

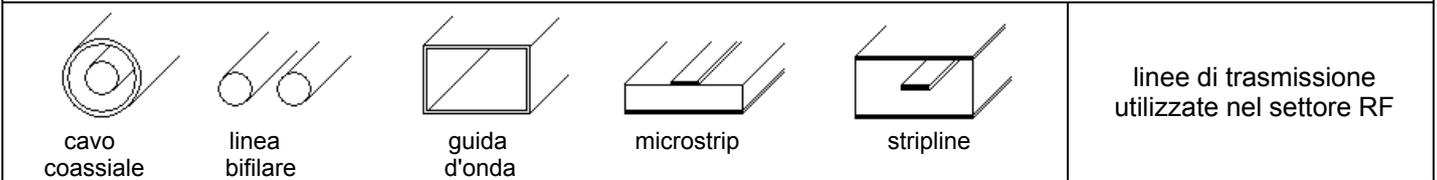
Sono riportate alcune informazioni utili alla comprensione dei concetti fondamentali sui cavi coassiali , con i trucchi del mestiere e notizie curiose che raramente è possibile trovare sia sui testi ufficiali che sui cataloghi dei costruttori .

## Introduzione ai cavi coassiali

Forse nessuno di noi ci ha mai pensato ma lo sviluppo delle radiocomunicazioni non sarebbe mai stato possibile senza l'invenzione del cavo coassiale , esso è utilizzato continuamente nelle nostre applicazioni che neanche pensiamo a tale possibilità . L'attribuzione dell'invenzione del cavo coassiale è cosa contrastata e complessa , esistono vari brevetti sia americani che europei già verso la fine del '800 (primo brevetto in UK 1880 di O. Heaviside ) la scoperta è poi caduta nel dimenticatoio per molti anni sicuramente perché allora non c'era niente da far passare in un cavo coassiale !!

La vera scoperta , ed il suo utilizzo reale , risale al 1929 a seguito della necessità di utilizzare un conduttore a maggior efficienza e con minor disturbi per le trasmissioni di molti canali telefonici su un'unica "portante".

Subito dopo negli anni '30 questa tecnica venne vantaggiosamente utilizzata anche per gli esperimenti con la nascente televisione e così via fino ai giorni nostri . Il disegno sotto riporta tutte le linee RF utilizzate , da KHz a GHz , la linea in cavo coassiale è la più usata e la più conveniente , con la tecnologia attuale è utilizzata fino a 110 GHz .



Per comprendere meglio le caratteristiche di un cavo coassiale è necessario conoscere anche tutti i parametri ad esso associati, per esigenze di spazio ne tratteremo solo alcuni , i più importanti sono :

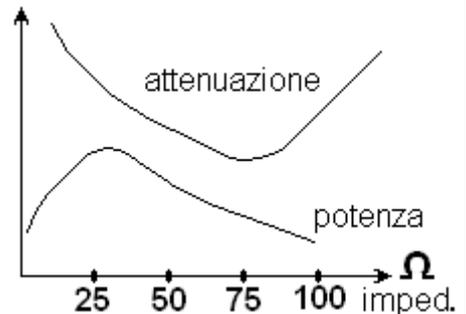
**Impedenza - Attenuazione - Frequenza di taglio e Frequenza massima ottimale**  
**Massima potenza di transito - Return Loss - Fattore di velocità**

### IMPEDENZA CARATTERISTICA

L'impedenza di una linea coassiale ( oltre circa 1 MHz ) dipende solo dal tipo di dielettrico utilizzato , ovvero dalla sua costante dielettrica  $\epsilon_r$  , e dal rapporto tra il diametro del conduttore interno ed il diametro interno dello schermo ( non dalle dimensioni ) ed è indipendente dalla lunghezza e dalla frequenza . Ma perché esistono cavi a 50Ω e a 75Ω ?

Dal grafico a lato si vede chiaramente che la minor attenuazione si ottiene circa con 75-77Ω di impedenza mentre la massima potenza attorno ai 30Ω (questo a parità di dimensioni del cavo ) .

La Marina militare USA decise durante la seconda guerra mondiale di adottare il valore di 52Ω come giusto compromesso tra attenuazione e potenza massima applicabile ( poi arrotondato a 50 Ω ) . Con la nascita della televisione invece si decise di adottare il valore di 75 Ω poiché era quello che assicurava la minima attenuazione , considerando il fatto che negli impianti di ricezione TV non c'è potenza lungo il cavo . Visti i primordiali sistemi dei ricevitori TV , in VHF prima e UHF dopo e le notevoli attenuazioni , sicuramente fu la scelta migliore .



rapporto tra il diametro del conduttore interno e quello esterno per ottenere l'impedenza di 50 e 75 Ω con vari dielettrici

	impedenza	Aria $\epsilon_r$ 1	Polietilene $\epsilon_r$ 2,3	Teflon $\epsilon_r$ 2,04	Foam $\epsilon_r$ ~ 1,5
	<b>50 Ω</b>	2,3	3,5	3,3	2,8
<b>75 Ω</b>	3,5	6,6	6	4,6	

La normalizzazione a 50Ω fu una scelta decisiva poiché già in Europa nel primo dopoguerra la Germania adottò il valore a 60Ω pensando che fosse la via giusta poiché a metà strada fra 50 e 75Ω . La normalizzazione a 50Ω fu molto importante poiché ad ogni lato del cavo si deve pur collegare qualcosa , ovvero un mondo di "cose" che anche a loro volta dovranno essere normalizzate a 50Ω .

Oltre ai cavi a 50 e 75Ω sono disponibili anche valori strani e particolari , vediamo a cosa servono :

- 12,5 e 25 Ω , per trasformatori e adattamento di stadi di potenza , es. push-pull a stato solido e/o a banda larga .
- 35 Ω per la realizzazione di sommatore ibridi , serve anche come adattatore di impedenza a  $\lambda/4$  tra 50Ω e 25Ω ( 25Ω è dovuto a 2 impedenze da 50Ω in parallelo ) .
- 70 Ω per la realizzazione di combinatori Wilkinson .

Questi cavi sono generalmente disponibili in configurazione rigido o semirigido deformabile in modo da ottenere il massimo delle prestazioni essendo utilizzati in stadi di particolare criticità o di alta potenza .

Formula per il calcolo dell'impedenza

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

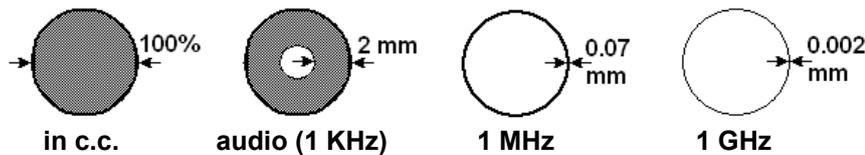
### ATTENUAZIONE

L'attenuazione , dopo l'impedenza , è la discriminante più importante nella scelta di un cavo coassiale , essa è linearmente proporzionale alla lunghezza del cavo infatti si misura in dB / metro . L'attenuazione dipende dalla bontà del

dielettrico , dalle dimensioni fisiche e dall'effetto pelle dei conduttori utilizzati, è quindi intuitivo che la minor attenuazione si ha con grossi cavi e con dielettrico aria . Il dielettrico in aria è molto complicato da realizzare e viene generalmente utilizzato solo per broadcast radio TV dove le potenze sono notevoli , inoltre questi cavi necessitano anche di pompe di vuoto per evitare la contaminazione da agenti esterni nel dielettrico aria ( umidità e condensa ) . Un sistema molto economico per diminuire le perdite consiste nell'iniettare gas inerte ( Azoto ) nel dielettrico in modo da far avvicinare la costante dielettrica a quella dell'aria , questo viene effettuato molto spesso con i cavi in Foam ma anche con il Teflon.

L'aggiunta del gas inoltre garantisce una maggior stabilità nel tempo dei parametri del cavo anche in presenza di condizioni critiche esterne come l'umidità e sbalzi termici . La scelta del dielettrico è importante per avere meno perdite nel cavo , infatti con dielettrico teflon si hanno minor perdite rispetto al classico polietilene , ma il vero salto di qualità in termini di attenuazione lo si raggiunge solo con dielettrico espanso , sia esso in foam o teflon .

L'attenuazione da effetto pelle del conduttore ha un andamento pari alla radice quadrata della frequenza e con l'argentatura del conduttore si migliora leggermente l'attenuazione per effetto pelle . Come regola generale si può considerare che fino alle frequenze basse-medie è predominante l'attenuazione da effetto pelle e resistenza del conduttore mentre dalle microonde a salire ( 8-10 GHz ) la bontà del dielettrico è predominante . La caratteristica di propagazione superficiale dovuta ad effetto pelle è utilizzata in taluni cavi come un vantaggio economico in quanto è possibile utilizzare conduttori più poveri , o più economici , con rivestimenti ad esempio di rame o argento , infatti i cavi a bassa attenuazione hanno spesso il conduttore interno tubolare in rame o pieno ma in alluminio ramato .



effetto pelle ovvero la parte dove scorre la maggior corrente in un conduttore

**EFFETTO PELLE**  
salendo di frequenza la resistenza del conduttore aumenta poiché la corrente scorre solo sulla parte più esterna (per il conduttore esterno) e solo sulla parte interna (per quanto riguarda lo schermo)

Ovviamente aumentando le dimensioni del cavo coassiale si ha minor attenuazione fino ad arrivare alla frequenza di taglio . Anche la schermatura esterna contribuisce all'attenuazione ma il suo contributo è sempre più modesto rispetto agli altri 2 fattori . In effetti un aspetto da considerare e poco conosciuto è lo strato di conduttore esterno che fa da schermatura , se questo è troppo scarso si ha una maggior attenuazione dovuta alla perdita di segnale per irradiazione, cioè alla non buona schermatura del cavo ( ved. RG58 ) . Un piccolo contributo all'aumentare delle perdite consiste anche nell'utilizzare un conduttore interno costituito da molti trefoli , se questa tecnica migliora la flessibilità del cavo introduce però un piccolissimo aumento nelle perdite di circa il 5 % .

**FREQUENZA DI TAGLIO - FREQUENZA MASSIMA OTTIMALE**

La frequenza di taglio di un cavo coassiale non è da confondere con la massima frequenza dove è "conveniente" utilizzare un dato cavo . Un determinato cavo ha senso utilizzarlo fino ad una certa frequenza ( a volte consigliata dal costruttore e denominata " operating frequency " ) semplicemente perchè fino a quella frequenza i parametri restano abbastanza idonei all'uso che se ne deve fare , a parità di frequenza lo stesso cavo non potrà essere utilizzato invece per altre applicazioni . Ad esempio , nei cablaggi a microonde dei ponti radio , anche a 20 GHz , si usano cavi di tipo deformabile lunghi 10 - 30 cm per le interconnessioni interne , lo stesso cavo non sarà certo utilizzabile per la discesa antenna , ad esempio di 10 o 20 m sulla stessa frequenza , poichè per distanze così lunghe l'attenuazione sarebbe troppo elevata , inoltre questi cavi non sono adatti per usi esterni . Nella scelta di un cavo spesso non viene considerato il fattore isolamento dipendente dalla schermatura del conduttore esterno , ad esempio in un cablaggio interno di un ponte ripetitore VHF o UHF sarebbe inammissibile utilizzare cavi a singola schermatura , con il rischio di accoppiamenti RF tra Tx e Rx vanificando la bontà di un ottimo filtro duplexer con 80 dB di isolamento fra Tx e Rx , infatti l'accoppiamento fra 2 cavi RG58 che passano paralleli e vicini per 3 o 4cm presentano un isolamento di solo 70-75 dB . Quindi nella scelta di un cavo si devono considerare circa una decina di fattori , molti dei quali in contrasto tra loro .

La frequenza di taglio invece rappresenta la massima frequenza assoluta di utilizzo, oltre la quale subentrano risonanze varie che modificano la fase e l'ampiezza nel propagarsi delle onde elettromagnetiche nel cavo stesso .

La propagazione in un cavo coassiale avviene nel modo TEM ( Transversal Electric and Magnetic field ) ovvero le linee di campo elettrico e magnetico sono perpendicolari al cavo stesso . Oltre questa frequenza appaiono risonanze strane nella propagazione dando luogo a fenomeni poco prevedibili . La frequenza di taglio è inversamente proporzionale alle dimensioni del cavo stesso , in pratica è un valore molto più elevato della frequenza massima ottimale tranne che per i cavi semirigidi poichè per la loro conformazione e ottima qualità si utilizzano praticamente fino alla frequenza di taglio . Per frequenze molto elevate andranno quindi utilizzati cavi con piccoli diametri , considerando l'attenuazione .

Frequenza di taglio e frequenza massima ottimale da noi consigliate per alcuni noti cavi coassiali

freq.	RG 58	RG 223 ( 2 schermi )	RG 213	RG 214 ( 2 schermi )	RG 316	RG 316 ( 2 schermi )	RG 142 ( 2 schermi )	UT 141 Multiflex 141	UT 086 Multiflex 86
Taglio	~ 20 GHz	~ 20 GHz	~ 12 GHz	~ 12 GHz	~ 30 GHz	~ 30 GHz	~ 20 GHz	33 GHz	40 GHz
massima ottimale	100-1000 MHz	3 - 6 GHz	2 - 4 GHz	4 - 8 GHz	2 - 3 GHz	3 - 6 GHz	4 - 8 GHz	26 GHz	33 GHz
	Ø 5 mm		Ø 10 mm		Ø 2,5 - 3 mm		Ø 5 mm	Ø 4 mm	Ø 3 mm
	<b>isolamento in polietilene</b>				<b>isolamento in teflon</b>				

NOTA per il cavo RG 58 la scarsa schermatura e la bassa qualità di molti cavi in commercio sono i fattori che peggiorano di molto le caratteristiche .

## **MASSIMA POTENZA DI TRANSITO**

Per applicazioni ad altissime potenze , come accennato in precedenza , si usano cavi con dielettrico aria , il conduttore centrale è tenuto nel centro da una serpentina che scorre per tutta la lunghezza del cavo con supporti a distanze ravvicinate . Per applicazioni a potenze medio-alte si usano cavi con dielettrico teflon , il quale può lavorare fino a 165°C , a parità di dimensioni l'isolamento in teflon permette circa di triplicare la massima potenza applicabile unita ad una affidabilità maggiore rispetto ai cavi in polietilene . Con l'aumentare della frequenza la massima potenza di transito diminuisce , sia per effetto delle perdite dovute al dielettrico che per effetto pelle inoltre le perdite aumentano di molto la temperatura del cavo stesso . Per applicazioni a temperature ancora maggiori è disponibile uno speciale cavo ricoperto con anima caricata in fibra di vetro ( RG115 ) in grado di lavorare fino a 200°C e con dimensioni di solo 10,4 mm , può reggere fino 6 KW a 100 MHz e la stessa copertura permette il passaggio vicino ad elevate fonti di calore .

## **RETURN LOSS**

Il return loss di un cavo coassiale , ovvero l'adattamento di impedenza , non viene quasi mai considerato nella scelta , infatti raramente i costruttori forniscono questo dato . In effetti quando si intesta un cavo coassiale con un connettore è poi molto difficile determinare se l'adattamento di impedenza dipende dal cavo , dal connettore o dalla qualità nella intestazione . Tuttavia un consiglio possiamo darlo , da nostre esperienze dovute a migliaia di operazioni fatte sui cavi coassiali , possiamo affermare che tutti i cavi coassiali a doppio schermo hanno un comportamento in termini di return loss molto migliore rispetto ai simili a singolo schermo ( RG 223 contro RG 58 , RG 214 contro RG 213 , RG 316 a 2 schermi contro RG 316 normale ecc. vedere tabella precedente ) . Ad esempio , utilizzando lo stesso connettore SMA e la stessa cura nell'intestazione , il cavo RG 316 a 2 schermi può essere utilizzato anche oltre 6 GHz con un return loss tipico di 20 dB , mentre un cavo RG 316 normale darebbe simili risultati di R.L. a circa 2-3 GHz . Ricordiamo che un buon adattamento di impedenza non è importante solo per avere basse perdite ma soprattutto per non alterare l'impedenza del dispositivo a cui viene collegato . Ad esempio , se si collega un ottimo filtro passabanda , ottimamente tarato con un network analyzer , ad un cavo disadattato si otterrà un aumento di ripple nel filtro e altri fenomeni non prevedibili in funzione del disadattamento e della fase . A titolo puramente indicativo si può dire che un cavo per cablaggi e uso generico viene accettato per buono con un valore di R.L. fino a 20dB , a microonde anche fino a 16dB , diverso valore invece per i cavi di misura o laboratorio ( vedere più avanti ) .

## **FATTORE DI VELOCITA' - ε<sub>r</sub> - COSTANTE DIELETTRICA**

In funzione del dielettrico utilizzato e quindi della propria ε<sub>r</sub> , la velocità di propagazione nel cavo diminuisce in funzione di un numero che indica la percentuale di velocità rispetto all'aria , ad esempio nei comuni cavi in polietilene ( RG 58 213 ecc ) il fattore di velocità è pari al 66% , ovvero in questi cavi la lunghezza d'onda si accorcia del 34% rispetto all'aria . Il fattore di velocità serve quindi per calcolare stub di adattamento di impedenze o per calcolare la lunghezza d'onda reale nel cavo . Ad esempio un cavo lungo λ/4 come adattatore di impedenza , alla frequenza di 100 MHz , il calcolo della lunghezza per un cavo tipo RG 213 sarebbe :

$\lambda_{ARIA}$  a 100 MHz = 300 : 100 = 3m -  $\lambda/4_{ARIA}$  = 3m : 4 = 75cm - per RG 213 V=66%  $\lambda/4_{CAVO}$  = 75 x 0,66 = 49,5cm

Il valore di ε<sub>r</sub> , come visto in precedenza , è uno dei 2 fattori che determina anche l'impedenza caratteristica del cavo , in termini generali e grossolani più è alto ( e quindi si avvicina all'aria ) e minore è l'attenuazione .

## **CAVI DI MISURA O DA LABORATORIO**

Per quanto riguarda i cavi per uso laboratorio o di misura ovviamente valgono tutte le considerazioni sin qui fatte anche se altri fattori intervengono nella scelta , a parer nostro basso return loss e stabilità nella piegatura ( sia in ampiezza che in fase ) sono fattori assolutamente importanti , ecco perché i cavi di misura sono così costosi e difficili da intestare . Questi cavi più performanti sono realizzati con dielettrico teflon caricato con gas ( cavi microporosi ) in modo da ottenere una bassa perdita e ottima flessibilità, a doppia o tripla schermatura e intestazione con macchine particolari, sono poi sottoposti a cicli termici per evidenziare imperfezioni o altri difetti . In questi cavi da laboratorio è molto importante irrobustire anche in maniera esagerata la transizione tra il connettore e il cavo per aumentare la durata nel tempo , infatti , se è difficile rompere un cavo nella sua lunghezza sarà molto più facile che succeda nel punto di passaggio tra connettore e cavo .

Con i cavi del tipo Multiflex 141 della Suhner tuttavia si ottiene un giusto compromesso tra prestazioni e prezzo , anche se intestati da noi stessi con connettori SMA si ottiene facilmente un ottimo risultato fino 15 - 18 GHz , ad eccezione della stabilità di fase nella piegatura ad appannaggio solo dei cavi molto più costosi delle famose Marche . A titolo indicativo un buon cavo di misura deve avere un R.L. massimo di 25 dB che può arrivare a 22-20 dB a microonde ma solo al limite della sua massima frequenza di utilizzo , un valore così basso di return loss è necessario per ottenere delle misure molto attendibili . La bontà di un cavo di misura si verifica facilmente effettuando varie piegature sul cavo stesso , collegato ad un network analyzer le variazioni in ampiezza e fase devono essere molto contenute .

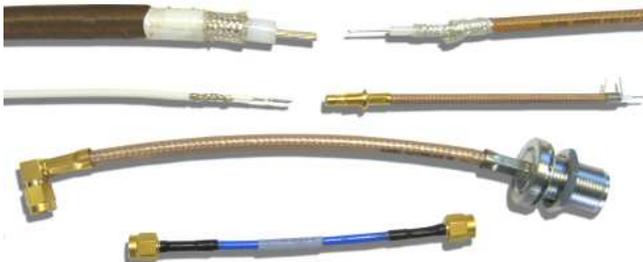
Spesso nel codice di un cavo è presente un prefisso a molti sconosciuto , RG sta per Radio Guide ovvero l'organo militare USA che ha provveduto alla normalizzazione dei cavi coassiali , anche se ormai in disuso resta sempre uno standard per designare molti cavi coassiali ed è ancora largamente utilizzato . Ora esiste la normativa Mil-C17 a sua volta superata dell'ultima Mil -DTL-17

Per nostra comodità e anche per evidenti motivi tecnici , abbiamo suddiviso i cavi coassiali in 5 categorie :

- A ) cavi coassiali di tipo rigido o semirigido o deformabile , es. UT 085 , SM141 , Multiflex ecc.
- B ) cavi coassiali flessibili con dielettrico teflon , es. RG 316 , RG 142 , RG 179 ecc.
- C ) cavi coassiali flessibili con dielettrico polietilene , es. RG58 , RG 213 , RG214 ecc.
- D ) cavi coassiali con dielettrico foam , es. i vari Cellflex , RT5020 ecc.
- E ) cavi coassiali superflessibili per uso da laboratorio , es. Sucoflex ecc.

Ognuna di queste categorie ha dei propri pregi e limitazioni che sono alla base della scelta per un particolare utilizzo . Sul listino sono ulteriormente suddivisi in cavi non intestati ( venduti a metraggio ) oppure già intestati

Per nostra scelta commerciale ma anche per nostra attitudine saranno particolarmente presenti sul catalogo , con grande varietà di scelta , tutti i tipi di cavi con dielettrico in teflon .

alcuni esempi	particolarità e applicazioni
	<p><b><u>A - cavi in teflon rigidi , semirigidi e deformabili</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-- disponibili a 12.5 - 25 - 35 - 50 - 70 - 75 ohm</li> <li>-- bassa perdita e ottima precisione di impedenza tip. <math>\pm 1 \Omega</math> con conseguente basso return loss anche a microonde</li> <li>-- ottima riproducibilità e stabilità di fase nel tempo</li> <li>-- gamma di temperatura tip <math>-40 / + 160 \text{ }^\circ\text{C}</math></li> <li>-- alto livello di schermatura</li> <li>-- disponibile anche una versione anti-magnetica</li> <li>-- ottimi per cablaggi interni in RF e microonde</li> <li>-- non idonei per uso da banco e da laboratorio tranne i tipi Multiflex 086 o 141 che sono di tipo flessibile</li> <li>-- a parità di diametro si utilizza sempre lo stesso tipo di connettore sia per i tipi rigidi , semirigidi che deformabili</li> </ul>
	<p><b><u>B - cavi flessibili isolati in teflon</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-- bassa perdita e buona precisione di impedenza tip <math>\pm 2 \Omega</math> fino 3 GHz , utilizzabili fino a 6 GHz</li> <li>-- gamma di temperatura tipica <math>-40 / + 160 \text{ }^\circ\text{C}</math> e fino <math>200 \text{ }^\circ\text{C}</math> solo per il tipo RG 115</li> <li>-- ottima riproducibilità e stabilità di fase nel tempo</li> <li>-- buona flessibilità fino al diametro di 5 mm</li> <li>-- ottimi per un uso da banco o da laboratorio fino 3 GHz</li> <li>-- non deteriorabile da umidità , ultravioletti ecc.</li> <li>-- possono lavorare con grandi e medie potenze</li> </ul>
	<p><b><u>C - cavi flessibili isolati in polietilene</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-- le caratteristiche sono molto buone se paragonate al basso costo , sono i più utilizzati in HF - VHF e uso video</li> <li>-- buona schermatura per i modelli a 2 schermi min. 80 dB fino 6 GHz per RG 223 e 214 mentre per i modelli a singolo schermo min. 40 dB fino 2 GHz per RG 58 e 213</li> <li>-- uso da banco o da laboratorio fino 1 GHz</li> </ul>
	<p><b><u>D - cavi isolati in foam</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-- sono i cavi con la minor perdita ma poco flessibili e non adatti per un uso professionale o da laboratorio</li> <li>-- se schermati a trecciola sono discretamente flessibili</li> <li>-- se la schermatura è di tipo corrugato sono consigliati solo per discesa d'antenna a bassa perdita</li> <li>-- utilizzati fino 3 GHz , max 6 GHz</li> </ul>
	<p><b><u>E- cavi superflessibili in teflon microporoso</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-- sono decisamente i più performanti e sofisticati tra tutti i cavi ma anche i più costosi , il loro utilizzo è pressochè limitato ad un uso da laboratorio , anche fino 100 GHz</li> <li>-- eccellente stabilità nel tempo , la fase resta costante anche se maneggiati in continuazione per uso da banco</li> <li>-- perdite bassissime e ottimo return loss</li> <li>-- utilizzati anche per cablaggi flessibili e a bassa perdita su ponti radio <math>&gt; 10 \text{ GHz}</math></li> </ul>

I cavi coassiali per microonde sono disponibili con molte varianti , l'unica vera differenza consiste nel tipo di conduttore esterno che determina una piegatura e una lavorabilità a mano più o meno semplice mentre le caratteristiche elettriche di perdita ecc. , a parità di diametro , hanno poca variazione . Tutti i cavi presenti in queste pagine sono isolati in teflon , sono disponibili a 12,5 - 25 - 35 - 50 - 70 - 75  $\Omega$  . NOTIZIA UTILE : il numero contenuto nei codici UT047 , UT086 , UT141 ecc. indica la misura del diametro esterno in millesimi di pollice.

tipo : rigido - semirigido - deformabile - flessibile

## Cavi per microonde

### semirigidi normali

in rame naturale, stagnato o argentato , è il classico semirigido per microonde difficile da piegare con un piccolo raggio di curvatura



25 - 50 - 70 - 75  $\Omega$

### deformabile normale

esterno in trecciola di rame stagnata estremamente deformabile e raggiunge facilmente la forma desiderata anche piegato a mano

### deformabile in alluminio

in alluminio stagnato leggermente più rigido del precedente ma molto più resistente alla rottura e pesa il 30% in meno, consigliato anche per un numero limitato di piegature



12.5 - 25 - 35 - 50 - 70 - 75  $\Omega$

### non magnetico

è una variante dei tipi deformabili sia per applicazioni medicali che a bassa intermodulazione per TX digitali come GSM , DECT ecc.



50  $\Omega$

### Multiflex 086 - 141

versioni flessibili come i comuni cavi coassiali ma con specifiche di funzionamento fino a 18 GHz e oltre , usano gli stessi connettori adatti per i cavi semirigidi



50  $\Omega$