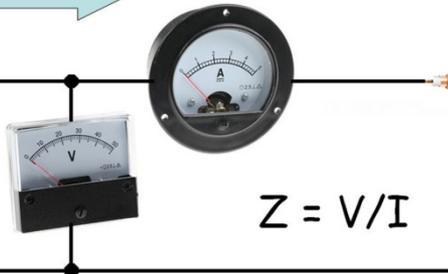
d=diametro filo
centrale

T= tipologia
cavo centrale
trefolo o unico

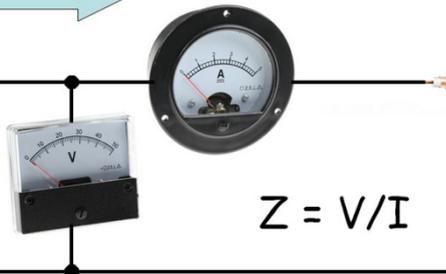
ϵ = materiale
dielettrico

$$Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{D}{d}$$

La situazione non cambia se si taglia il cavo e si sostituisce la parte mancante con un resistore con la medesima Resistenza Caratteristica



Matassa di cavo da 50 ohm molto molto lunga e non terminata da alcuna resistenza.



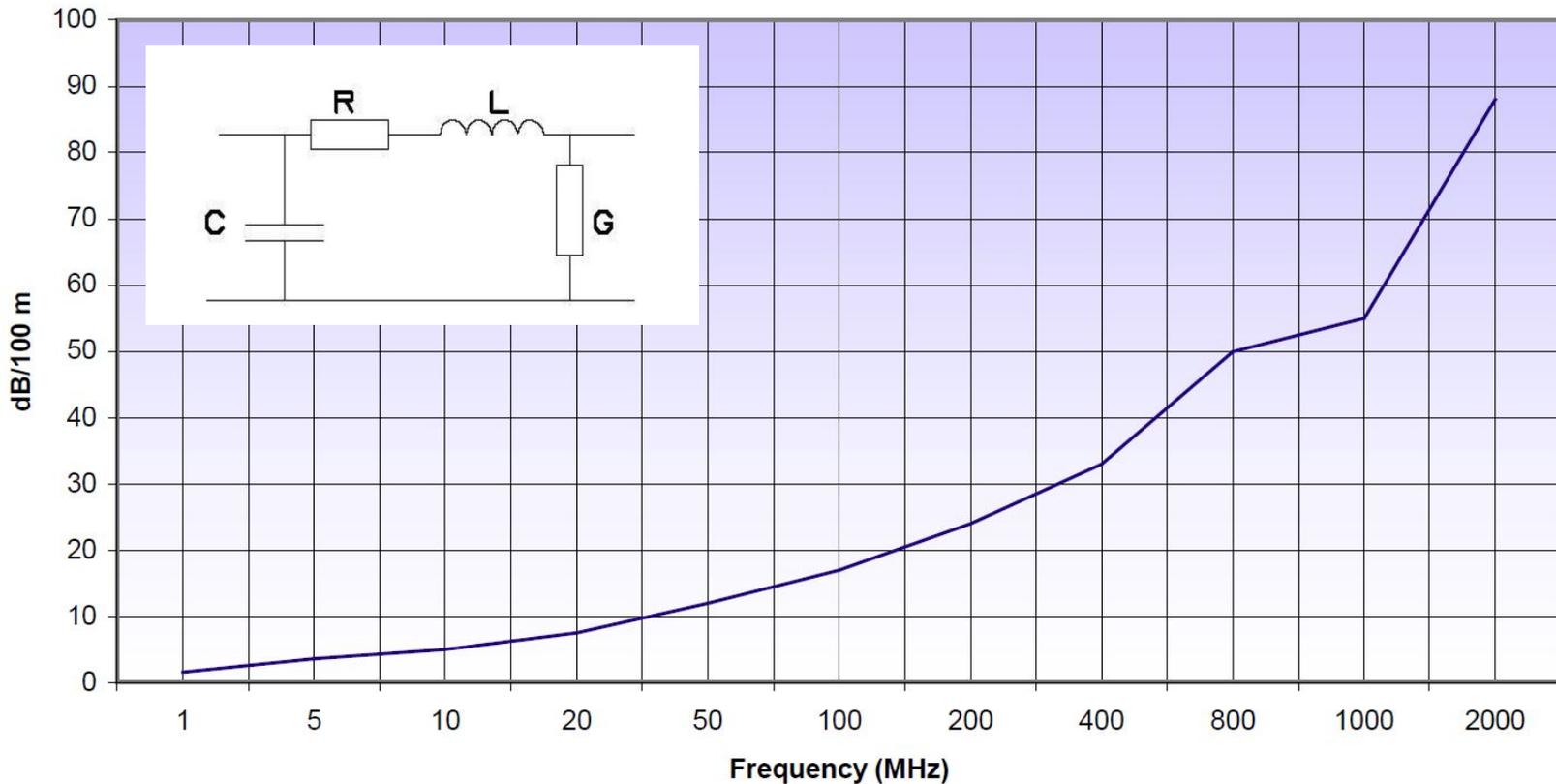
Spezzone corto di cavo da 50 ohm

Resistenza da 50 ohm



**I cavi coassiali purtroppo attenuano il segnale !
Più la frequenza è elevata e più attenuano!**

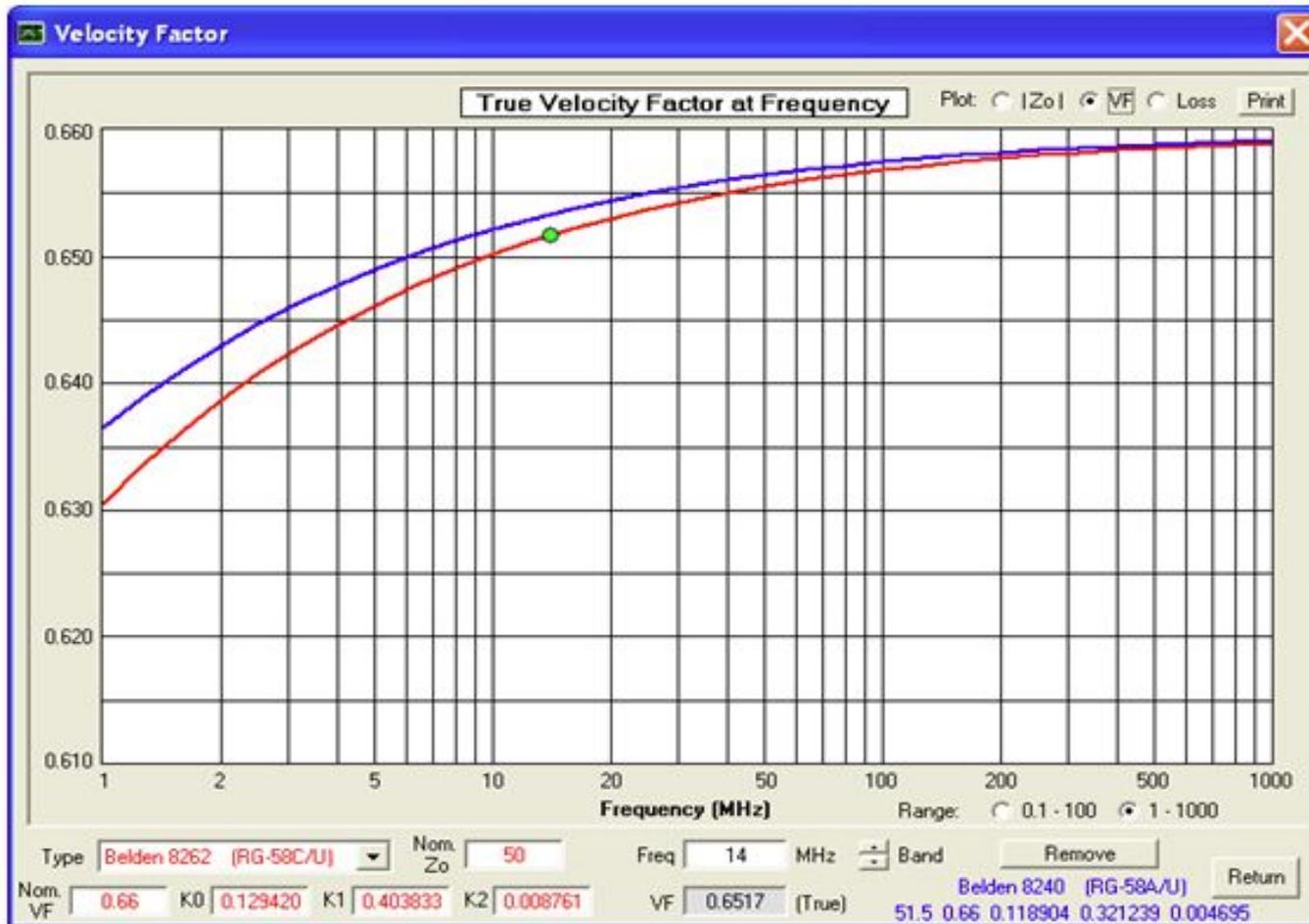
Attenuation



Curva caratteristica del cavo RG58 (100 metri)

Una ulteriore caratteristica del cavo coassiale è quella di rallentare la velocità di propagazione del segnale

E' definita come 'Fattore di Velocità' e per lo stesso cavo varia un po' con la frequenza



Il materiale del dielettrico



è quello che influenza maggiormente tale parametro

Valori possibili

0,66 x dielettrico compatto
0,82 x dielettrico espanso
1,0 x dielettrico aria

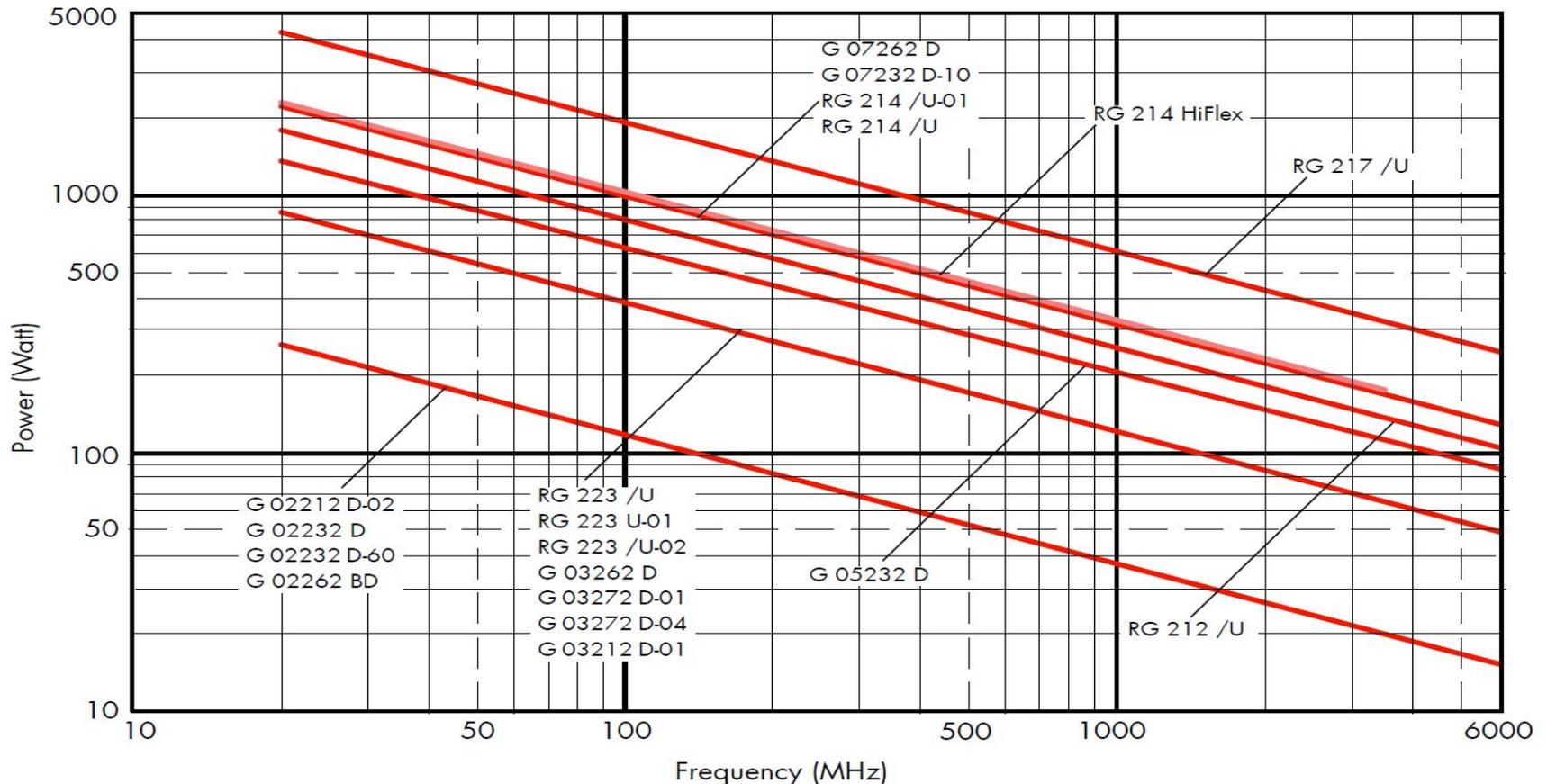
Un cavo ha dei limiti di potenza trasportata

La tabella sottostante indica la potenza massima per alcune tipologie di cavo operanti in condizioni di perfetto adattamento della linea.

Effetti ? Riscaldamento e scariche per sovratensioni!

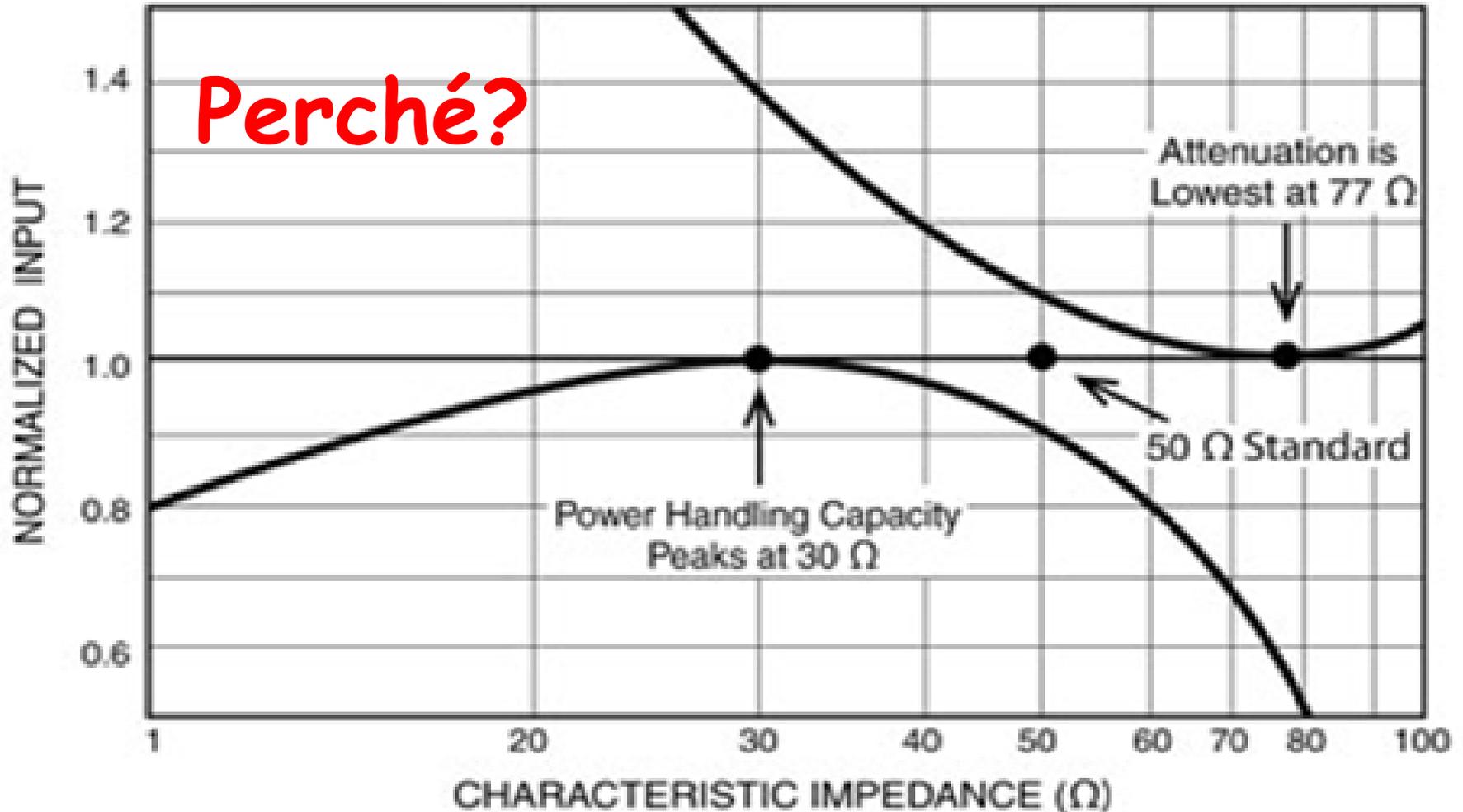


Standard RF coax cables, double screen, 50 Ω
typical values at 40 °C ambient temperature



La maggior parte dei cavi coassiali è costruita con resistenze caratteristiche di 50 o 75 ohm

30 / 50 / 77 Ω POWER AND ATTENUATION

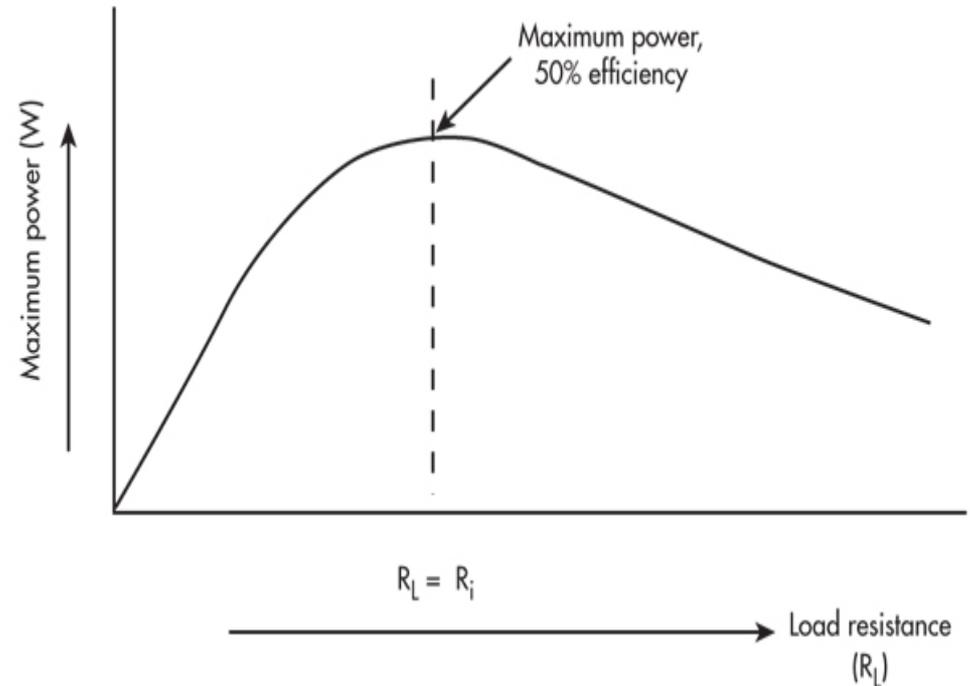
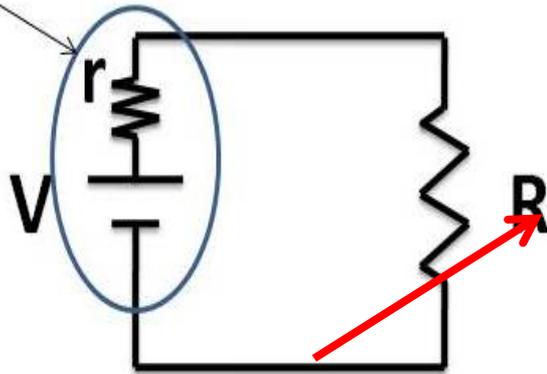


Prima di proseguire è
necessario citare
alcune cose importanti

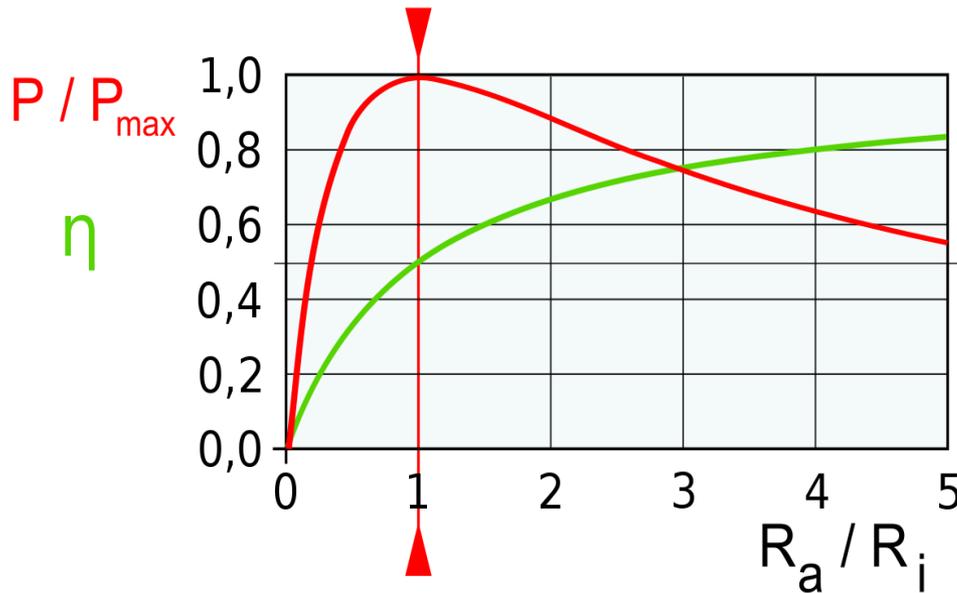
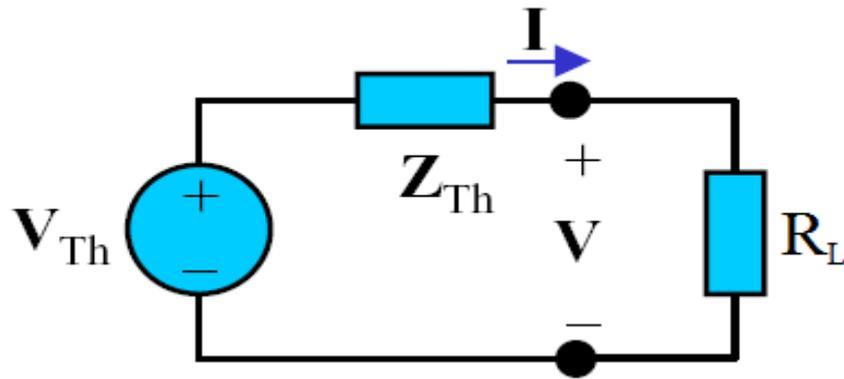


1 - Teorema del massimo trasferimento di potenza (legge di Jacobi)

Generatore reale



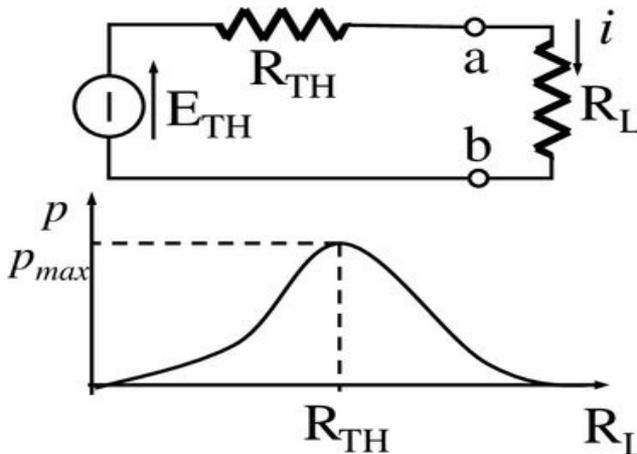
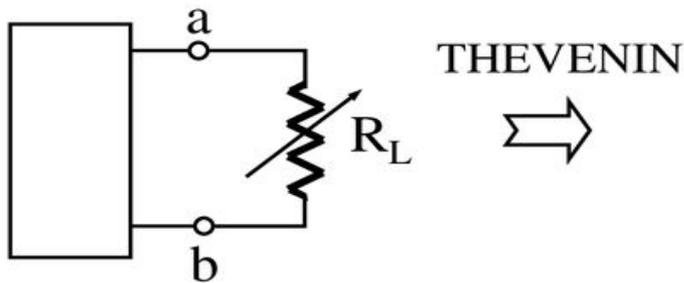
Quando la resistenza del carico è uguale a quella del generatore, si ha il massimo trasferimento di potenza, mail rendimento del sistema si attesta sul 50%



Quando ci sono due resistenze uguali in serie, metà potenza va sulla prima (Z_T) e metà potenza va sulla seconda (R_L)

Un po' di matematica

TEOREMA DEL MASSIMO TRASFERIMENTO DI POTENZA



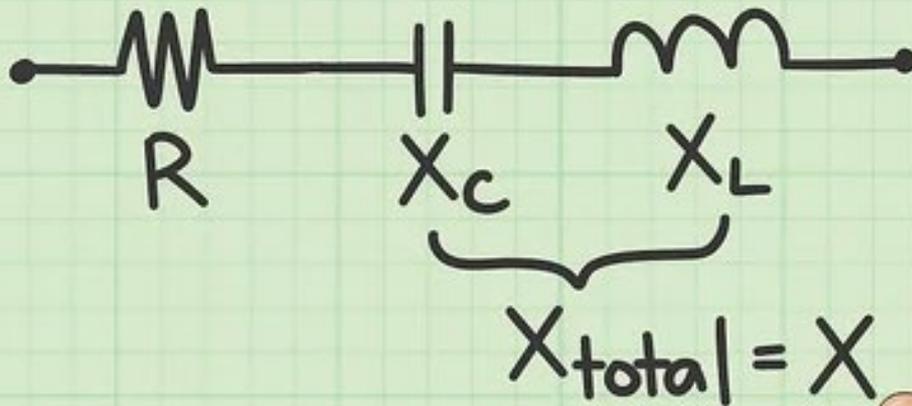
$$p = R_L i^2 = R_L \cdot \left(\frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_L} \right)^2$$

SI HA LA MASSIMA POTENZA TRASFERITA AL CARICO QUANDO LA RESISTENZA DEL CARICO E' UGUALE ALLA RESISTENZA DI THEVENIN VISTA DAL CARICO: $R_L = R_{TH}$

Dimostrazione:

$$\frac{dp}{dR_L} = V_{TH}^2 \left[\frac{(R_{TH} + R_L)^2 - 2R_L(R_{TH} + R_L)}{(R_{TH} + R_L)^4} \right] = 0 \Rightarrow R_{TH} + R_L - 2R_L = 0 \Rightarrow \boxed{R_L = R_{TH}}$$
$$\Rightarrow \boxed{p_{\max} = \frac{V_{TH}^2}{4R_{TH}}}$$

2 - Natura dei carichi reali



$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$X_L = 2\pi fL$$

\downarrow \swarrow \downarrow
 Ω Hz H

$$X_c = 1/2\pi fC$$

\downarrow \swarrow \downarrow
 Ω Hz F

3 - Massima compatibilità

Per trasferire la massima potenza, il Generatore, la Linea e il Carico devono essere ben accoppiati!



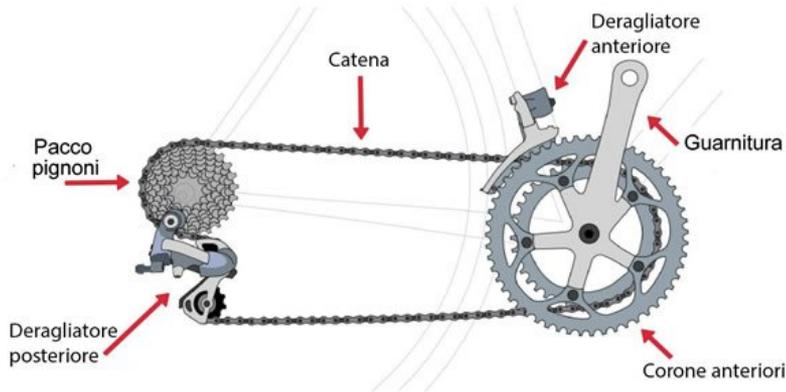
I tecnici usano il termine «**CONIUGATI**»

O più propriamente « Complessi coniugati »

Le resistenze R devono essere uguali.

Le reattanze X complessive devono essere assenti oppure uguali e di segno opposto.

Quando l'accoppiamento non è soddisfatto, si introduce fra i vari componenti un dispositivo detto adattatore



Chiamato in elettrotecnica 'Trasformatore di impedenza'

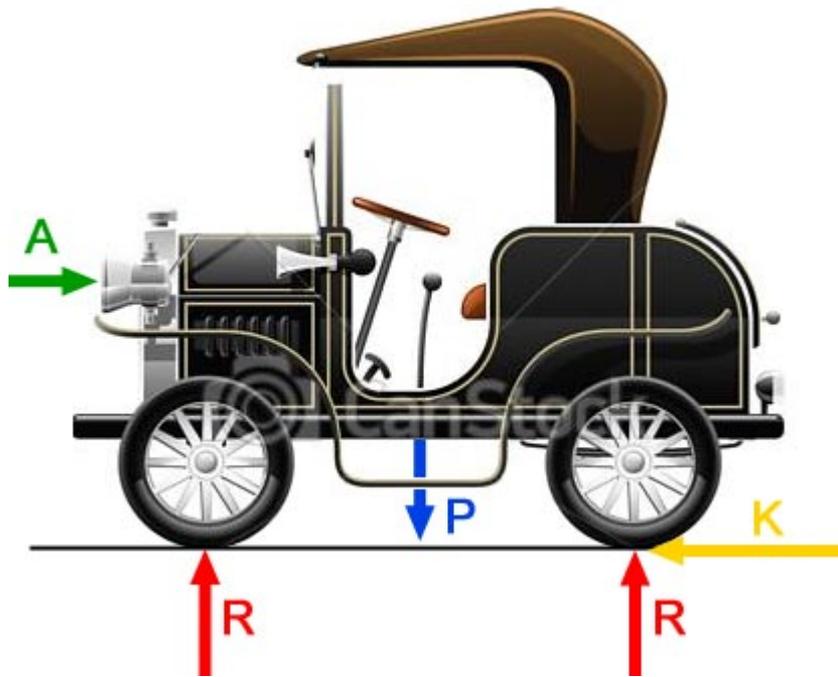


in RF si chiama Accordatore



Possibile similitudine di R e X con il lavoro di un motore

spostamento dell'automobile \Rightarrow Resistenza **R**



Dissipato non recuperabile



movimentazione della massa \Rightarrow Reattanza **X**
Accumulato e restituito

Condizione impiantistica ottimale

In questo caso si dice che la linea è 'adattata'

Massimo trasferimento di potenza

V e I costante lungo tutto il tragitto *

Nessuna potenza ritorna al generatore



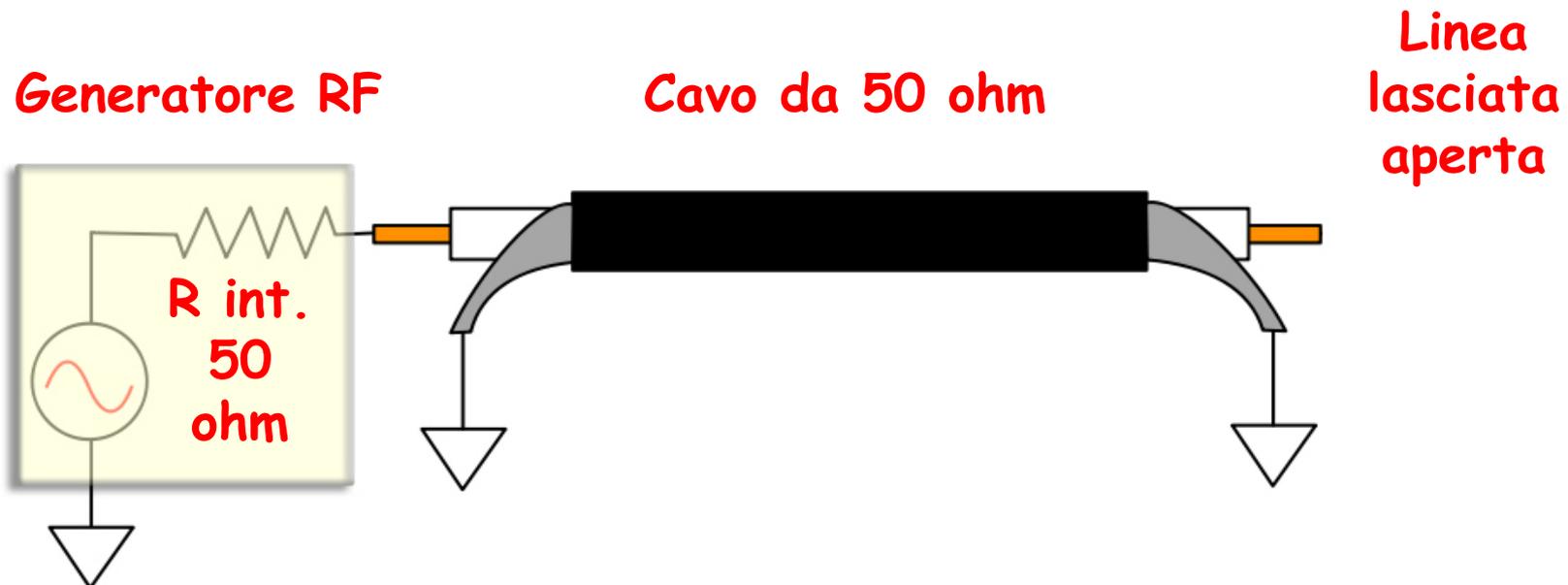
* Escludendo la ovvia perdita intrinseca della linea

Linea terminale disadattata: aperta/in corto/non chiusa sulla sua resistenza caratteristica.

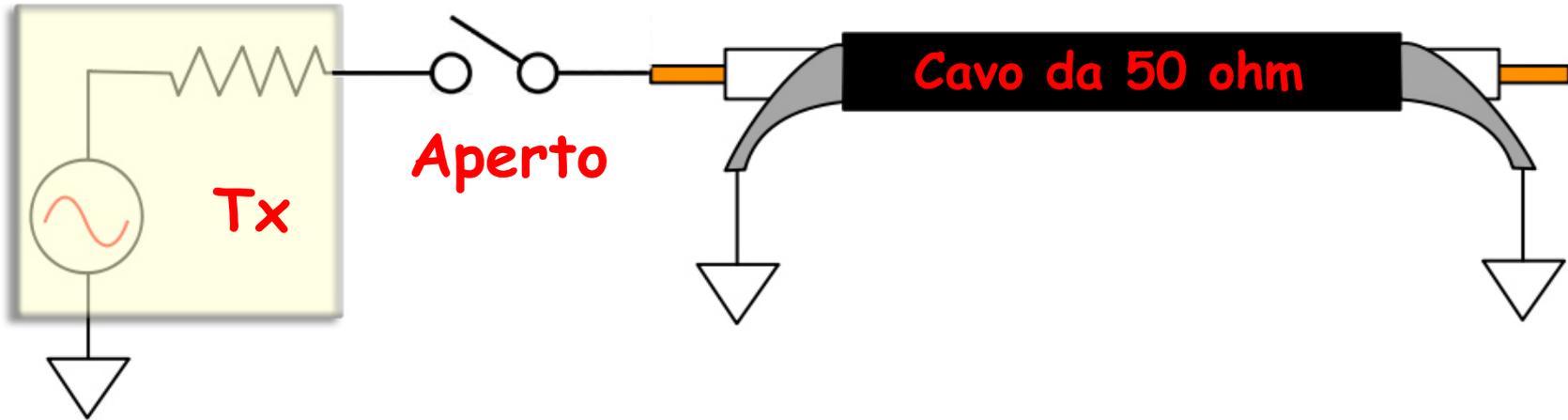
In questo caso succedono cose strane....



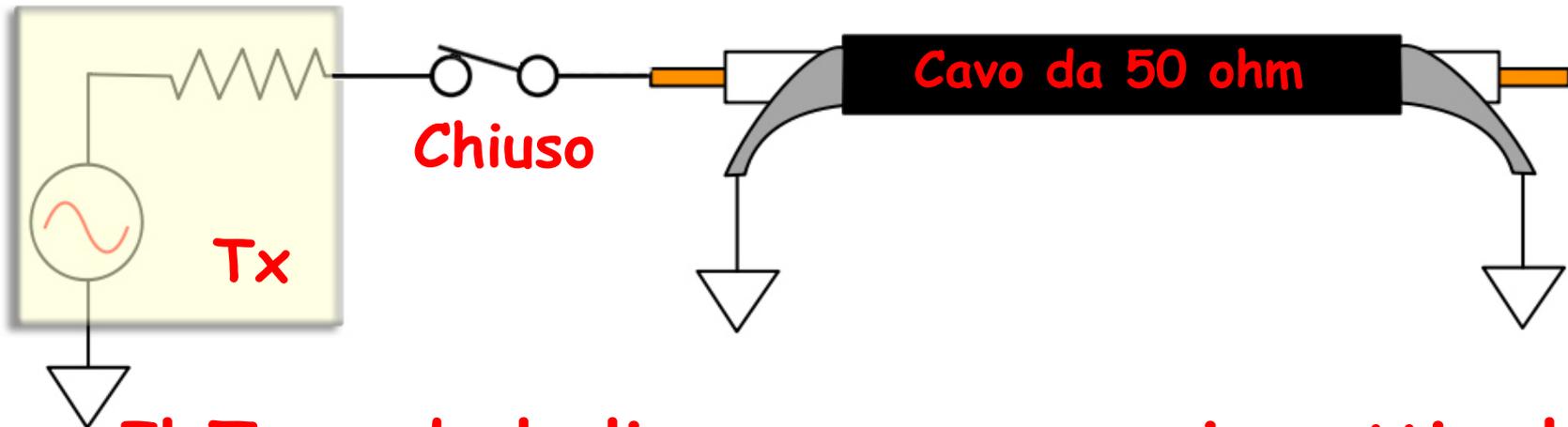
Meglio analizzare in dettaglio il problema



Banco di prova = Tx da 50 W CW-interruttore-linea

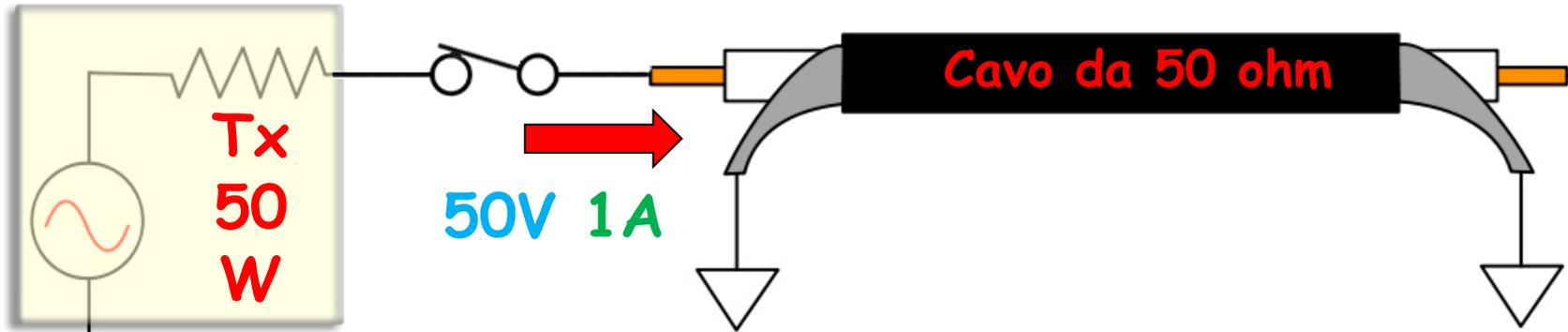


Quando si chiude l'interruttore, il Tx vede solo la resistenza caratteristica della linea che è di 50 ohm



Il Tx vede la linea come un carico ottimale

questo succede perché l'RF impiega un po' di tempo per raggiungere la fine del cavo e la RF non può sapere la situazione che troverà alla fine del percorso.

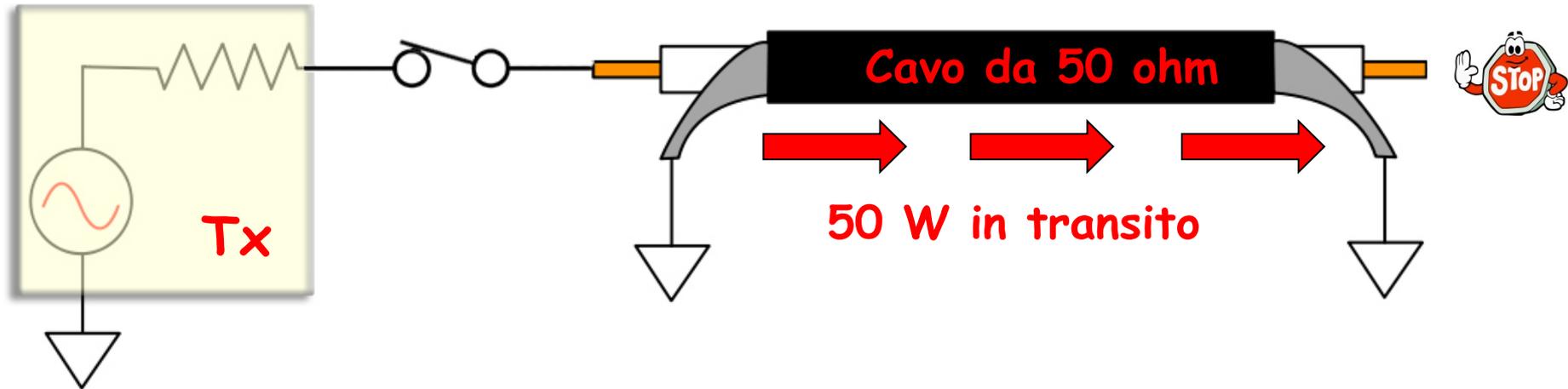


Così il Tx riversa sulla linea tutti i suoi 50 W

50 W significa che sul cavo ci sono 50 volt e scorre una corrente di 1 Ampere

Ma cosa succede quando questa potenza raggiunge la fine della linea?

**I 50 W caricati sul cavo
hanno imboccato una
strada sconosciuta**



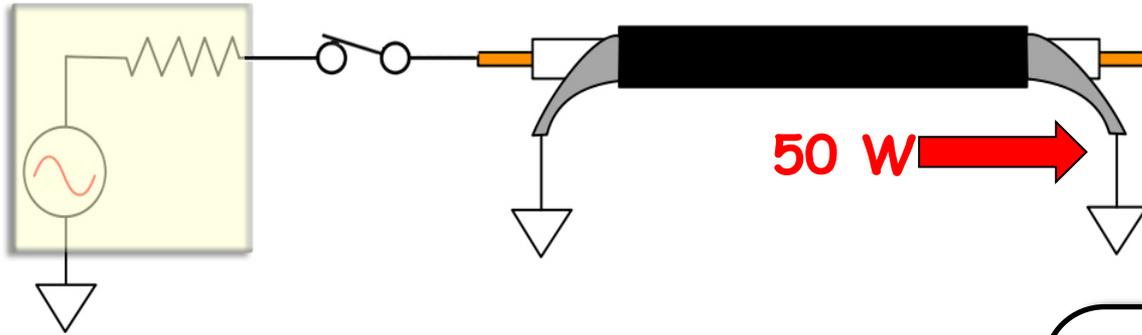
**Arrivati alla fine della linea, i 50 W (50 V/1 A) non
hanno modo di scaricarsi su un carico utile!**

Non possono nemmeno proseguire!

Come se la strada fosse interrotta!

Comportamento con linea aperta

$$50 \text{ W} = V \times I$$



Se la I è quasi nulla la V sarà elevata

$$V = \frac{P}{I}$$

Qui i 50 W producono una corrente 'quasi' nulla

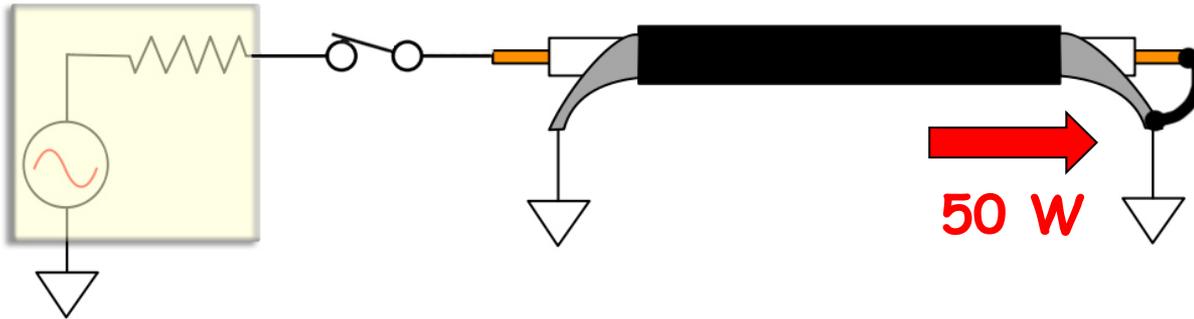


e sempre i 50 W qui possono generare una tensione più alta di quella del trasmettitore

(in qualche caso anche oltre le centinaia di volt)

Quasi lo stesso comportamento con linea in corto

$$50 \text{ W} = V \times I$$



Se la V è quasi nulla, la I sarà elevatissima

$$I = \frac{P}{V}$$

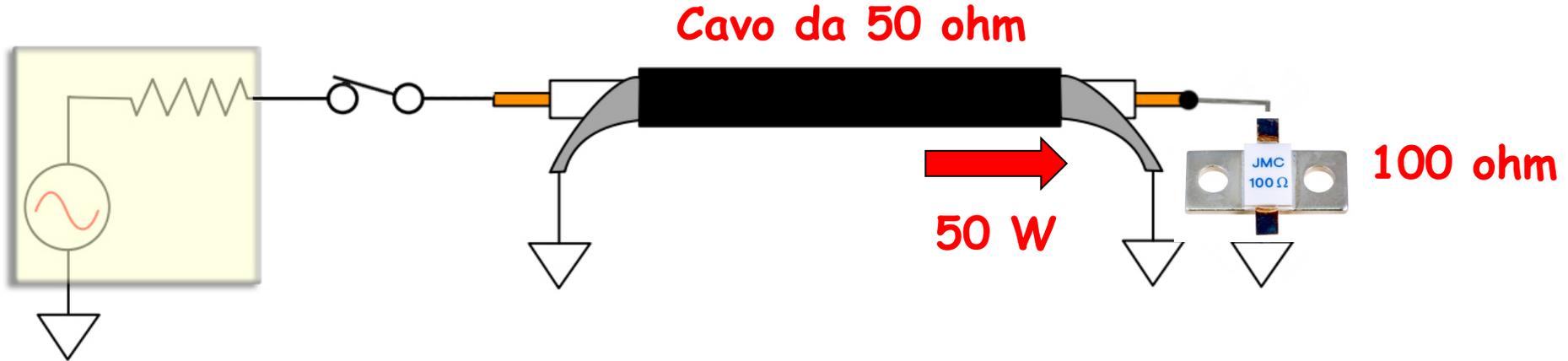
Qui ci sono 50 W con corrente elevatissima



Qui ci sono 50 W con tensione praticamente nulla

Le cose cambiano ancora se la linea è terminata con una resistenza di valore diverso dai 50 ohm caratteristici della linea

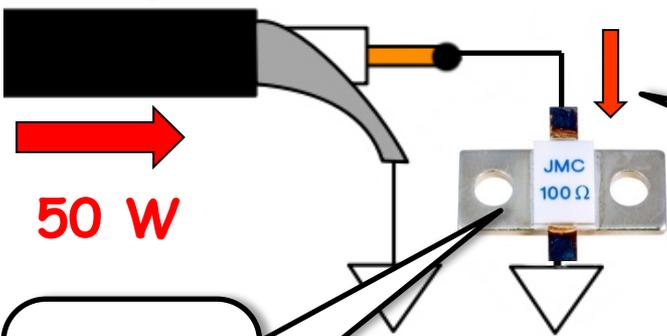
$$50 \text{ W} = V \times I$$



Similmente al fatto che un cavo si presenta come un carico da 50 ohm, esso si rappresenta verso il carico come un generatore con R interna da 50 ohm resistivi

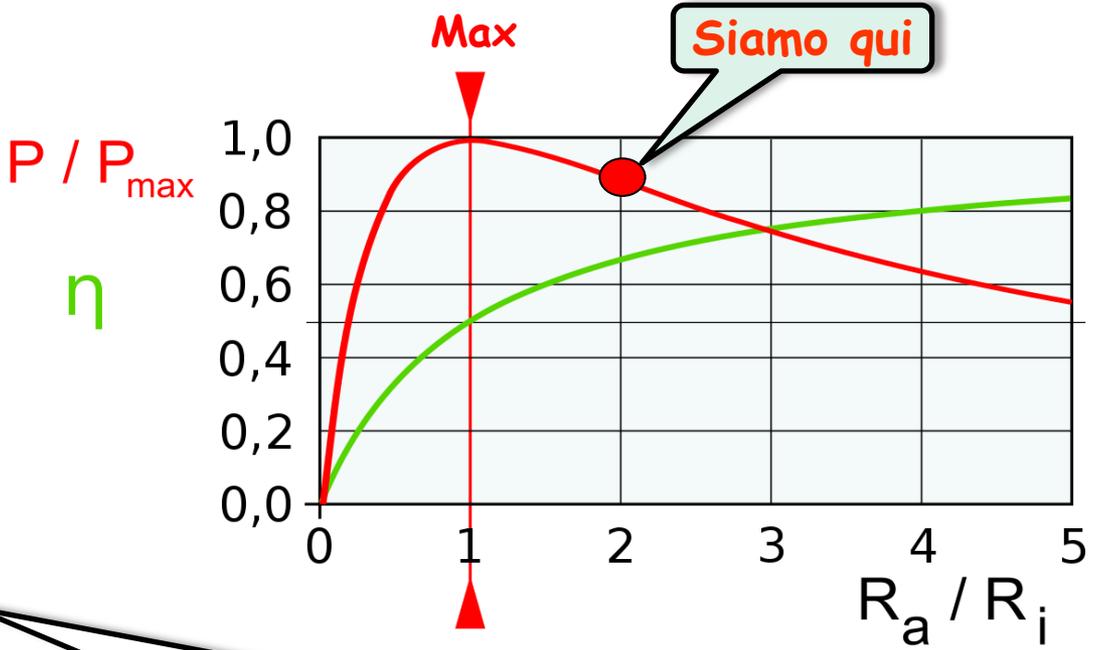
e come tale...fornisce il massimo trasferimento di potenza solo se esso è terminato con la sua medesima resistenza caratteristica

Cavo con 50 ohm caratteristici



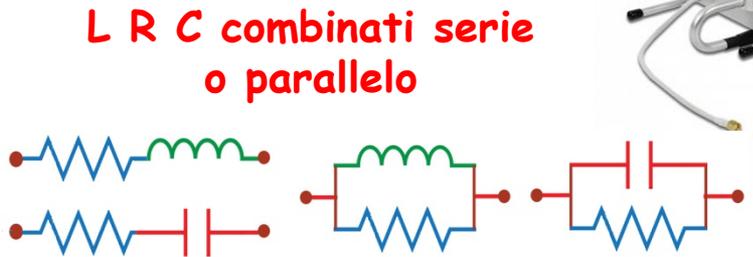
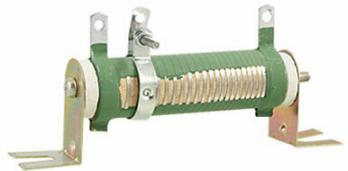
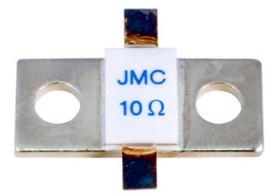
50 W

Resistore di carico 100 ohm



Non tutti i 50W sono utilizzati dal carico 33W vanno sul carico e 17W tornano indietro

Ma potremmo dire la stessa cosa con carichi diversi dai 50 ohm



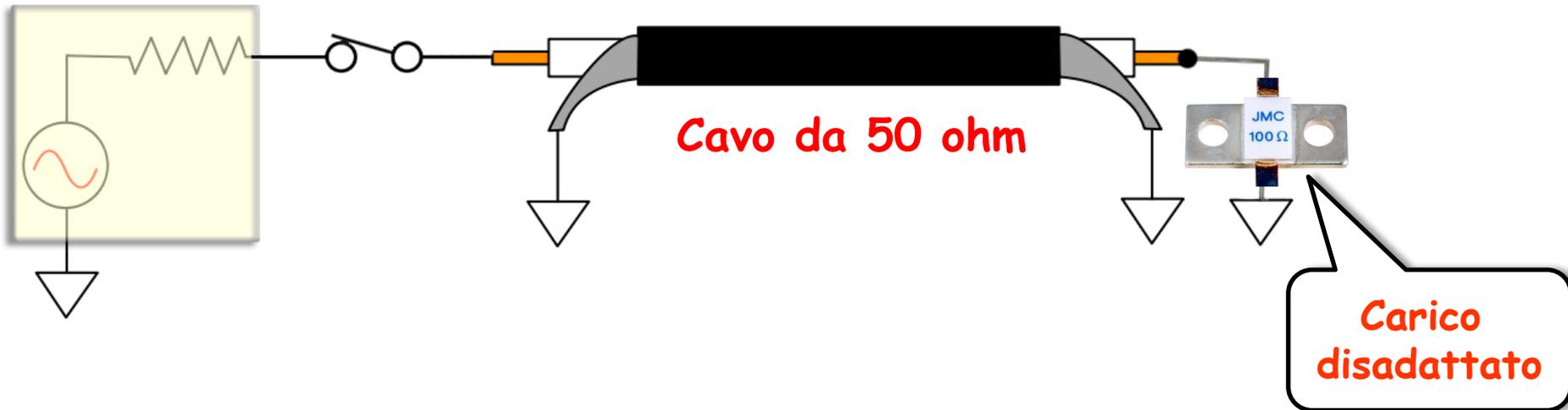
La potenza che non può scaricarsi sul carico, deve per forza di cose, ritornare indietro verso il generatore

La potenza non assorbita torna al generatore 17W

Solo una parte della potenza va al carico 33W



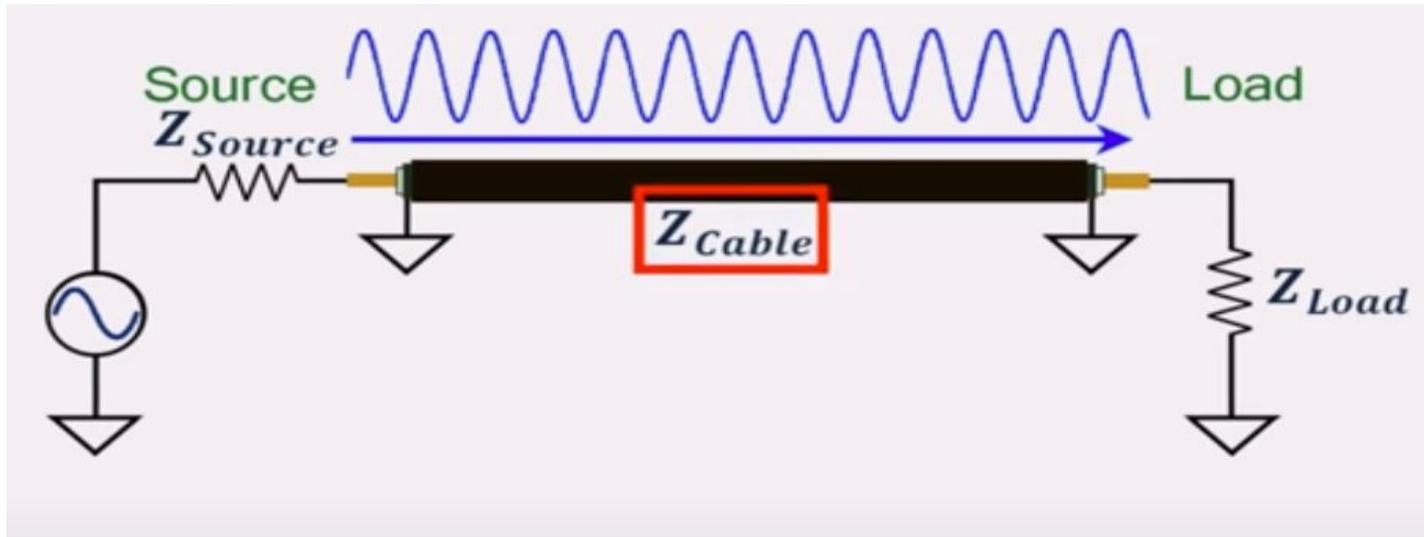
Potenza diretta →



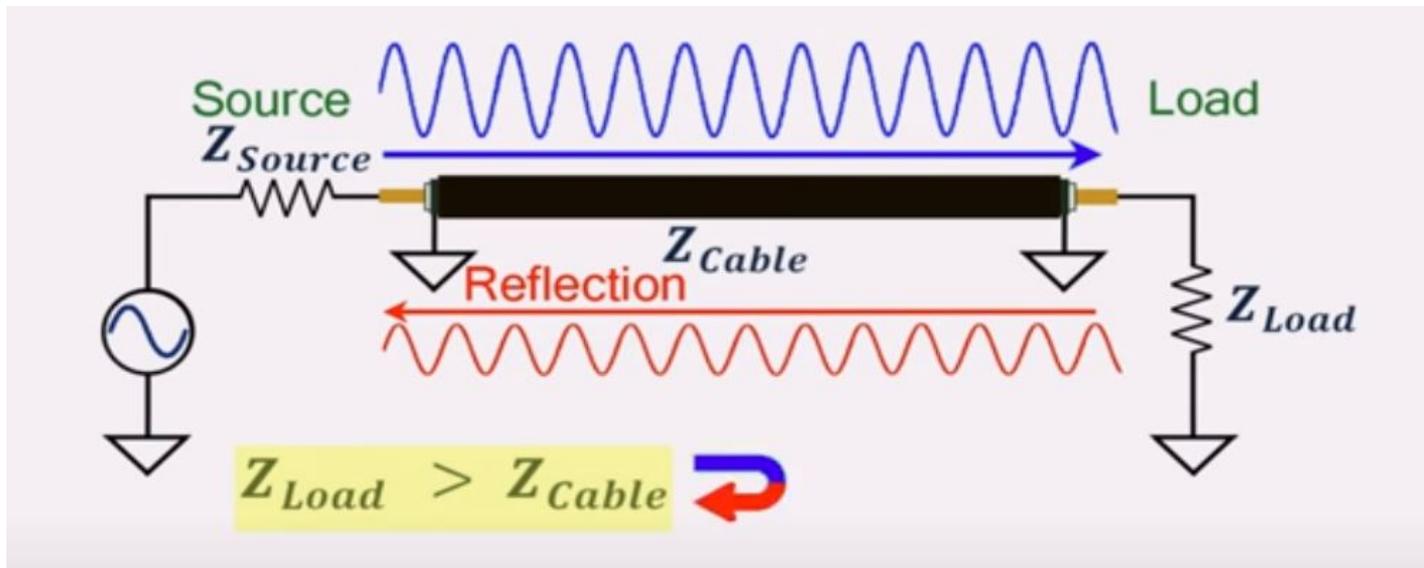
Cavo da 50 ohm

Carico disadattato

Le immagini rappresentano schematicamente le due fasi

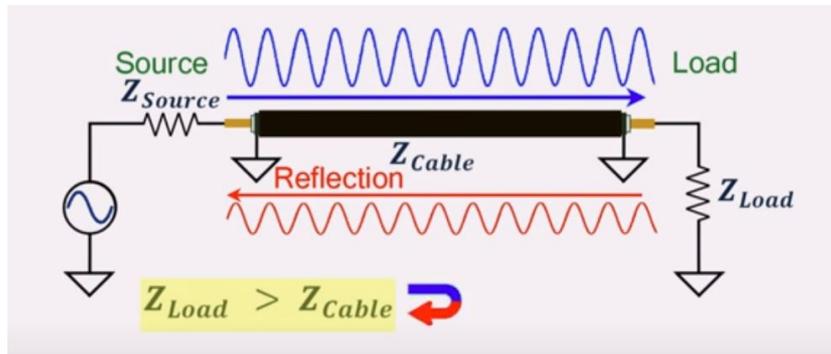


Onda diretta



Onda riflessa

Il rapporto tra l'ampiezza dell'onda diretta e l'ampiezza dell'onda riflessa viene definito con il termine 'Gamma'



Il Gamma è il Coefficiente di trasmissione

si scrive con la lettera

maiuscola greca Γ

$$\Gamma = V_{diretta} : V_{riflessa}$$

Il Gamma espresso in dB è anche confrontabile con il RL (Return Loss) che esprime il rapporto tra la potenza diretta e quella riflessa

$$RL = 10 \text{ Log } (P_{diretta} : P_{riflessa})$$

Facciamo un esempio pratico con un carico disadattato, potenza trasmessa 50 W e potenza riflessa 5 W

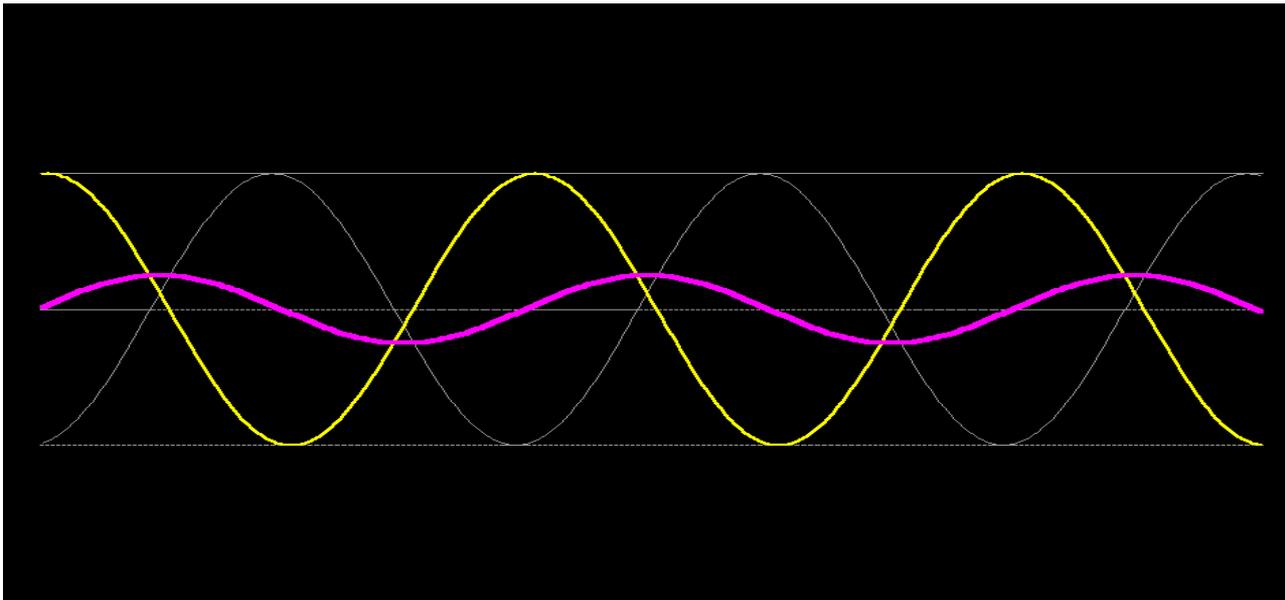
$$RL = 10 \times \text{Log} (P_{\text{dir}}:P_{\text{rif}})$$

$$RL = 10 \times \text{Log} (50:5) = 10 \times \text{Log}(10) = \boxed{RL = 10 \text{ dB}}$$

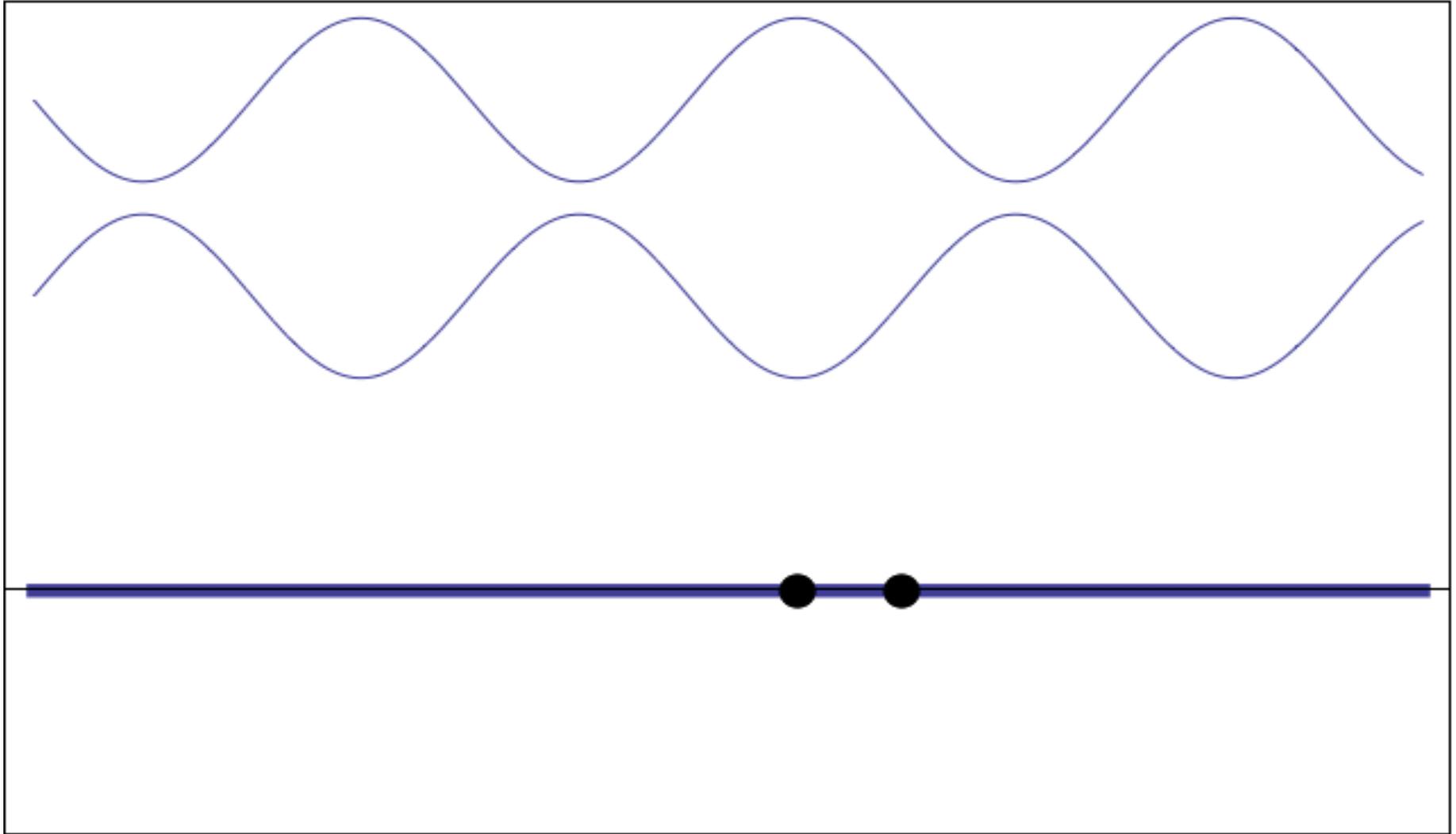


Formazione delle onde stazionarie

Onda diretta
trova un cavo in
corto!
Riflettendosi
sull'ostacolo
ritorna indietro
verso il
generatore



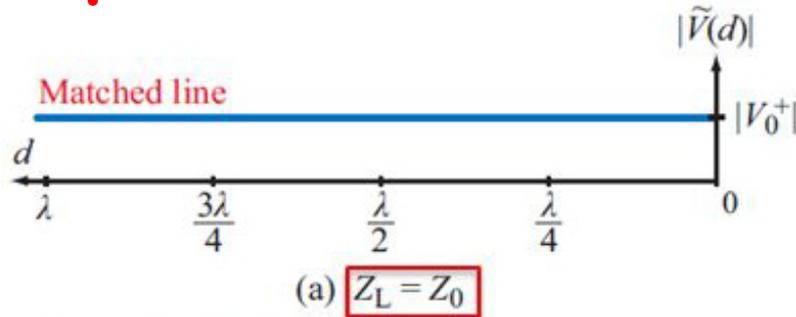
L'onda riflessa
incontra quella
diretta.
La
combinazione
delle due onde
forma un
involuppo
stazionario



I massimi e i minimi sono sempre nella medesima posizione e distano $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda

L'ampiezza e la posizione dell'onda stazionaria dipendono dalla natura del carico

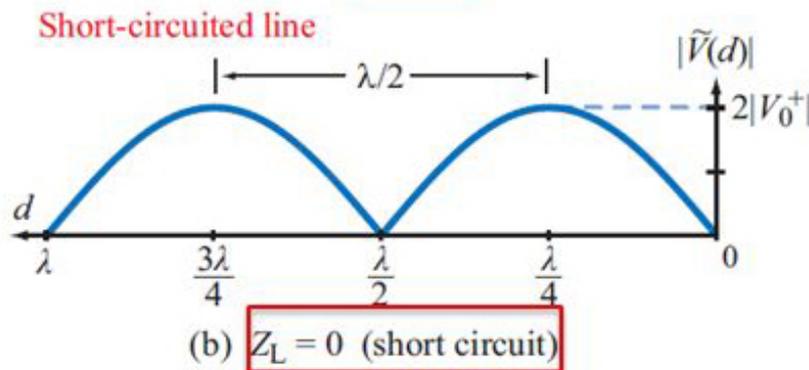
$$\Gamma = 0$$



Carico adattato 50Ω

Gamma = 0 e RL = >40 dB

$$\Gamma = -1$$

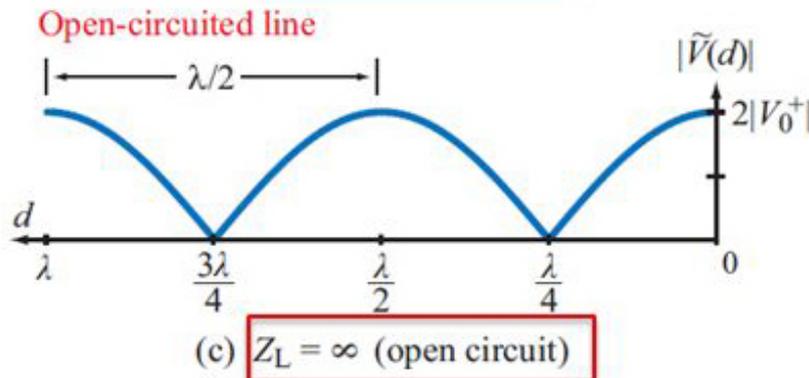


Linea in corto

Gamma = 1 e RL = 0 dB

In valore assoluto

$$\Gamma = 1$$



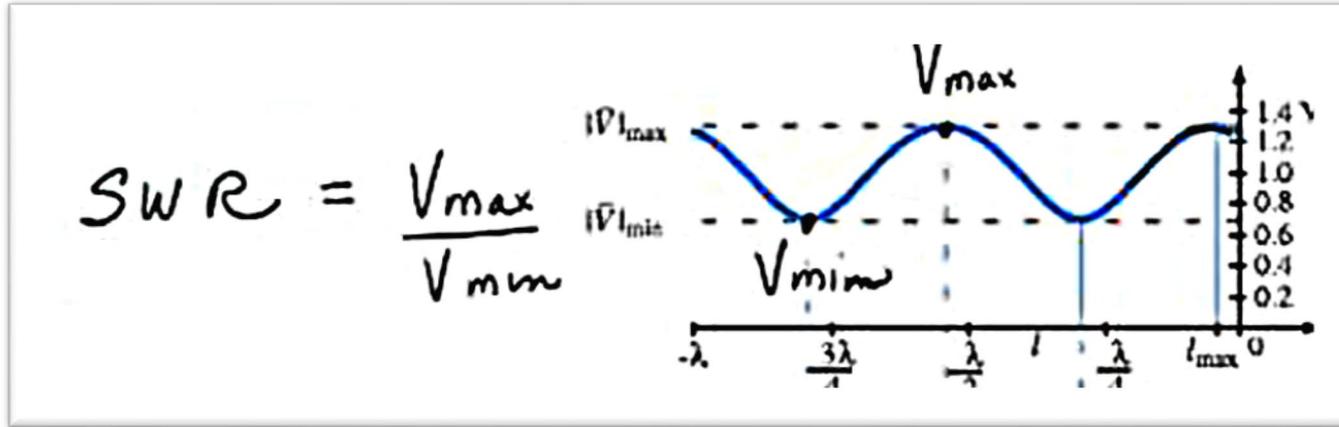
Linea aperta

Gamma = 1 e RL = 0 dB

In valore assoluto

Il rapporto tra le tensioni massime e minime stazionarie è definito con il termine VSWR o SWR

Voltage Standing Wave Ratio



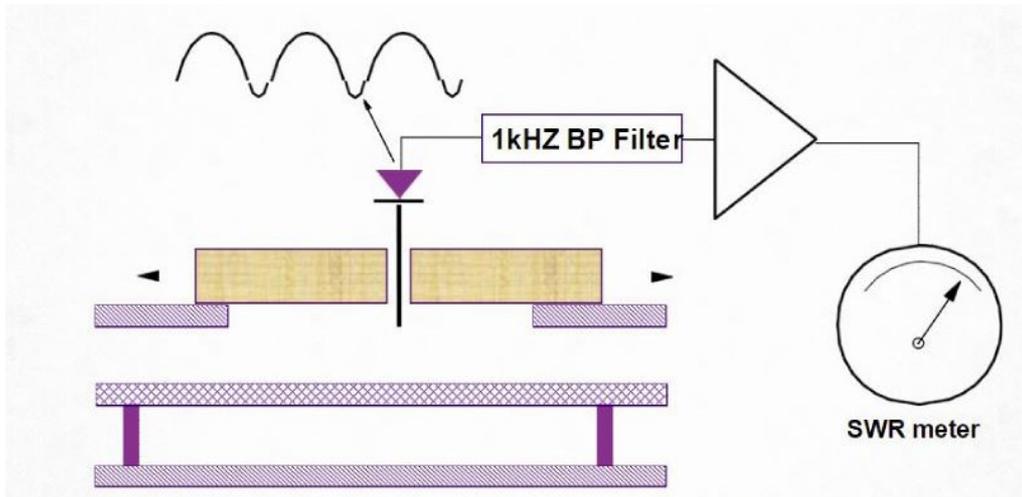
In lingua italiana si usa il termine ROS

Rapporto Onde Stazionarie

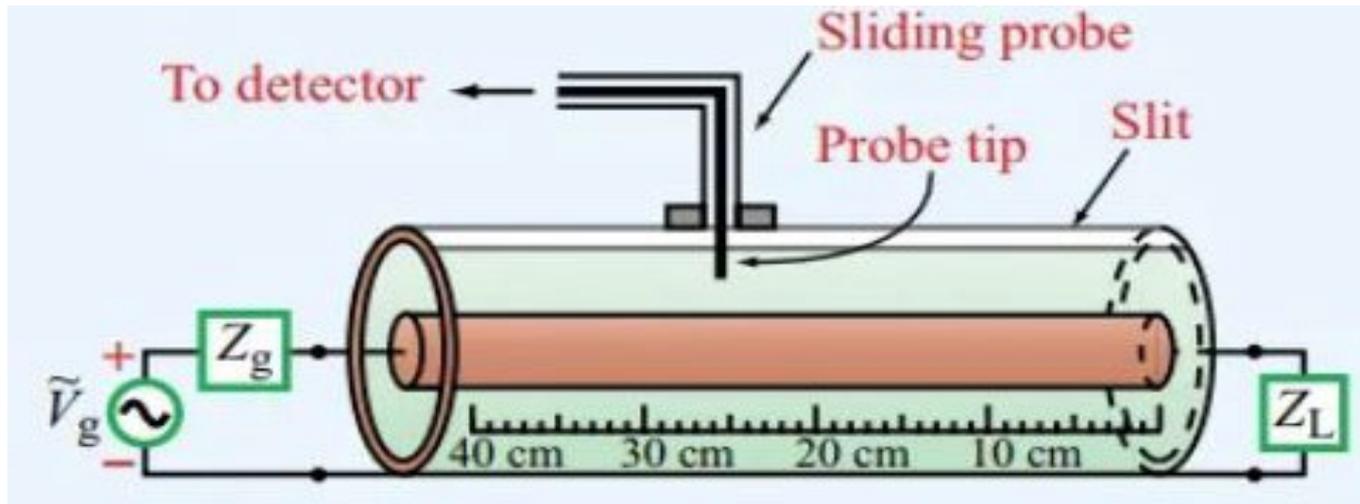
$$ROS = V_{max} : V_{min}$$

Il ROS si indica scrivendo un rapporto, es. 1,5:1 (nel gergo amatoriale)

Oppure semplicemente conviene dire ' il ROS è di 1,5 '



Si può analizzare l'onda stazionaria usando una linea coassiale fessurata



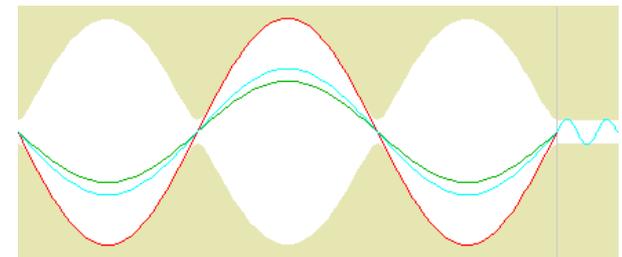
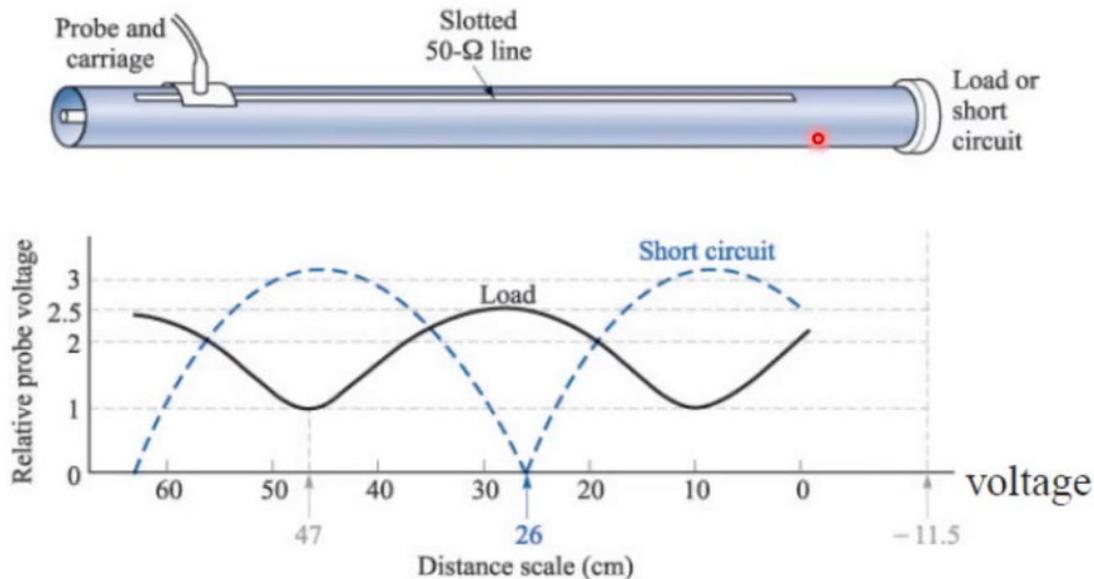
Slotted Line

Questa apparecchiatura permette di risalire anche alla natura del carico

Considerazioni sull'ondulazione rilevata

- 1 - se la tensione intersiziale lungo il cavo è costante allora il carico è adattato
- 2 - se la tensione intersiziale lungo il cavo varia poco allora il carico è parzialmente disadattato
- 3 - se la tensione intersiziale lungo il cavo ha dei punti vicini allo zero allora il carico è molto disadattato

Millivoltmetro RF



E per gli amanti della matematica...

Il ROS (o VSWR), il Gamma e il RL sono calcolabili con facili formule matematiche.

Coefficiente di Riflessione

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_d} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Rapporto Onde Stazionarie

$$\text{VSWR} = \frac{V_{\text{Max}}}{V_{\text{min}}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Potenza riflessa

$$P_r = |\Gamma|^2 P_d$$

Return Loss

$$\text{RL} = -10 \log |\Gamma|^2$$

Per agevolare la conversione fra i vari parametri è conveniente usare le tavole precompilate (esempio)

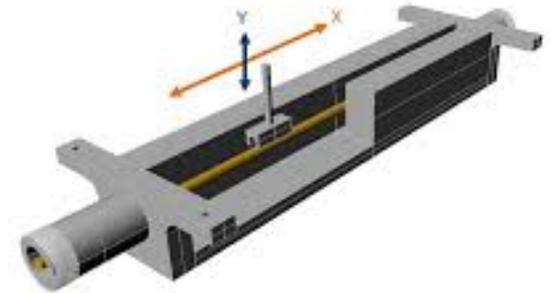
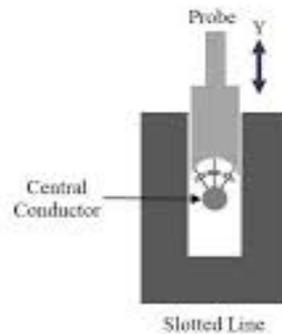
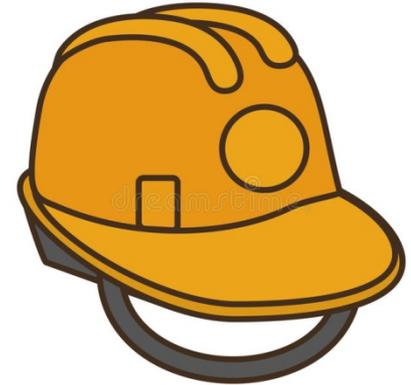
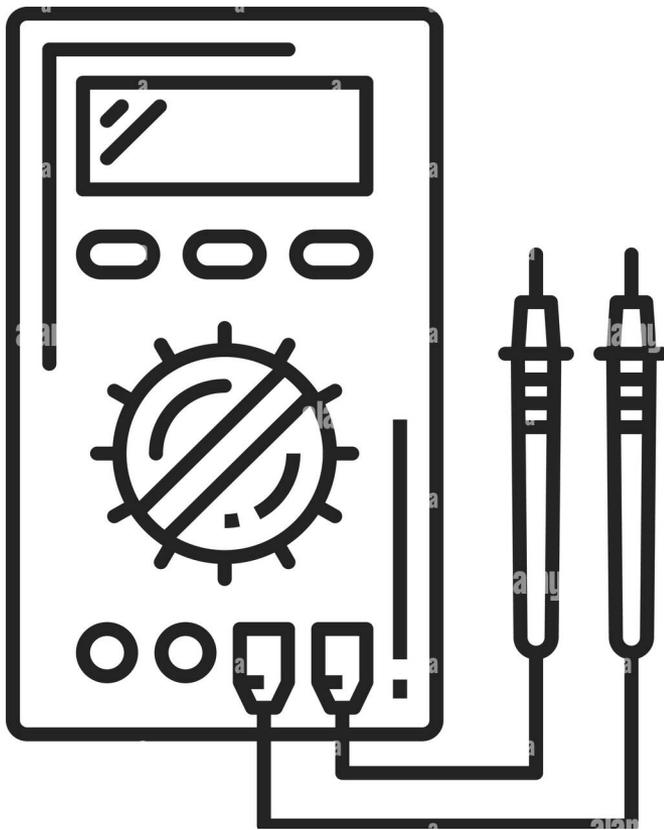
Return Loss (dB)	Reflected Pwr (%)	Forward Power (%)	Mismatch Loss (dB)	VSWR	Reflection Coefficient
0.00	100.00	0.00	∞	∞	1.00
1.00	79.43	20.57	6.87	17.39	0.89
2.00	63.10	36.90	4.33	8.72	0.79
3.00	50.12	49.88	3.02	5.85	0.71
4.00	39.81	60.19	2.20	4.42	0.63
5.00	31.62	68.38	1.65	3.57	0.56
6.00	25.12	74.88	1.26	3.01	0.50
7.00	19.95	80.05	0.97	2.61	0.45
8.00	15.85	84.15	0.75	2.32	0.40
9.00	12.59	87.41	0.58	2.10	0.35
10.00	10.00	90.00	0.46	1.92	0.32
12.00	6.31	93.69	0.28	1.67	0.25
15.00	3.16	96.84	0.14	1.43	0.18
20.00	1.00	99.00	0.04	1.22	0.10
30.00	0.10	99.90	0.00	1.07	0.03
∞	0.00	100.00	0.00	1.00	0.00

I radioamatori usano abitualmente i termini ROS o VSWR ma in ambito professionale si preferisce invece indicare il disadattamento dei carichi con il

Return Loss (RL)

poiché i calcoli risultano più facili e immediati.

Prove pratiche con la linea fessurata



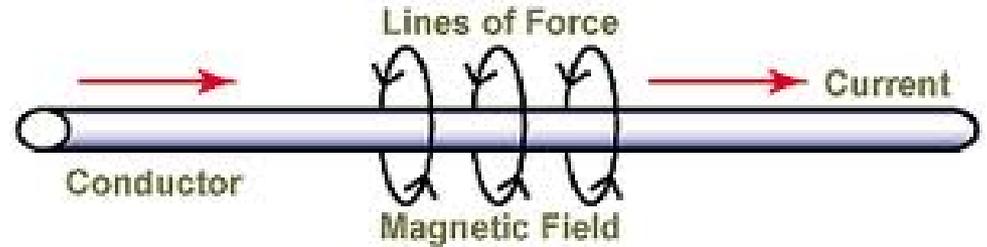
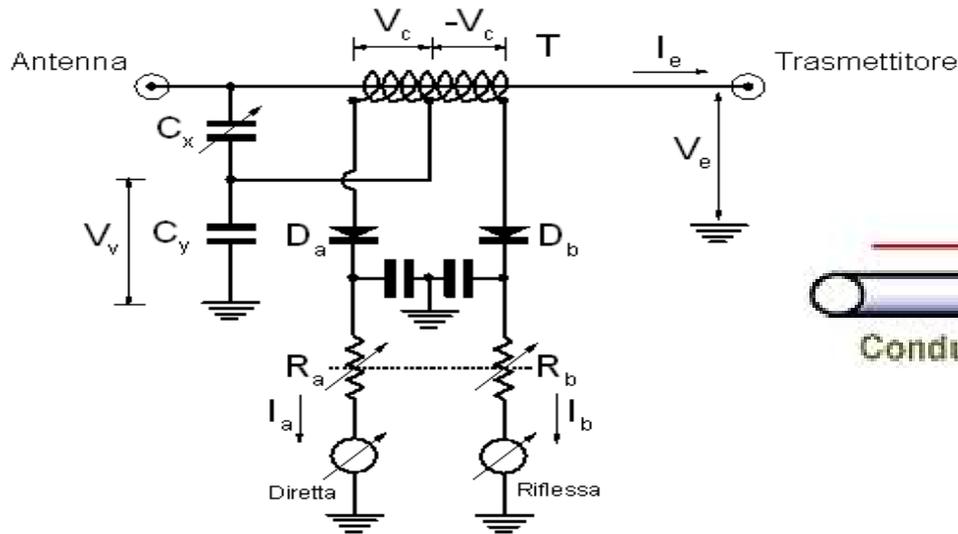
TEST **NOW**

A sostegno di quanto affermato, si supponga di terminare un misuratore di ROS direttamente su un carico fittizio.
Non essendo presente alcuna linea, non ha alcun senso parlare di ROS (meglio quindi definire l'adattamento con il RL)

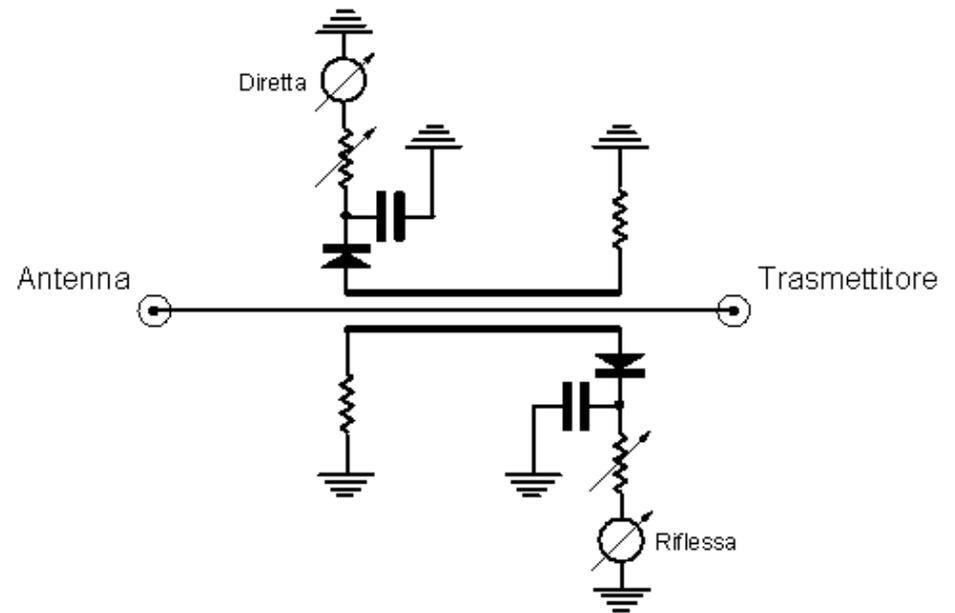
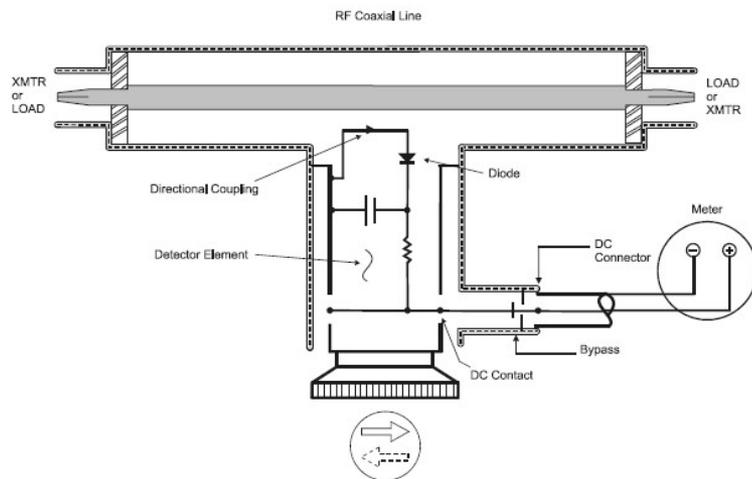


Carico fittizio

Come funzionano i cosiddetti ROS-metri



Thru-line Wattmeter Schematic



Conoscendo la potenza diretta e riflessa si può facilmente risalire al ROS o VSWR

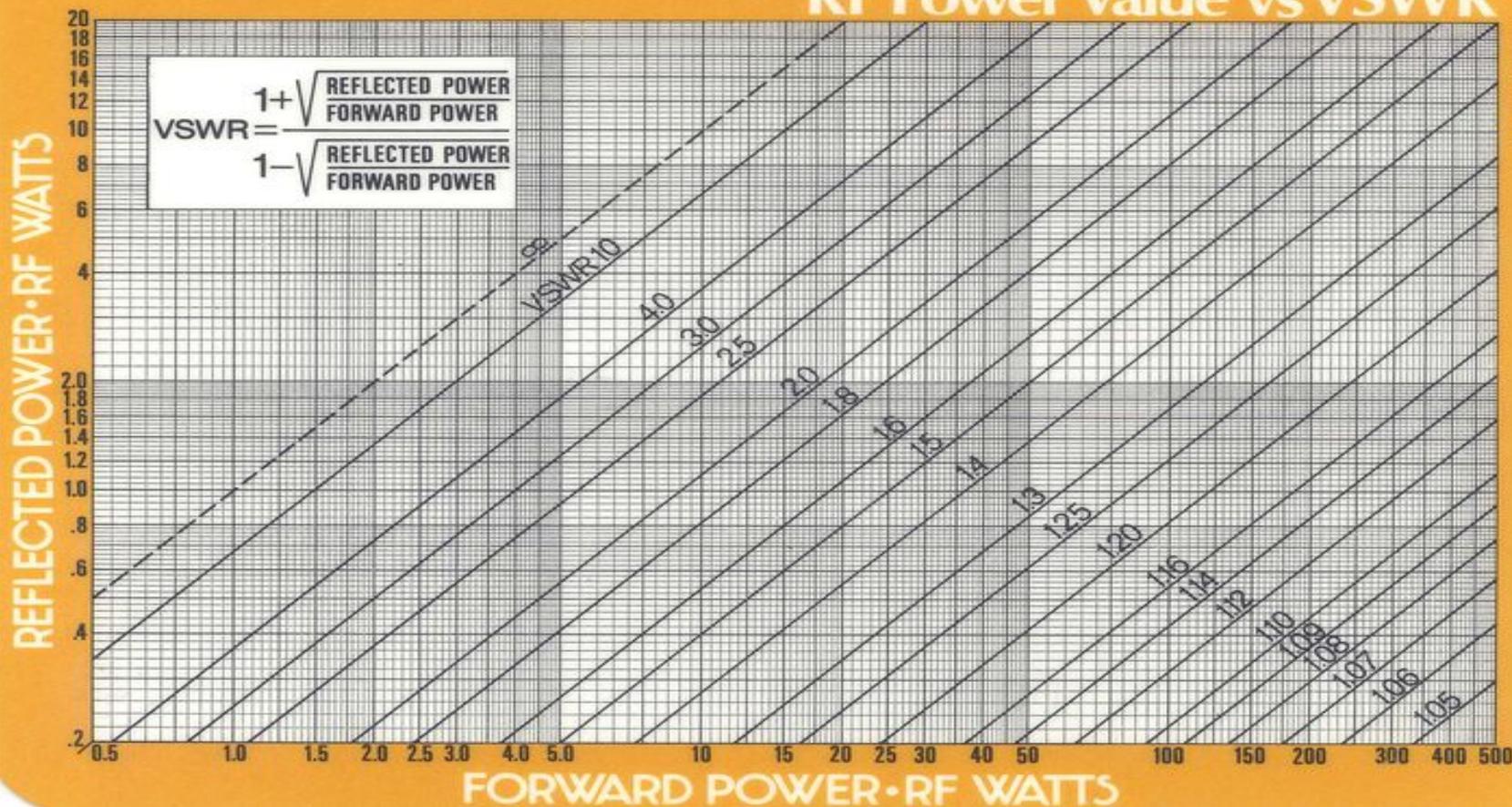
BIRD

Quality Instruments for RF Power Measurement

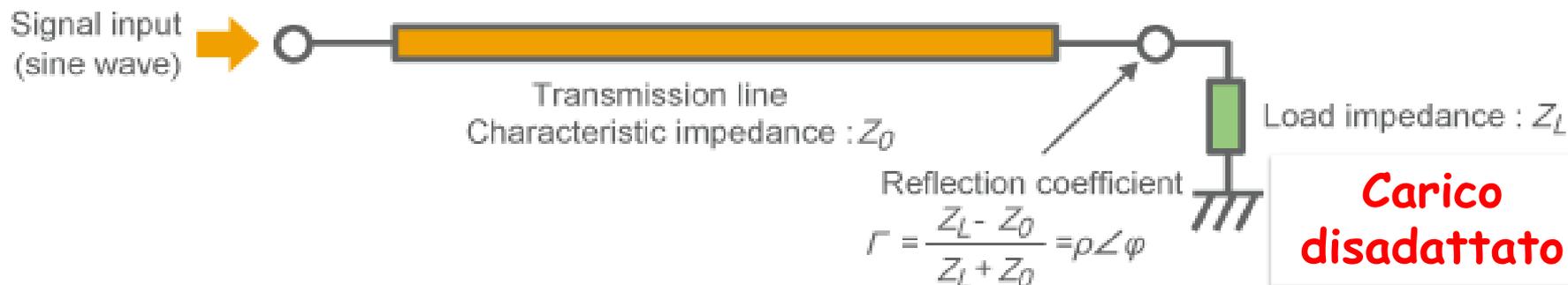
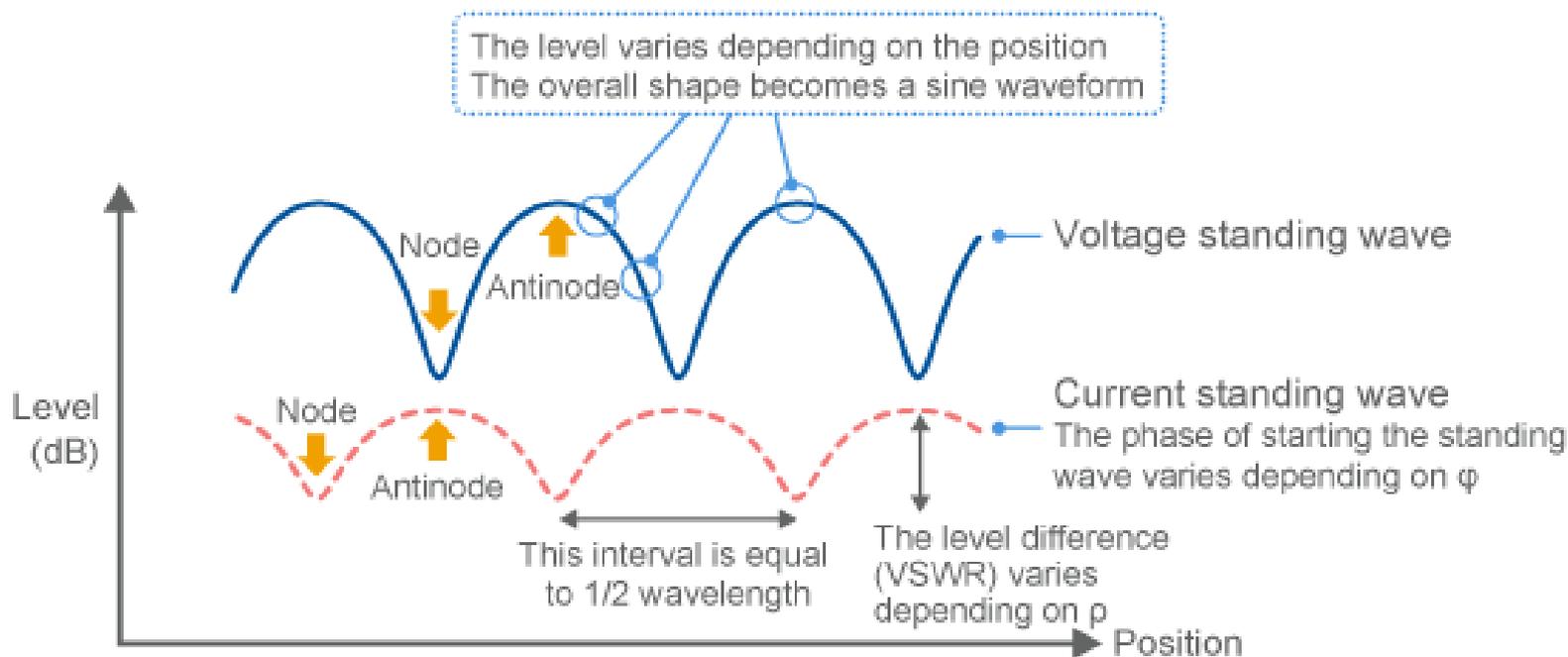
From .45 to 4000 MHz

and from 25 milliwatts to 250 kilowatts in 50-ohm coaxial line systems.

RF Power Value vs VSWR



Si osservi che nei punti dove la tensione cresce la corrente scende e viceversa

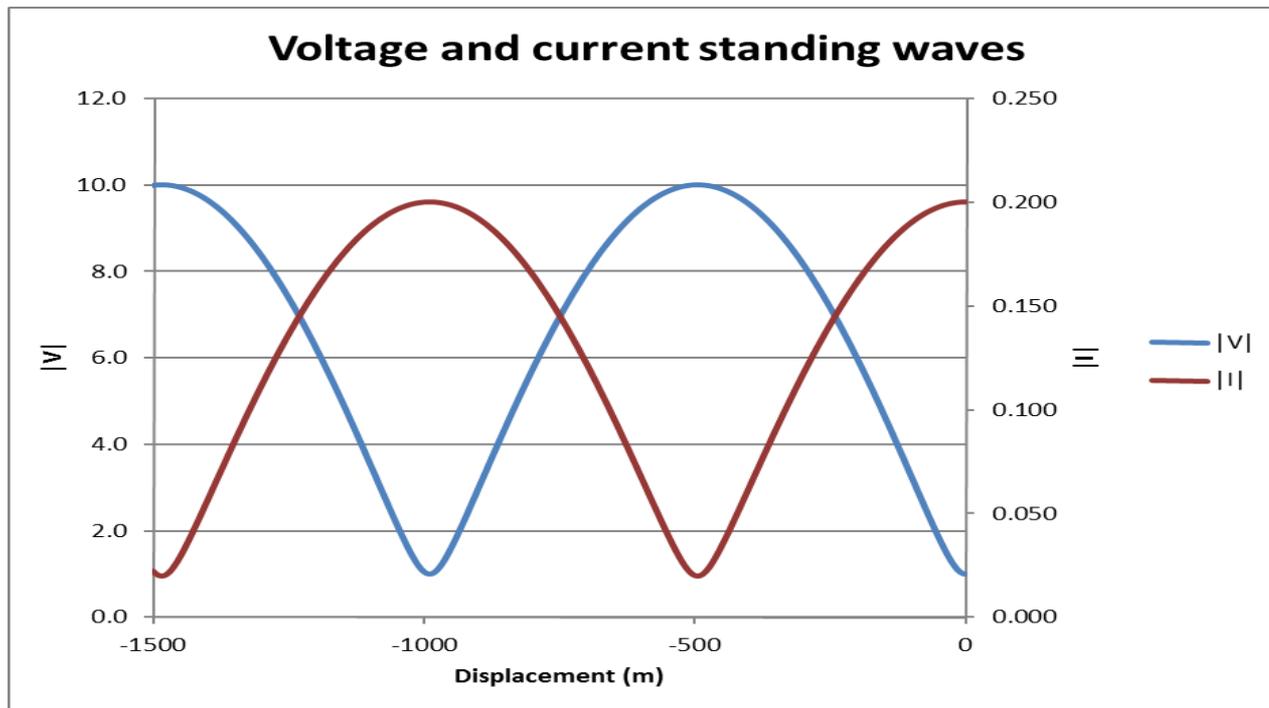


Dove lungo la linea, il rapporto tra tensione e corrente varia, anche l'impedenza varia

In particolare :

Dove la corrente è elevata e la tensione bassa, ci sarà una impedenza bassa

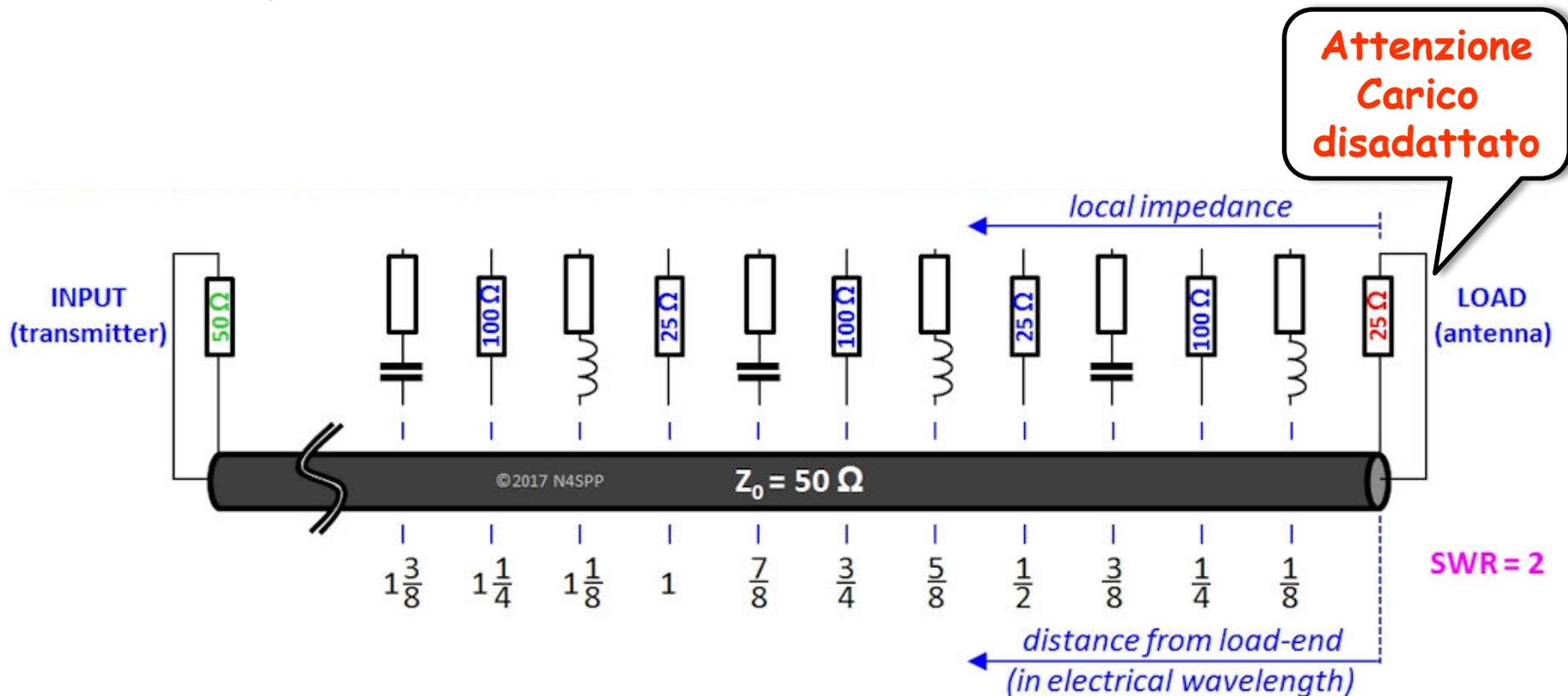
Dove la corrente è bassa e la tensione elevata, ci sarà una impedenza elevata

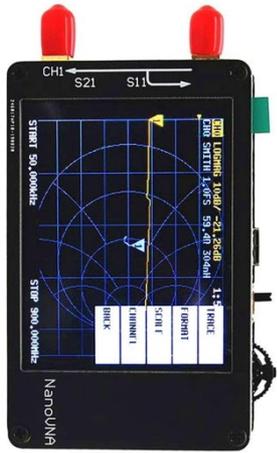


Linea terminata
con un carico
prossimo al
cortocircuito

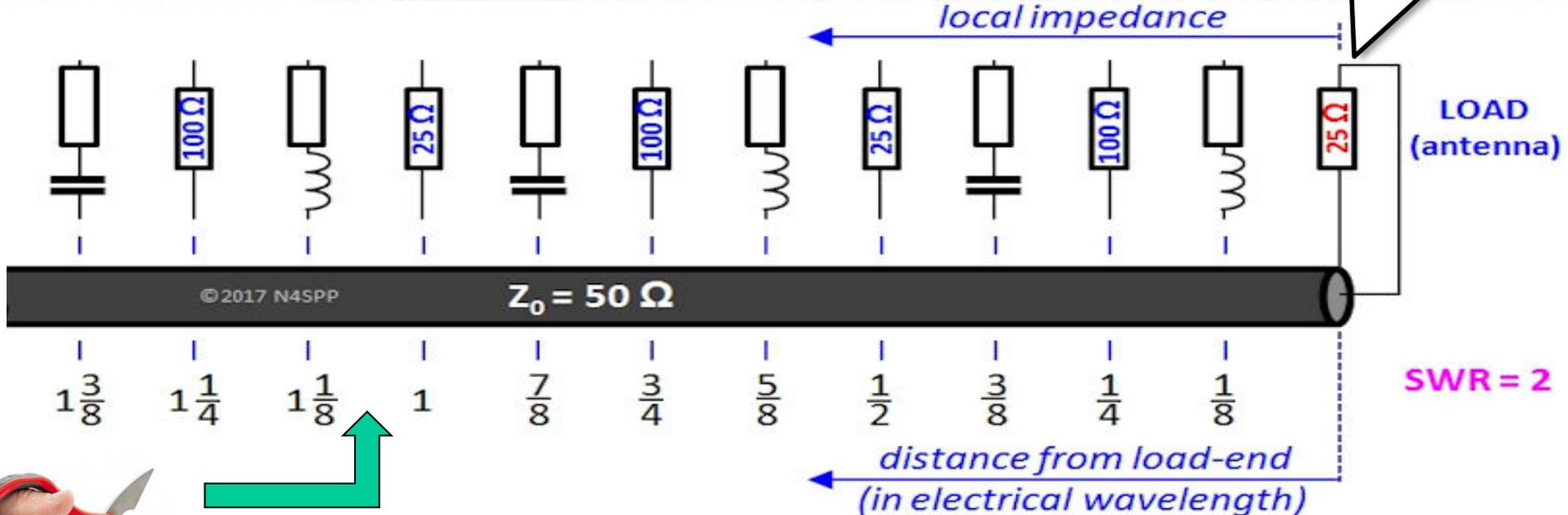
Sul carico non
c'è poca tensione
e la corrente è
molto elevata

Quindi in una linea caricata male, es. 25Ω
se si potesse sezionarla in tanti pezzettini,
essa si presenterebbe in questo modo.





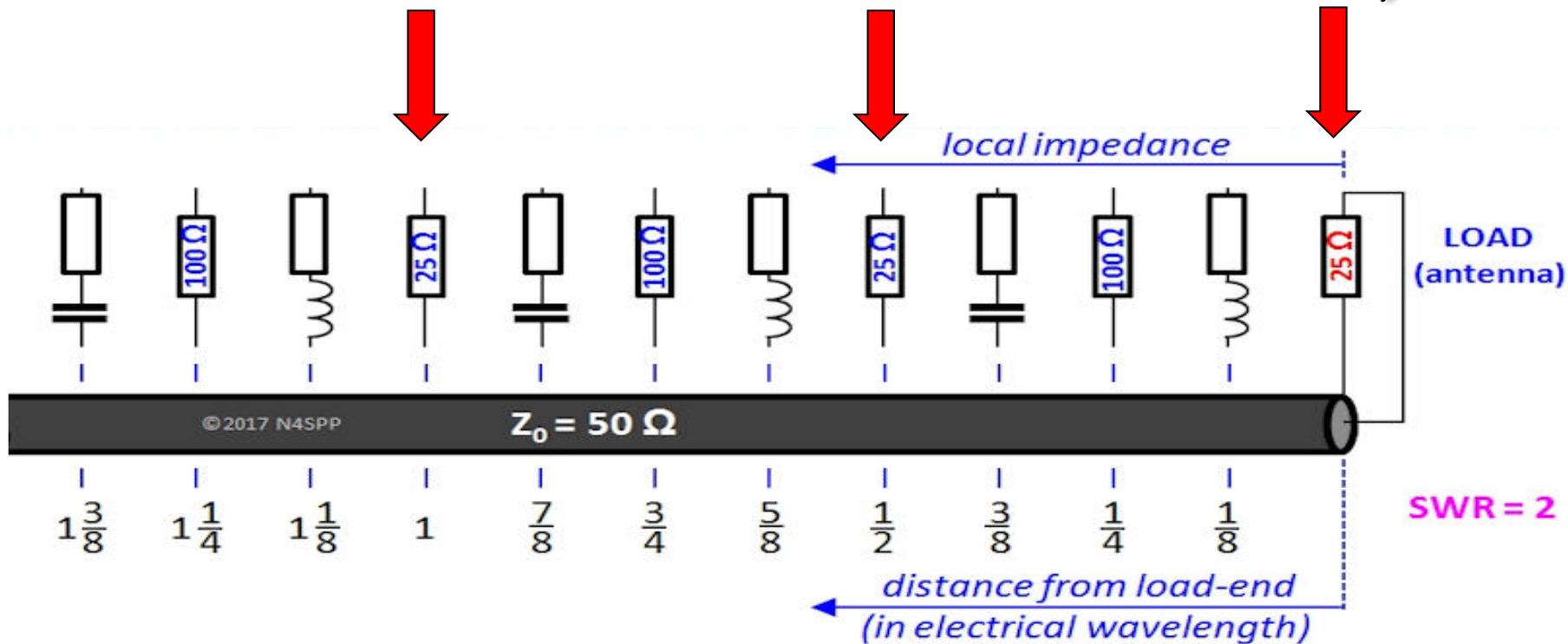
Tagliando casualmente una linea disadattata potremmo misurare la Z che c'è in quello specifico punto.



Solo sui punti multipli di lambda mezzi si ritrova la stessa Z del carico

Ciclicamente, in ogni punto distante dal carico lambda mezzi, l'impedenza si ripresenta con il medesimo valore del carico

Carico disadattato da 25 ohm



Vengono replicate non solo resistenze pure ma anche valori promiscui R e X di qualsiasi natura

Cosa importante da ricordare!



Il ROS dipende esclusivamente dal disadattamento tra l'impedenza della linea e l'impedenza del carico!

Pertanto tagliare la linea per cercare di migliorare un ROS elevato non serve a ridurlo!



Se tagliando si riscontrano variazioni di ROS, le cause possono essere:

- 1 - Il misuratore di ROS ha una direttività scadente.
- 2 - Il misuratore di ROS non ha i 50 ohm.
- 3 - Il cavo coassiale non ha 50 ohm
- 4 - Sulla calza esterna del cavo coassiale c'è della RF



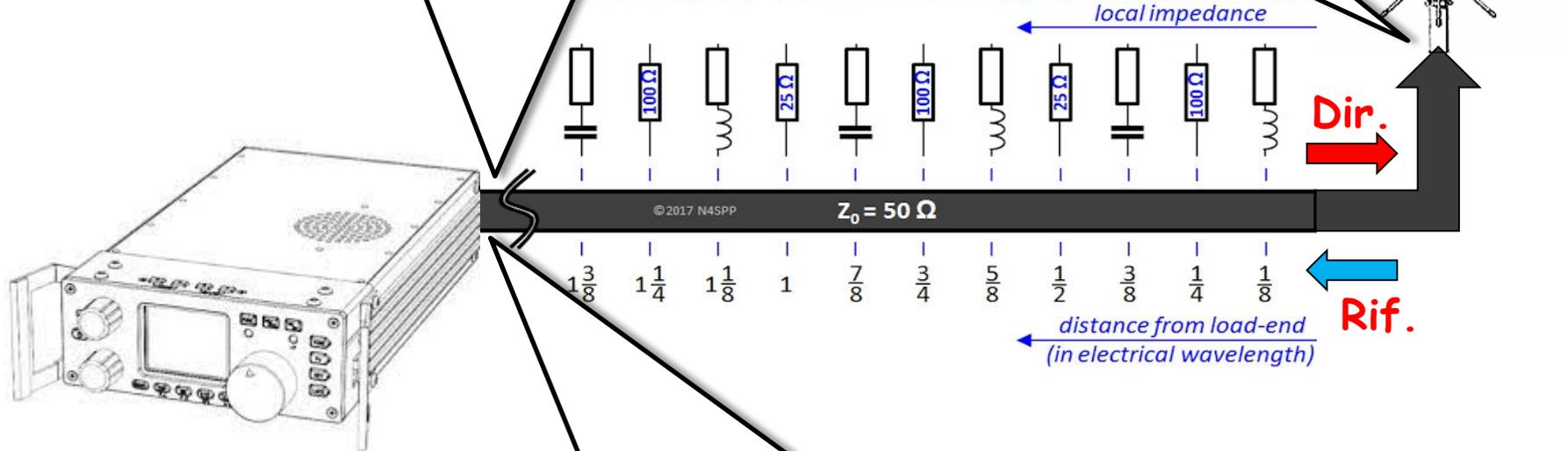
L'apparato RTX non risulta caricato con 50Ω (impedenza di massimo trasferimento)

Antenna difettosa (25Ω)

Il segnale riflesso di ritorno dall'antenna si propone all'apparato RTX con una impedenza diversa dai 50Ω

L'impedenza all'inizio linea dipende dalla lunghezza del cavo.

Carico disadattato



In ingresso al cavo coassiale ci può essere un valore casuale di impedenza.

Conseguenza della situazione illustrata per l'apparato TX



- 1 - Non eroga tutta la potenza disponibile.
- 2 - Potrebbero verificarsi sovratensioni o correnti distruttive negli stadi di uscita.
- 3 - Parte della potenza riflessa rientra nel trasmettitore
- 4 - Le protezioni di ROS potrebbero intervenire riducendo la potenza emessa.
- 5 - In certi casi l' accordatore interno potrebbe non essere in grado di riadattare la linea.

Per risolvere il punto 5, si può provare a variare la lunghezza del cavo coassiale sperando che un diversa Z della linea possa essere meglio gestita dall'accordatore.

Altra importante conseguenza !

Sul segnale di ritorno proveniente dall'antenna

- 1 - Il Tx (50Ω) non costituisce un buon carico per il segnale riflesso.
- 2 - La potenza riflessa verrà così in gran parte rimandata verso l'antenna.
- 3 - Sulla linea si instaura così un rimpallo, ripetuto più volte, dell'onda riflessa che rimbalza tra l'antenna e il Tx e un po' alla volta viene tutta consegnata alla antenna (tranne quella persa in linea).
- 4 - Per effetto del punto 3, un wattmetro inserito sul cavo potrebbe indicare una P_{out} maggiorata rispetto a quella prodotta dall'apparato.
- 5 - La potenza rimandata in antenna sarà parzialmente irradiata e contribuirà a migliorare l'efficienza del sistema trasmittente.
- 6 - Per effetto di questo fenomeno, anche le antenne con pessimo ROS potrebbero avere dei buoni e inaspettati rendimenti.
- 7 - Con cavi molto attenuanti e alto ROS, il vantaggio illustrato ai punti 4 e 5 potrebbe essere vanificato.

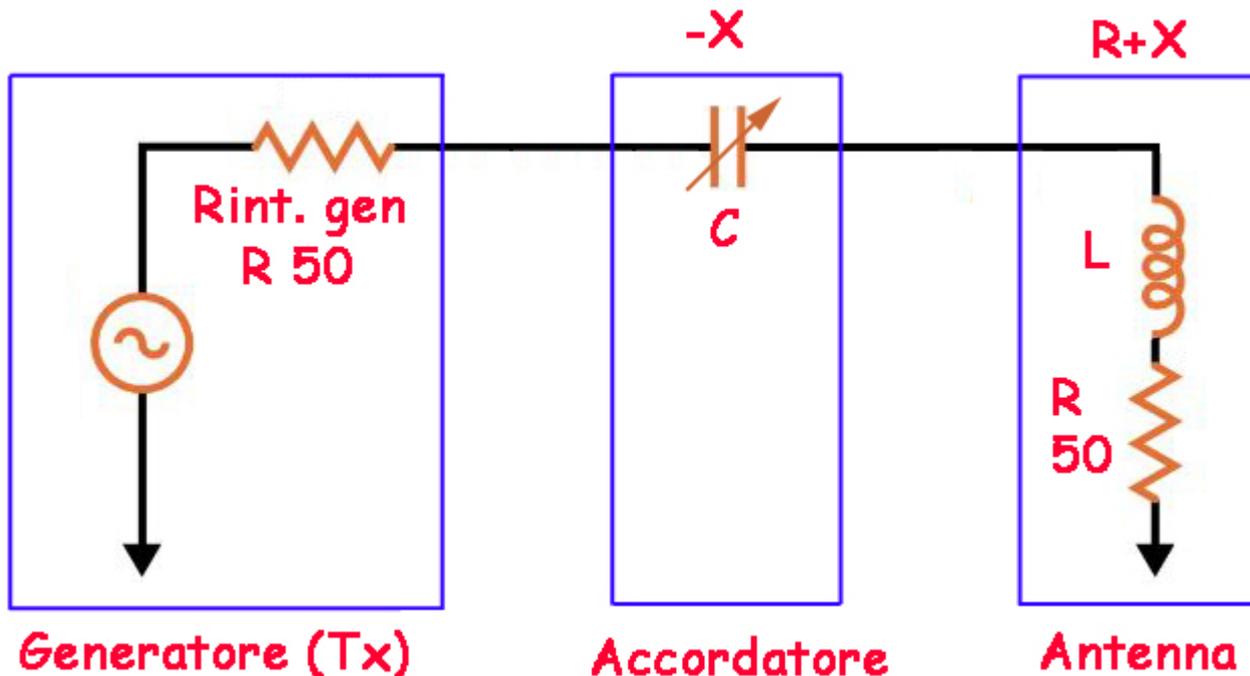
Il rimpallo della potenza tra Tx e Antenna potrebbe essere rappresentato anche così!



Visto che un eccessivo ROS può creare dei problemi, si può intervenire installando un **ACCORDATORE**.

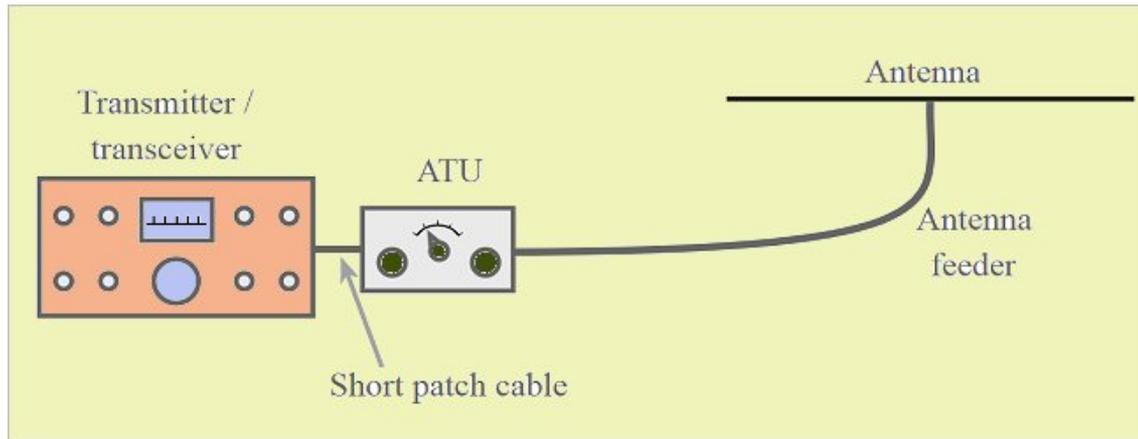
L'Accordatore è un trasformatore di impedenza che essenzialmente converte a 50 ohm la parte resistiva del carico disadattato e ne cancella la parte reattiva.

Oltre a questo, aggiunge un adeguato apporto di disadattamento (sia in fase che di livello), tale da rigettare indietro la potenza riflessa che proviene dall'antenna.

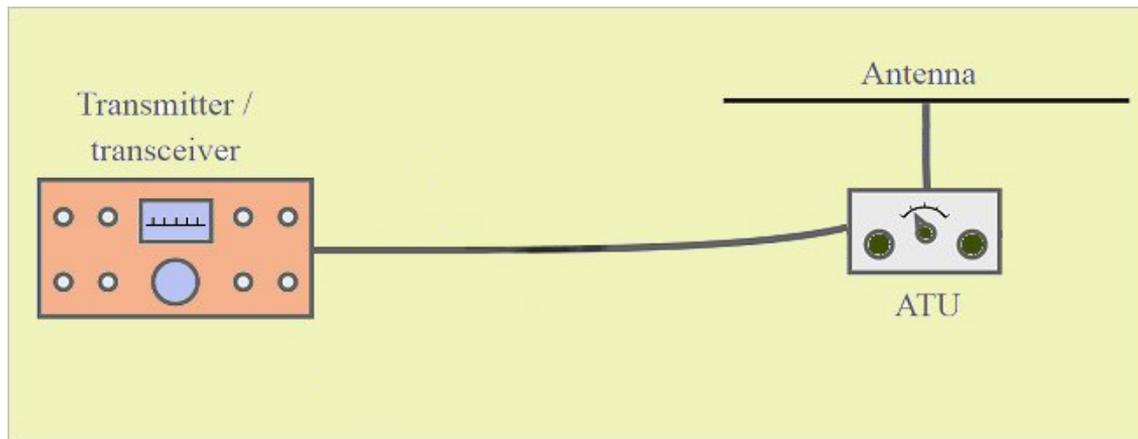


Dove è opportuno mettere l'ACCORDATORE (ATU) ?

(ATU=Antenna Tuning Unit)



Vicino al TX ?



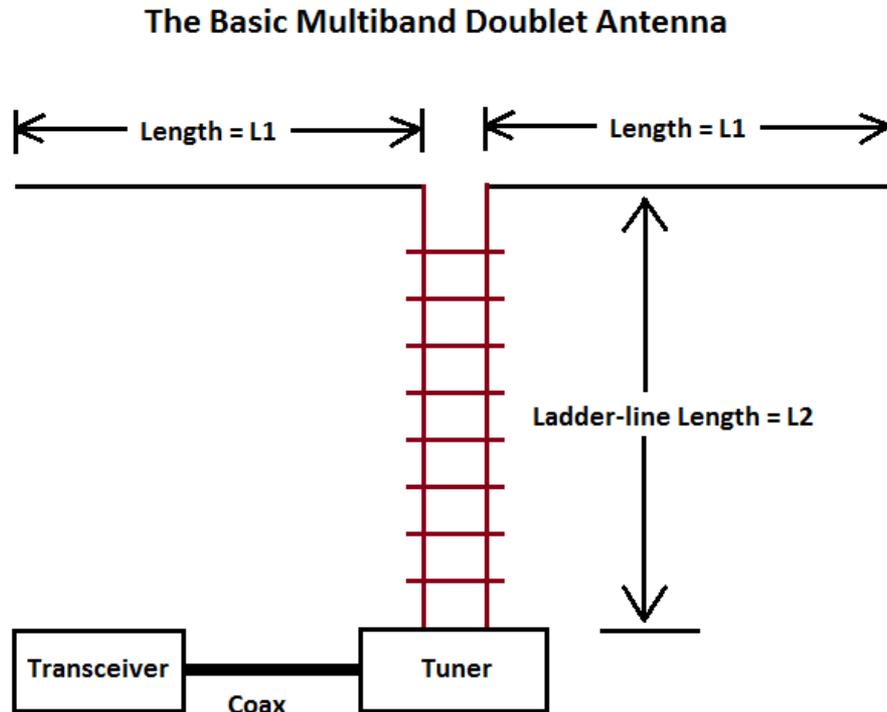
Vicino all'antenna ?

Prima di rispondere, si rifletta sul fatto, che un accordatore non può in alcun modo cancellare il ROS che c'è a monte dello stesso!

Il ROS è dovuto al disadattamento tra antenna e cavo ad essa collegato!

(Se possibile) l'accordatore va messo nelle immediate vicinanze della antenna!

In questo modo il cavo coassiale lavorerà senza essere in regime stazionario e la dissipazione in linea sarà minore.

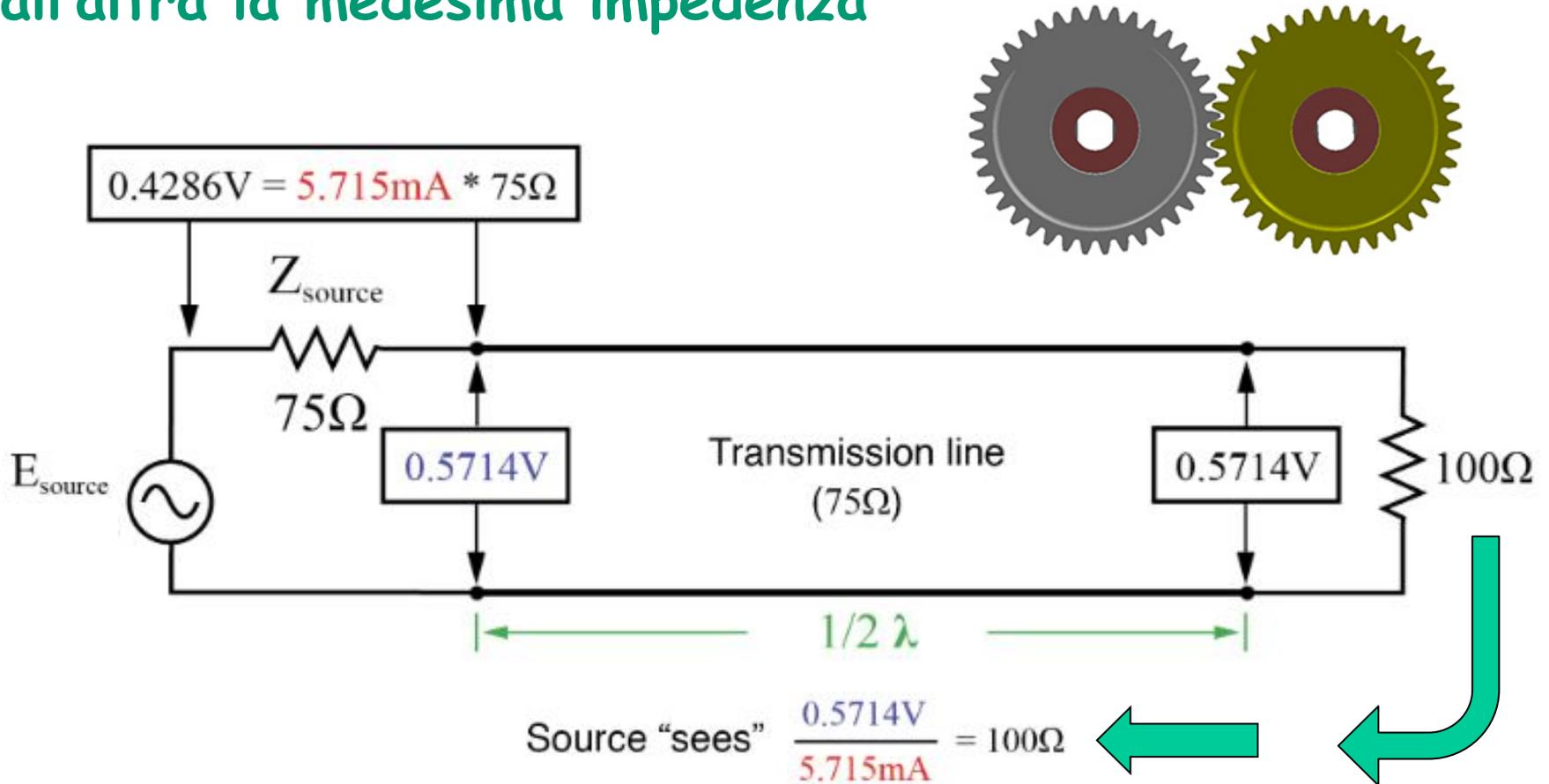
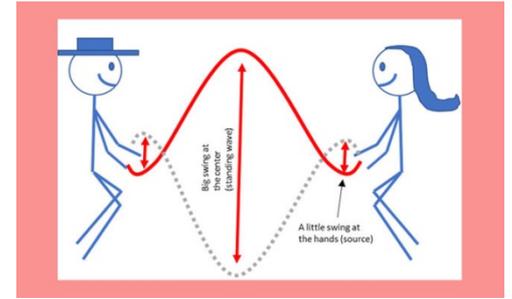


Se si vogliono eliminare le perdite in linea, tenendo l'accordatore in stazione, una possibile soluzione è quella di usare la linea a scaletta che presenta perdite molto basse

Linee in regime stazionario

Linea a 1/2 onda o multipli

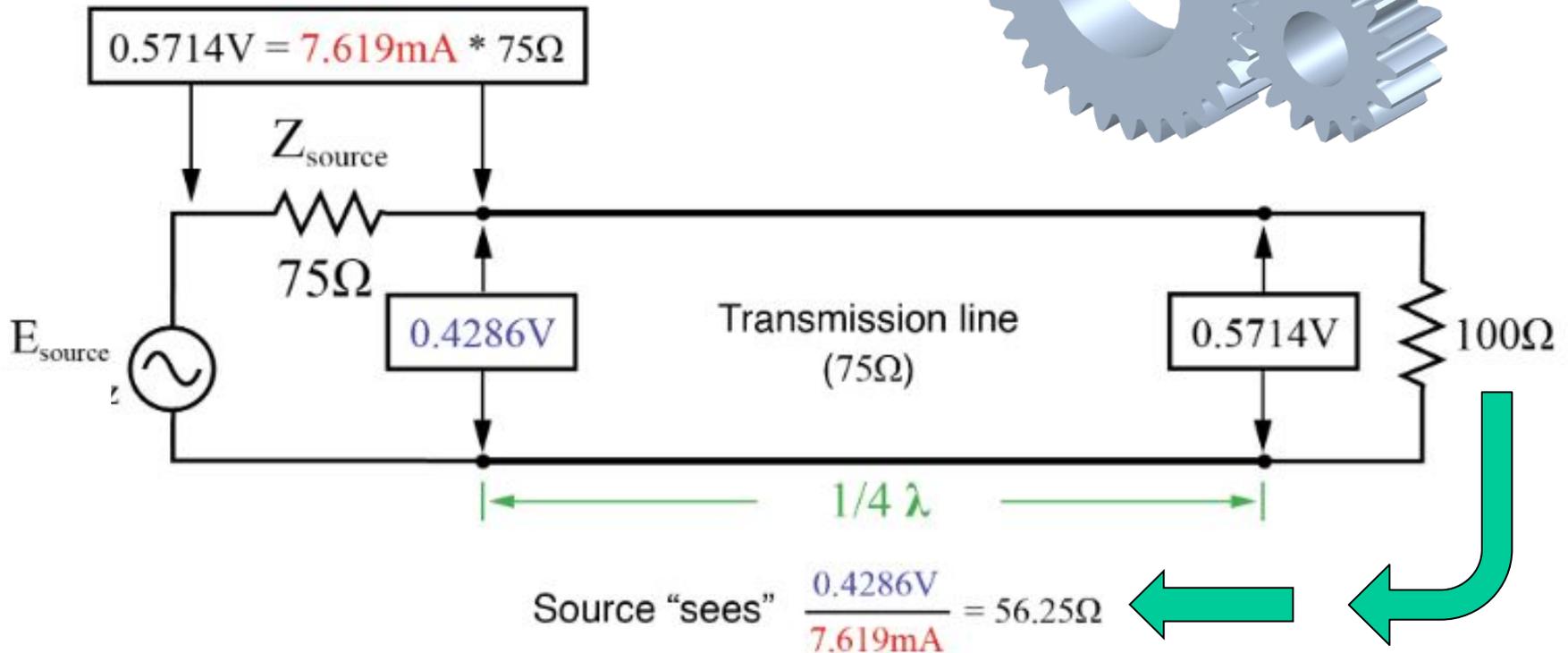
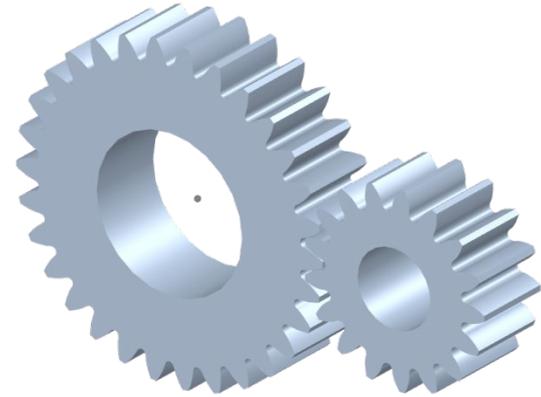
Trasferisce da una parte all'altra la medesima impedenza



Linee in regime stazionario

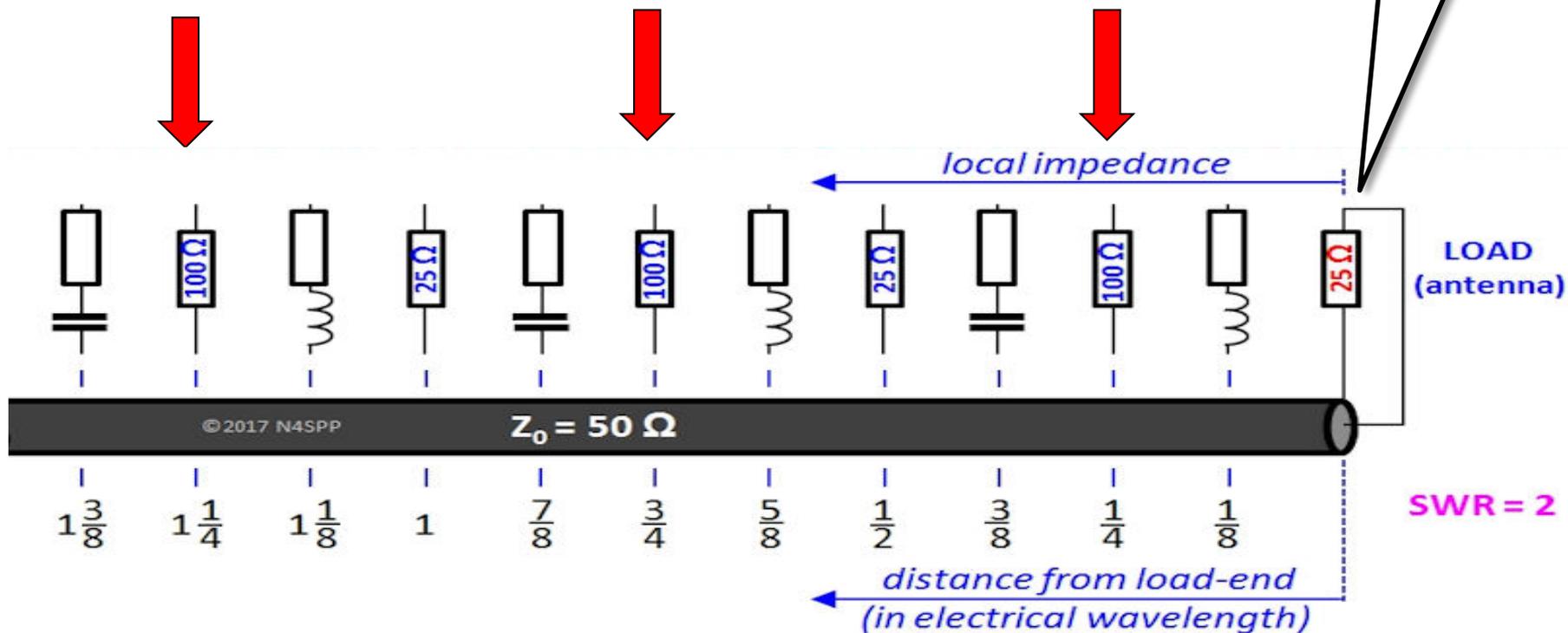
Linea a 1/4 onda o multipli dispari

Trasforma l'impedenza



Ciclicamente, in ogni punto distante dal carico lambda quarti dispari, l'impedenza si ripresenta trasformata in valore.

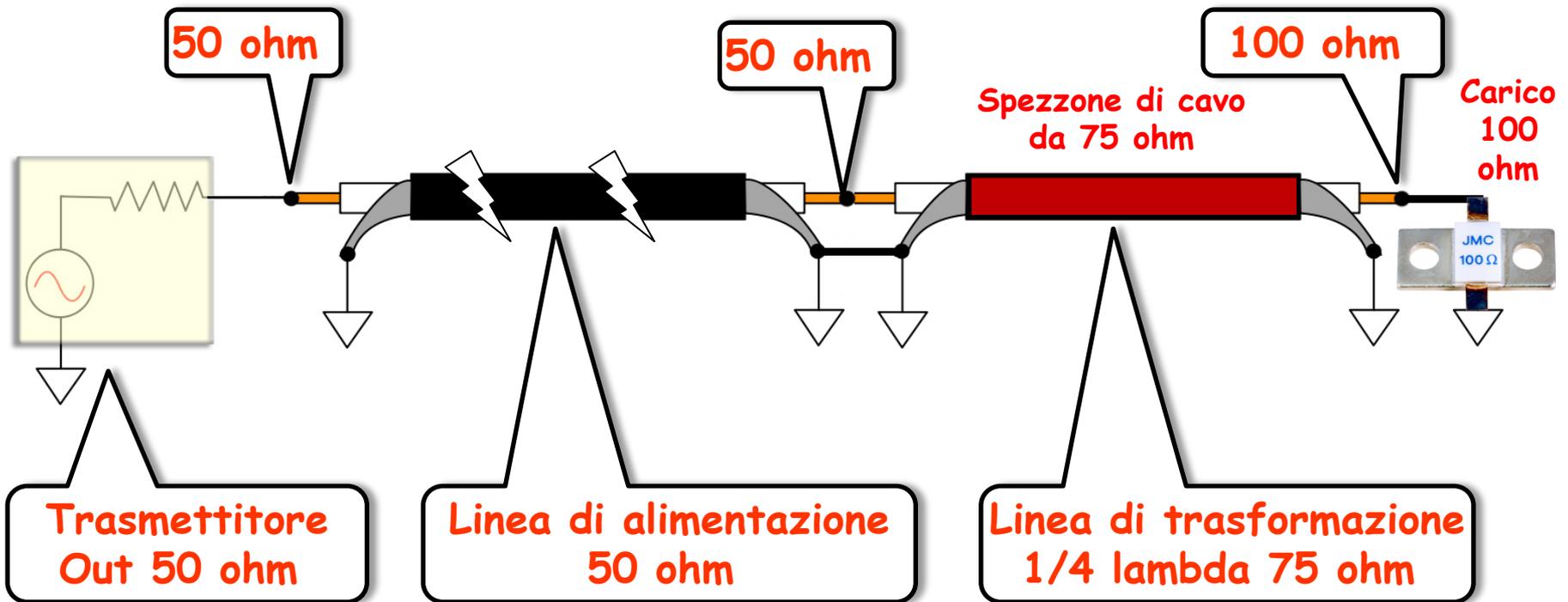
Carico disadattato da 25 ohm



$$(Z_{\text{line}} \times Z_{\text{line}}) : Z_{\text{carico}} = Z_{\text{trasformata}}$$

Se il carico ha un valore basso più basso della linea, il valore trasformato diventa alto
 Se il carico ha un valore più alto della linea, il valore trasformato diventa basso

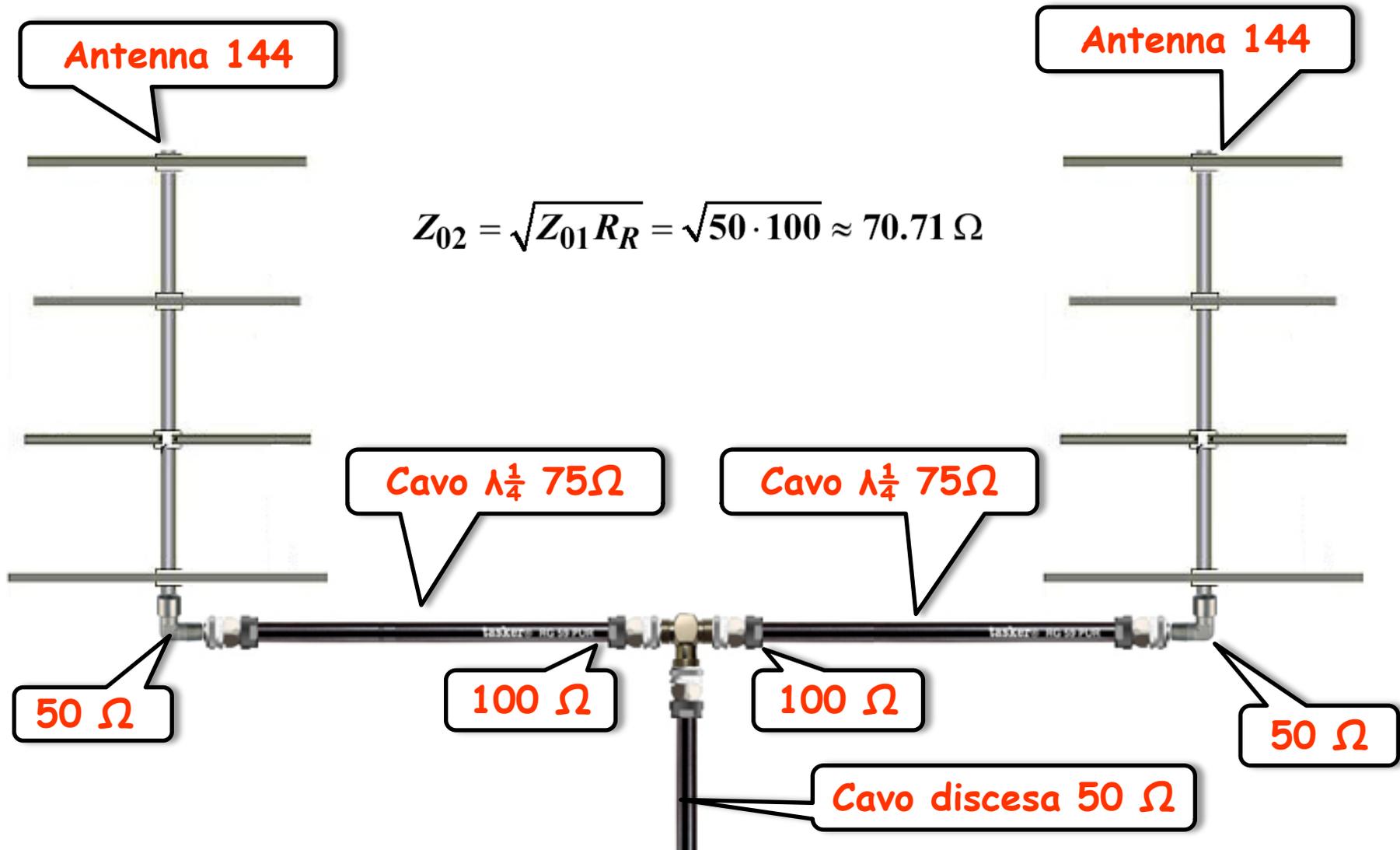
Trasformazione di impedenza realizzata con un cavo lambda $\frac{1}{4}$ avente impedenza caratteristica diversa da quella della discesa.



Z cavo di trasformazione =

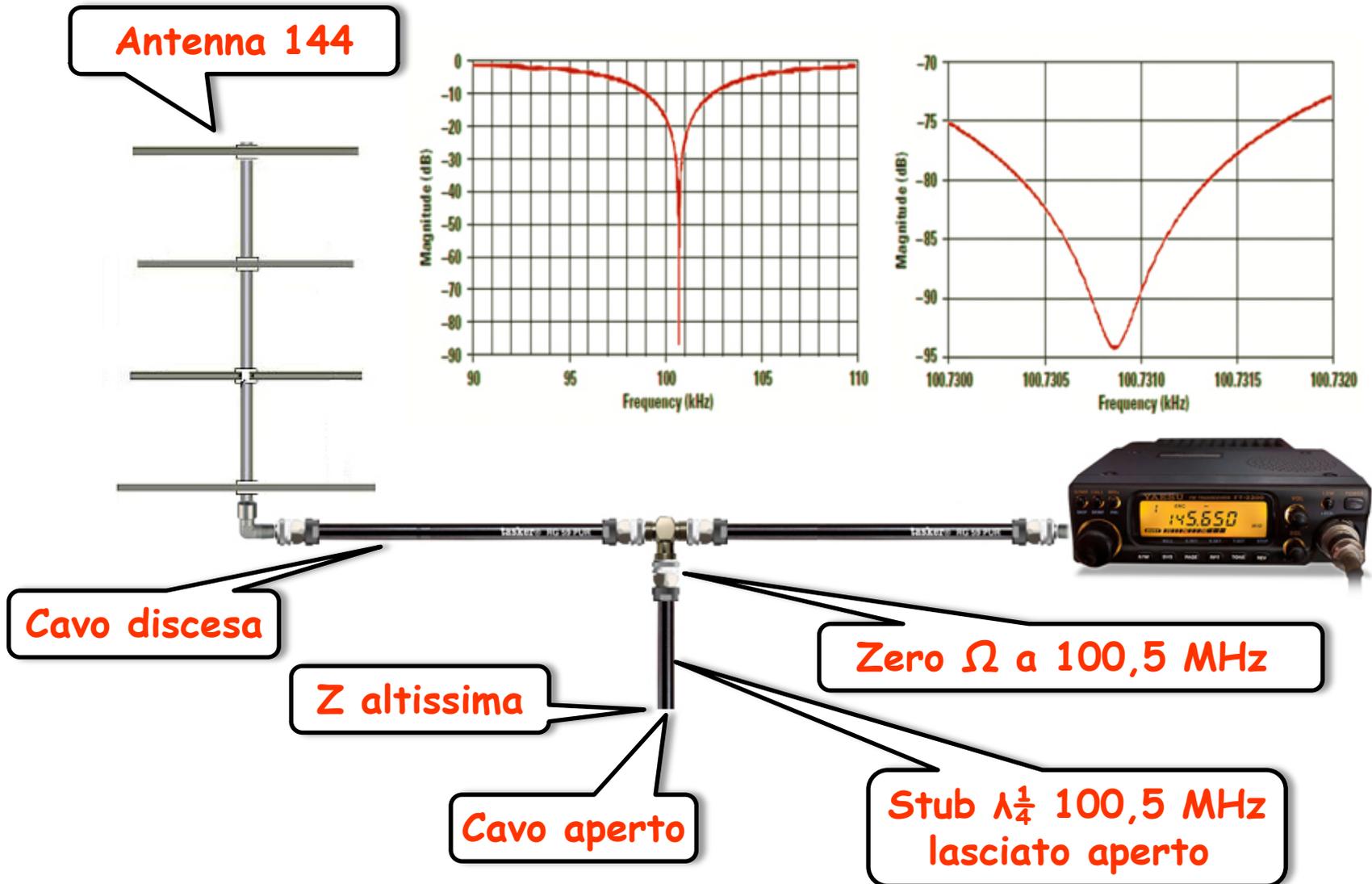
$$\sqrt{Z_{\text{Linea}} \times Z_{\text{Carico}}}$$

Esempio di accoppiamento di due Yagi



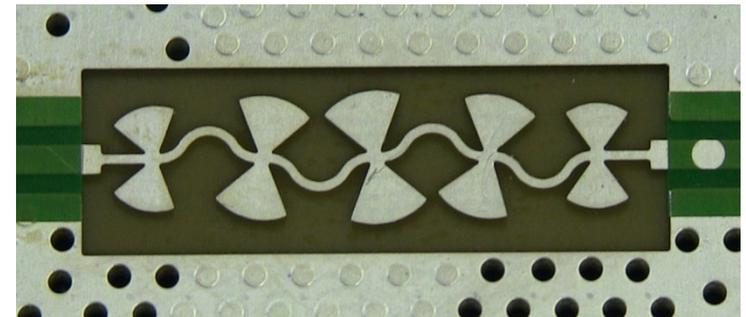
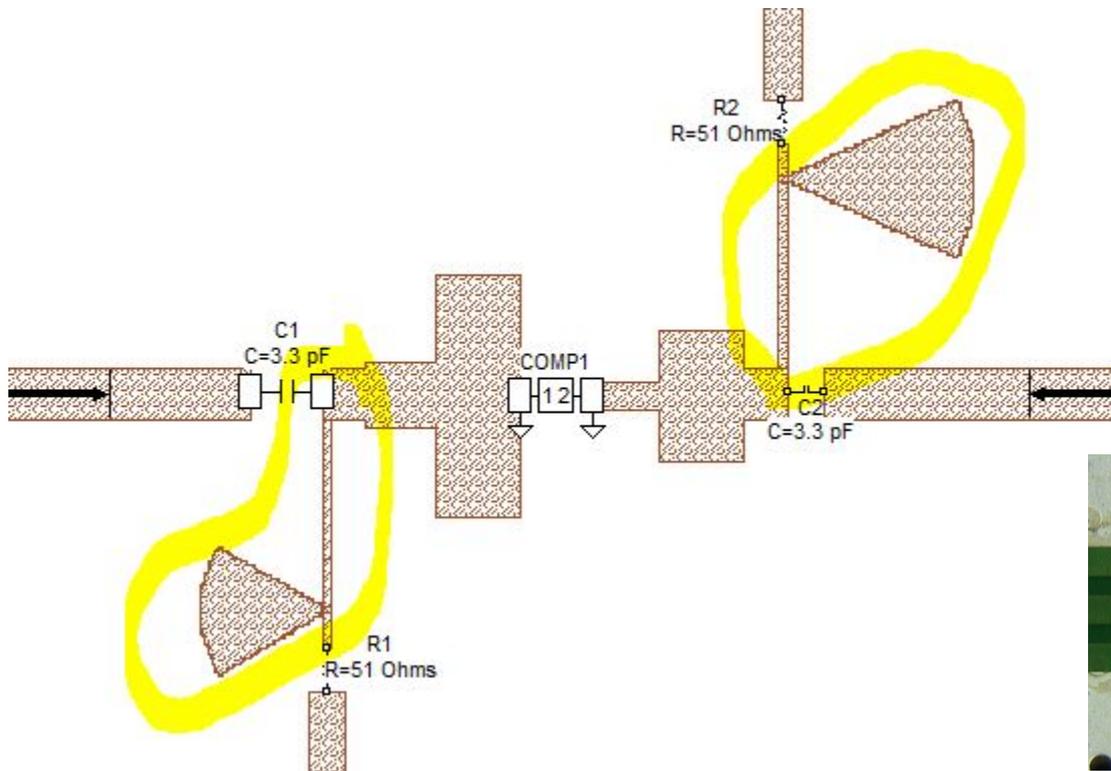
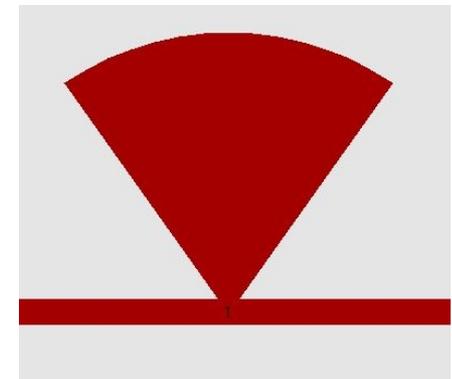
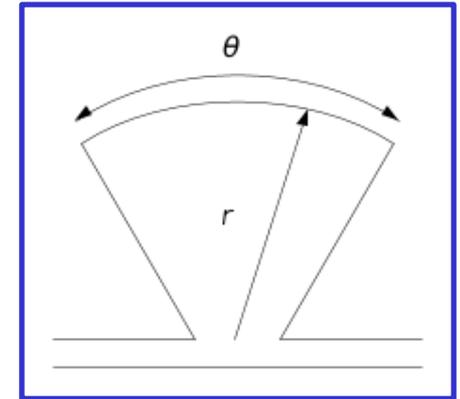
Esempio d'uso di una linea $1/4$ lambda

Filtro elimina segnale disturbante banda FM 100,5 MHz



Altro esempio di linea 1/4 lambda

Stub Radiali usati nei circuiti a microonde con circuiti in stripline per bloccare il transito a determinate frequenze





Una linea con ROS basso può avere una lunghezza qualsiasi

La linea con ROS elevato diventa un trasformatore di impedenza

Il ROS è generato unicamente dal disadattamento linea/carico

Il ROS è uguale in qualsiasi punto nelle linee (poco attenuanti)

Il valore del ROS non cambia tagliando la linea

Il ROSmetro non è un ROSmetro ma un misuratore di Gamma

L'accordatore vicino all'apparato non elimina il ROS sulla linea

L'accordatore dovrebbe perciò essere inserito vicino all'antenna

L'alto ROS di una antenna non pregiudica la sua buona resa.



Grazie per l'attenzione in3hog giovanni