



# Le differenze tra linee sbilanciate e linee bilanciate

Qualche interessante esperimento

di Davide Achilli IZ2UUF

**Q**uando si parla di cavi coassiali, i radioamatori sanno tutto. Dimensioni, dB di perdita per 100m ad ogni frequenza, numero di trefoli nella calza, doppia o tripla schermatura, angolo massimo di curvatura, percentuale di rame ed altri metalli nei conduttori, esatta composizione del dielettrico, fattore di velocità, costo al metro, esistenza di costosi connettori dedicati costruiti con precisione micrometrica e via dicendo.

Se però spostiamo l'argomento sulla ragione per cui i cavi coassiali si definiscono "sbilanciati" e quelli fatti da due filli paralleli si chiamano "bilanciati", entriamo in una zona oscura. Perché esiste questa differenziazione? E che conseguenze ha sulle nostre realizzazioni?

Al giorno d'oggi le linee bifilari "bilanciate" sono usate solo da un manipolo di "specialisti", mentre i cavi coassiali sono onnipresenti: potrebbe quindi sembrare inutile analizzare le differenze tra un sistema usato da tutti ed uno quasi dimenticato. Eppure la mancata comprensione del concetto di "sbilanciato" della linea coassiale è alla base di molte delle problematiche che i radioamatori lamentano quotidianamente.

Facendo ricerche su internet, su piattaforme di tutto il mondo, si nota che i radiodilettanti che si lanciano in una esplicita descrizione delle differenze tra i due sistemi sono veramente pochi. In genere le trattazioni vanno bene finché osservano che le linee bifilare sono fatte con due fili uguali mentre quelle coassiali hanno due con-

duttori evidentemente diversi. Quando invece passano a trattare il comportamento elettrico, le spiegazioni spesso sono confuse e contraddittorie e finiscono sistematicamente coll'affermare concetti come: *nel coassiale la calza è riferita a terra, per cui, idealmente, nella calza non scorre corrente e tutto il segnale è trasportato dal centrale.*

Ma ciò è vero? Possiamo condurre in pochi secondi un esperimento che ci liberi subito da quell'idea. Prendiamo un coassiale collegato da una parte ad una radio e dall'altra ad un carico fittizio. Tagliamo la guaina esterna per qualche centimetro e separiamo calza e centrale. Posizioniamo quindi un amperometro RF a turno sui due conduttori e trasmettiamo: vedremo subito che la corrente passa tanto sul centrale che sulla calza (figura 1).

Del resto, come abbiamo visto su Rke di gennaio 2021, se così non fosse, verrebbe meno la cancellazione del campo e il coassiale radierebbe: sarebbe un'antenna, non una linea di trasmissione.

## Il modello "idraulico"

Da ragazzino ricevetti a Natale un gioco educativo relativo all'elettronica nel quale, assemblando dei componenti racchiusi in contenitori plastici dotati di contatti magnetici, era possibile realizzare alcuni semplici circuiti (figura 2). La documentazione spiegava il funzionamento dei vari componenti

impiegando gli ovi protagonisti dell'*elettronica*: gli elettroni. Questi erano rappresentati da pallini rossi dotati di naso, occhi e due gambette e camminavano spediti in fila indiana lungo i fili dei circuiti. Questi "omini" uscivano dal polo positivo della batteria, rappresentato da una pompa a mano, e terminavano la loro corsa nello scarico, cioè nel polo negativo. Nel loro percorso, grazie alla loro "forza", potevano scaldare resistenze o polarizzare la base di un transistor, aprendo le porte a grandi masse di altri pallini rossi in attesa.

**Fig. 1 - L'esperimento qui fotografato, in cui un amperometro RF viene posto sul centrale nell'immagine superiore e sulla calza in quella inferiore, mostra che la corrente scorre in entrambi i conduttori.**

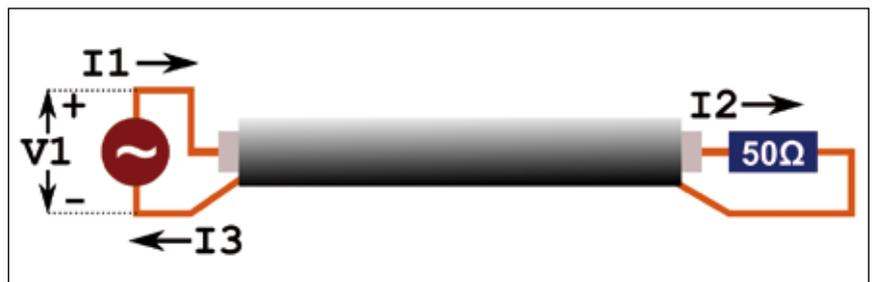




**Fig. 2 -** Gioco educativo sull'elettronica per ragazzi progettato negli anni '60. Nella documentazione, i protagonisti sono gli elettroni, rappresentati come palline rosse con braccia e gambe che escono da una pompa idraulica.

Questo modello, che si potrebbe definire di tipo "idraulico" perché si fonda su una similitudine logica tra la corrente elettrica che scorre sui fili e un fluido che scorre nei tubi, è quello normalmente utilizzato per spiegare l'elettrotecnica. Se da un lato modelli di questo tipo semplificano la comprensione della materia, dall'altro nascondono delle insidie laddove il modello e la realtà divergono.

Prendiamo ad esempio il circuito in figura 3, banalmente costituito da un generatore di tensione alternata collegato ad un coassiale terminato con un resistore da  $50\Omega$ . Assumiamo che il generatore venga acceso e cominci a generare una differenza di potenziale  $V_1$  con il positivo verso il centrale e negativo verso la calza. Secondo il "modello idraulico", la corrente dovrebbe cominciare a fluire dal polo positivo, come l'acqua comincia ad uscire dal rubinetto non appena aperto. Questa corrente ( $I_1$ ) dovrebbe correre a perdifiato sul conduttore centrale fino a raggiungere il carico. Dovrebbe poi scorrere nel carico ( $I_2$ ) e quindi tornare di corsa sulla calza fino ad arrivare al polo del generatore che, in questa fase del ciclo alternato, è di polarità negativa. In altre parole, dato che come sappiamo la corrente viaggia a velocità finita, essa dovrebbe apparire prima in  $I_1$ , quindi in  $I_2$  e solo alla fine in  $I_3$ . Esattamente come quando apriamo il rubinetto che alimenta la canna dell'acqua in giardino, l'acqua comincia a defluire nello



**Fig. 3 -** Analisi dello sviluppo delle correnti su un semplice circuito.

scarico solo dopo aver percorso tutto il tubo.

Ma è proprio questo il modo in cui la corrente si comporta?

### Esperimento 1: il percorso della corrente

Possiamo facilmente realizzare il circuito in figura 3 e, disponendo di un generatore capace di erogare un singolo impulso sinusoidale, possiamo seguire il percorso della corrente vedendo quando l'impulso compare nei vari punti.

Per rilevare la corrente possiamo usare un trasformatore di corrente, che non è altro che un piccolo toroide in ferrite con avvolte una decina di spire terminate da un resistore di basso valore, nel mio caso  $51\Omega$ . In questo trasformatore il primario è il filo in esame e la corrente che scorre nel resistore

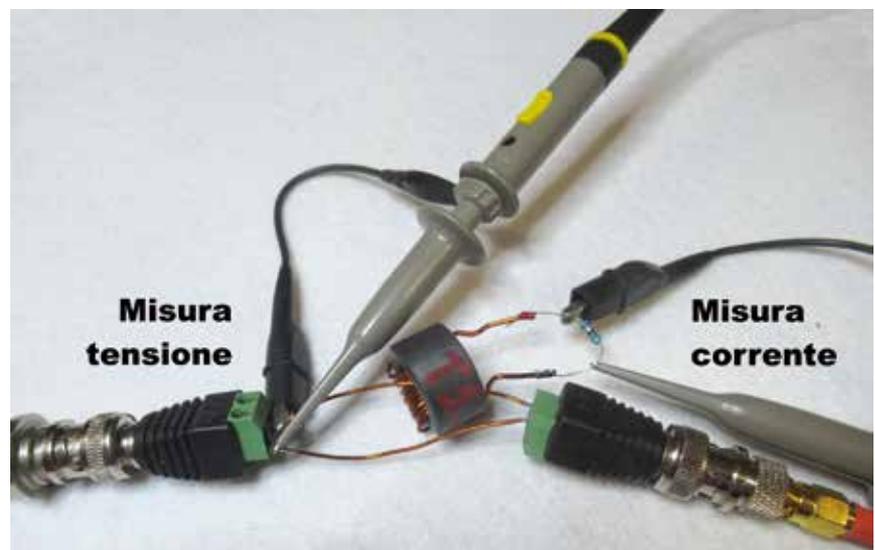
sarà pari ad  $1/10$  della corrente che scorre nel primario. Misurando con un oscilloscopio la caduta di tensione sul resistore è possibile "vedere" la corrente (figura 4).

Tenendo come riferimento la sonda n.1 gialla che misura la tensione del singolo impulso, possiamo usare la sonda n.2 azzurra per rilevare la corrente nei punti  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ .

Sovrapponendo le misure, otteniamo il risultato in figura 5.

Analizzando la figura 5 vediamo che non appena si sviluppa la tensione  $V_1$ , appare immediatamente la corrente  $I_1$  sul centrale. Come previsto, dopo un certo tempo, la corrente appare sul carico al punto  $I_2$ . Proseguendo con l'analisi notiamo una "anomalia" rispetto al modello idraulico: **la corrente  $I_3$  non è comparsa dopo la corrente  $I_2$ , ma si è sviluppata contemporaneamente alla corrente  $I_1$ .**

**Fig. 4 -** Misura della tensione ai capi del generatore e della corrente su uno dei conduttori. La corrente è rilevata tramite un trasformatore di corrente  $10\times$ , cioè formato da una spira al primario (il filo sotto misura) e 10 spire al secondario, terminate da un resistore da  $51\Omega$ . La corrente che scorre nel resistore è pari al 10% di quella che scorre nel primario. Misurando la caduta di tensione ai capi del resistore da  $51\Omega$  è possibile "vedere" la corrente in qualunque punto del circuito.



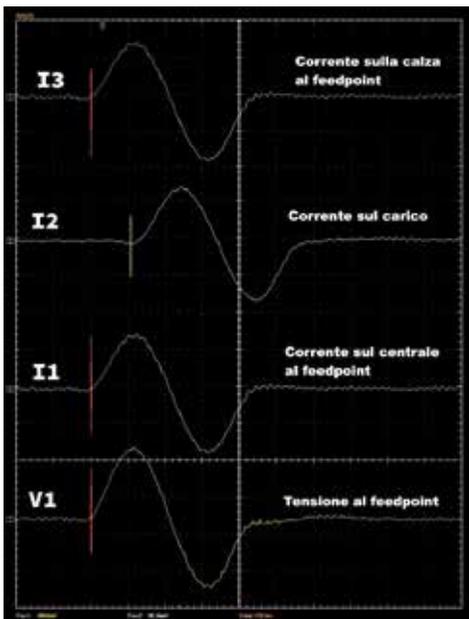


Fig. 5 - Sviluppo delle correnti nei tre punti di rilevamento.



Fig. 6 - Misura della corrente su una linea bilanciata, in questo caso un doppino rosso-nero avente impedenza caratteristica pari a  $150\Omega$ . Come si vede dal "misterioso" scatolino nero, per impiegare le linee bilanciate servono accorgimenti spiegati più avanti nel testo.

Appare evidente che il circuito tra i due poli del generatore si sia chiuso ben prima che la corrente raggiungesse la fine del filo nel punto in cui avrebbe potuto "svoltare" per tornare indietro. In altre parole, la corrente per andare dal polo "A" al polo "B" del generatore **non sembra essere passata sul filo** ma si direbbe che in qualche modo abbia attraversato lo spazio vuoto tra i due conduttori. In figura 6 vediamo il setup per



Fig. 7 - Con un filo dotato di coccodrilli proviamo a formare un percorso alternativo in parallelo ad uno dei conduttori della linea di trasmissione e vediamo quanta corrente vi scorre.

eseguire la stessa misura su una linea bilanciata che in questo caso è costituita da un doppino rosso-nero avente impedenza caratteristica pari a  $150\Omega$ . I risultati sono del tutto analoghi a quelli ottenuti con il coassiale: fin qui i due tipi di linea si comportano allo stesso modo.

### Esperimento 2: circuiti alternativi

Effettuiamo ora un altro esperimento. Attraverso l'uso di un corto filo dotato di coccodrilli proviamo a creare percorsi alternativi tra il carico e il generatore e misuriamo la corrente che vi scorre (figura 7). Andremo a creare a turno un ponticello in parallelo ai quattro conduttori (i due fili della linea bilanciata, la calza e il centrale) e vedremo se su questi conduttori supplementari scorre corrente (figura 8). Il responso dell'oscilloscopio in figura 9 conferma quanto ci si potrebbe aspettare, cioè che mettendo due conduttori in parallelo, la corrente si divide tra i due. **Unica eccezione il caso D**, cioè la calza: nonostante il conduttore di *bypass* sia cortissimo rispetto ai vari metri della matassa di coassiale, **la corrente lo ignora e si ostina a scorrere totalmente sulla calza**.

Questo secondo esperimento comincia a fare intravedere qualche differenza tra i due tipi di linea,

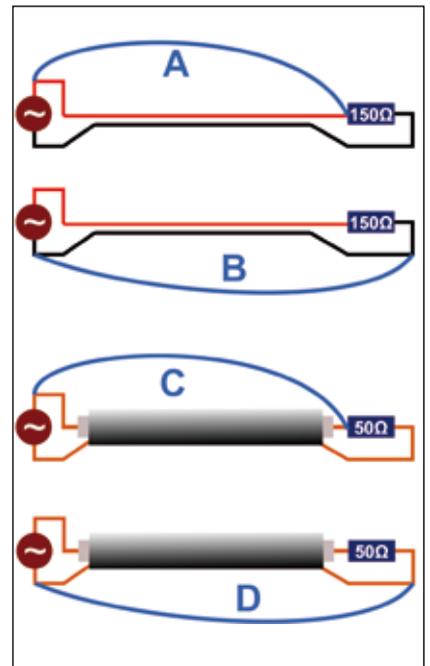


Fig. 8 - Schema dei quattro bypass, due per la linea bilanciata e due per quella sbilanciata.

ma prima di trarre le conclusioni, facciamo un ultimo esperimento.

### Esperimento 3: la mano sul cavo

Un altro esperimento rivelatore è quello della "mano sul cavo". Si collega alla linea di trasmissione un analizzatore vettoriale impostato per tracciare la curva di ROS su

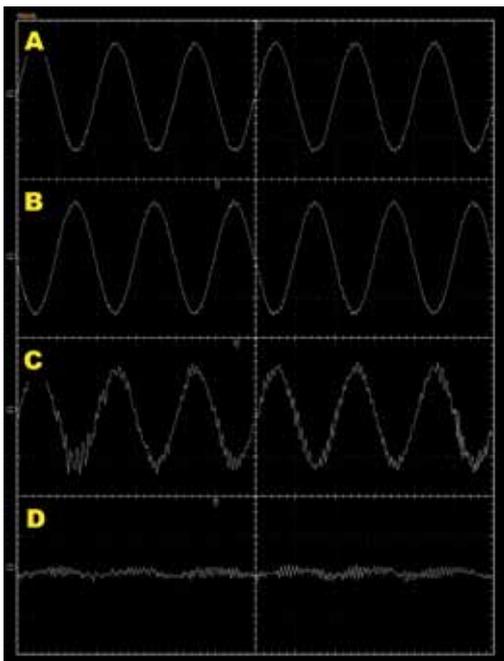


Fig. 9 - I rilevamenti della corrente nei quattro casi esposti in figura 8. Il caso più eclatante è il D, quello della calza: sul bypass non scorre alcuna corrente!

un'ampia gamma, nel mio caso da 0 a 500MHz. Quindi si afferra il cavo con le mani e si verifica se la curva rimane invariata oppure cambia le sue caratteristiche. Se varia la curva del ROS vuol dire che è variata l'impedenza di quanto connesso al VNA: in altre parole la mano è diventata parte del circuito in cui scorre corrente e partecipa a formarne l'impedenza complessiva, come quando ad un circuito esistente inseriamo un componente in serie o in parallelo. Vediamo in figura 10 la prova con la linea bilanciata: afferrandola con le mani, la curva di ROS varia in maniera evidente. In figura 11, la stessa prova fatta con il coassiale terminato da un resistore mostra invece una totale insensibilità al tocco. Possiamo muovere il cavo o afferrarlo che la curva è sempre identica.

Infine, l'esperimento 12 rivela un altro indizio. Se invece di essere terminato da un resistore viene dotato di un piccolo stilo, **il coassiale comincia a comportarsi come la linea bilanciata**: se lo tocchiamo con le mani, la curva del ROS cambia in maniera decisa.

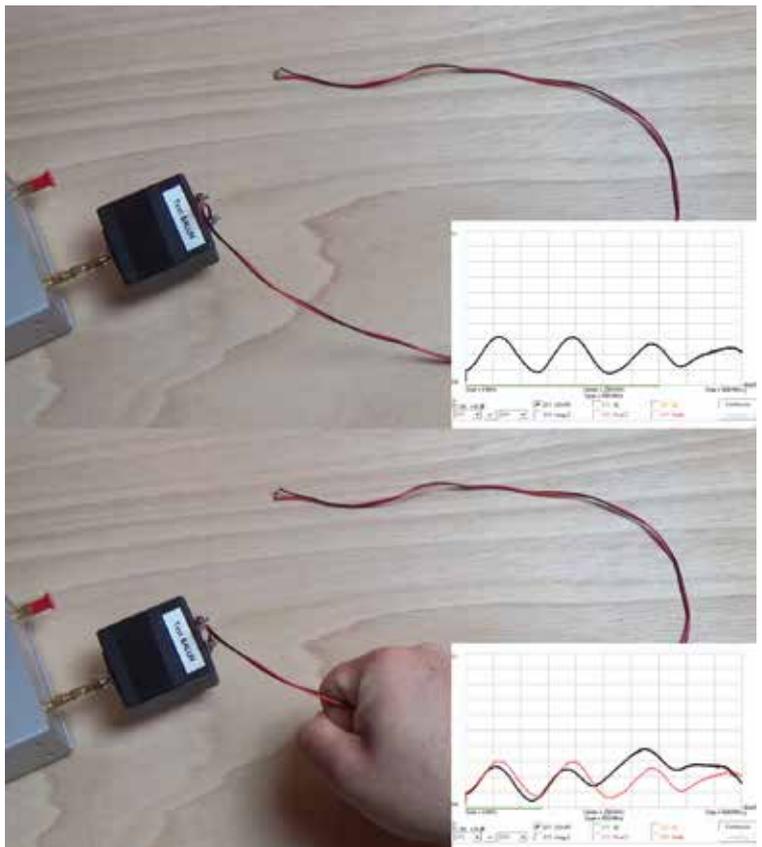


Fig. 10 - Linea bilanciata terminata da carico resistivo. Afferrando la linea con le mani vi vede chiaramente un cambiamento della curva di ROS, e quindi dell'impedenza del sistema.

### La chiusura del circuito

Proviamo ora a collegare gli elementi raccolti negli esperimenti cercando di comprendere perché una linea si definisce "sbilanciata" o "bilanciata" e che conseguenze abbia.

Il primo esperimento ci ha svelato un primo punto importante. Quando un generatore presenta una differenza di potenziale, non si mette a buttar fuori una corrente di "elettroni" che dilagano colonizzando ogni conduttore collegato, come farebbe bagnando il pavimento la pompa idraulica del manuale per ragazzi. Quello che succede in realtà è che un flusso di corrente si forma solo in quelle parti che sono in grado di realizzare un circuito capace di instaurare immediatamente due correnti uguali e contrarie sui poli del generatore. Come abbiamo visto, la linea di trasmissione, che sia coassiale o bifilare, è in grado di soddisfare questo requisito. La differenza di potenziale variabile sui capi ingenera un campo tra i con-

duttori che provoca la formazione di correnti variabili opposte sugli stessi. Le correnti a loro volta generano un campo che induce un'altra differenza di potenziale un po' più avanti. In questo modo il circuito è immediatamente chiuso a favore del generatore, mentre l'accoppiata tensione/corrente si propaga trasportando energia fino al carico mettendoci il tempo che ci vuole in base alla lunghezza del cavo.

Come la linea di trasmissione riesce a "chiudere il circuito" tramite campi elettromagnetici in spazio aperto, così potrebbe fare qualunque altro conduttore presente. Cosa impedisce quindi, per esempio allo chassis della radio che è un oggetto metallico collegato ad un polo del generatore, di formare un secondo circuito in parallelo alla linea di trasmissione?

Per poterlo fare, lo chassis dovrebbe poter raggiungere l'altro polo del generatore per formare un circuito. Non potendolo fare tramite un conduttore fisico dato che non c'è, dovrebbe utilizzare lo strata-

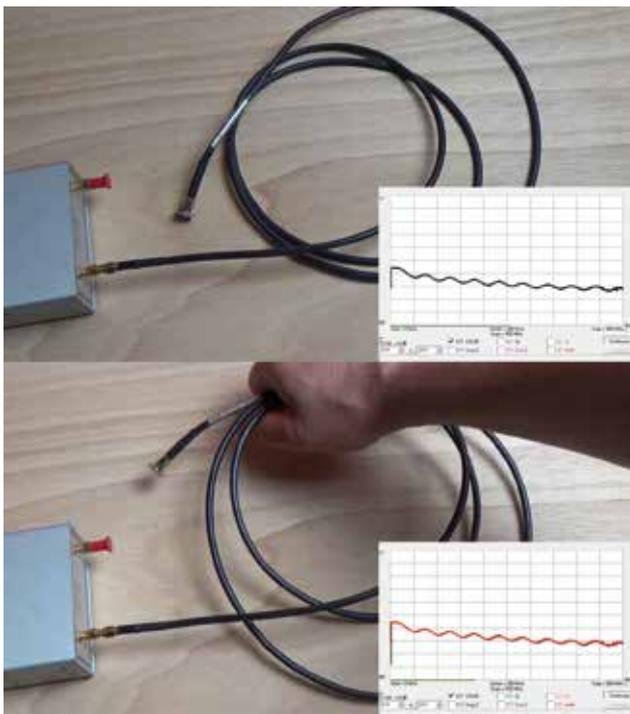


Fig. 11 - Cavo coassiale terminato da carico resistivo. In questo caso è possibile afferrare la linea ed anche spostarla che non cambia nulla.

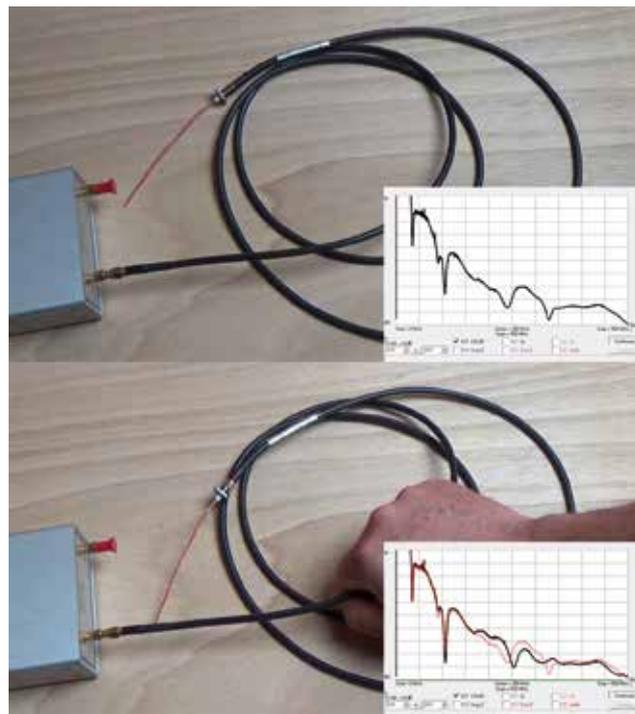


Fig. 12 - Cavo coassiale questa volta terminato da una piccola antenna verticale. In questa configurazione il coassiale è diventato sensibile al tocco; la curva cambia anche semplicemente toccando lo chassis del VNA.

gemma del campo per indurre una corrente su un conduttore che sia collegato all'altro polo. In altre parole, lo chassis dovrebbe stabilire un collegamento tramite campo E/M con l'altro polo a cui però **l'unico conduttore collegato è il centrale del coassiale**. Perché non ci riesce?

Per via dell'effetto pelle (figura 13), un campo esterno può indurre correnti solo sulla superficie esterna dei conduttori. Ad esempio è noto che per il trasporto di radiofrequenza è sufficiente coprire i conduttori di un sottile strato di materiale pregiato a bassa resistenza in quanto quello che c'è negli strati inferiori non conta nulla. Pertanto, lo chassis può instaurare un campo EM solo con la superficie esterna del conduttore, che nel caso del coassiale, è la calza che però è collegata al suo stesso polo, per cui del tutto inutile per formare un circuito. Infatti, collegando la calza al centrale del connettore e il centrale del coassiale alla massa del connettore, il circuito si forma immediatamente in quanto la calza, che può interagire, è ora collegata al polo centrale che prima era inaccessibile.

Nel caso della linea bilanciata, invece, entrambi i conduttori sono a disposizione per instaurare un campo alternativo. Infatti se si collega una linea bifilare direttamente al SO239 di una delle nostre radio, oltre al circuito fornito dalla bifilare si forma immediatamente un secondo circuito, in parallelo al primo, tra lo chassis della radio e il cavo della bifilare collegato al centrale. L'effetto è che uno dei due conduttori partecipa a due "circuiti" (cavo 1+chassis e cavo 1+cavo2) mentre l'altro ad un solo circuito (cavo1+cavo2); le correnti non saranno più simmetriche, non si cancelleranno e la linea **comincerà a radiare** e, per la regola delle reciprocità, anche **a ricevere**.

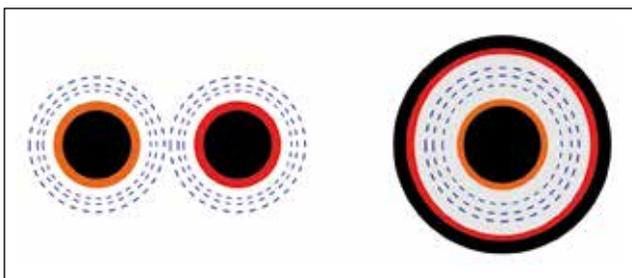
In questo caso è necessario l'inserimento di un **balun**, che è un componente capace di lasciar passare la quota di corrente differenziale e bloccare quella di modo comune. Vedremo in un prossimo articolo quali principi utilizzano i balun per ottenere questo risultato; per ora ci limiteremo a dire che il balun, di tutta la corrente che scorre nei due fili, lascia passare in ciascun filo solo la quota di corrente che risul-

ta controbilanciata da una pari quota nell'altro filo (corrente differenziale). La corrente in più che scorre su un filo rispetto all'altro, viene bloccata. Lo chassis fornirebbe in prima persona la corrente al polo "B" del generatore e avrebbe bisogno che il filo della bifilare collegato al polo "A" portasse l'altra quota: il balun glielo impedisce, il circuito non si può formare e la linea non radia.

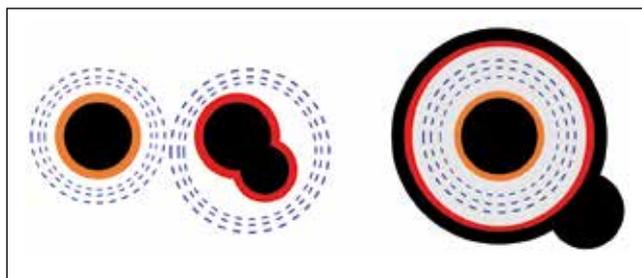
### La superficie esterna

L'esperimento 2 ha svelato un'altra caratteristica interessante: se mettiamo dei bypass, questi funzionano sempre tranne nel caso della calza del coassiale: perché il suo "collegamento alternativo" viene totalmente ignorato?

Possiamo vedere in figura 14 cosa succede a collegare dei conduttori all'esterno di una linea bilanciata ed una sbilanciata. Mentre nella linea bifilare bilanciata correnti e campi sono tutti all'esterno, quindi liberi di interagire con tutto ciò che sta nei dintorni, correnti e campi del coassiale sono all'interno. Quello che è connesso fuori



**Fig. 13 - Distribuzione della corrente sui due tipi di conduttori condizionata dall'effetto pelle e dall'effetto prossimità. Nella linea bifilare, la corrente scorre su un sottile strato all'esterno dei due conduttori (effetto pelle) con una maggiore concentrazione nel lato vicino all'altro conduttore (effetto prossimità). Nel caso del coassiale questi due effetti fanno sì che le correnti scorrano sulla superficie esterna del centrale e su quella interna della calza.**



**Fig. 14 - Applicando oggetti all'esterno di una linea bifilare si interviene proprio laddove scorre la corrente e si forma il campo elettromagnetico. Nel coassiale, invece tutto avviene all'interno, per cui eventuali elementi all'esterno sono del tutto ininfluenti.**

non viene neanche visto, non ha alcun ruolo.

Questo consente di collegare la calza del coassiale allo chassis della radio o **perfino a terra**. Il coassiale non è sbilanciato perché "riferito a terra" ma esattamente il contrario: **la calza del coassiale, può essere messa a terra proprio perché il coassiale, essendo sbilanciato, consente di farlo**.

Se installato su una sonda lanciata nello spazio, un coassiale rimarrà sempre sbilanciato, solo che non sarà collegato a terra.

## L'antenna

Infine abbiamo il terzo esperimento, quello della mano sul cavo. Alla luce di quanto appreso finora, appare del tutto normale che tenendo con la mano la bifilare le si vari l'impedenza: il suo campo E/M, all'esterno della linea, si sviluppa nella mano e non più nell'aria e quindi cambia le sue caratteristiche. Ed è altrettanto normale che con il coassiale, che nasconde il suo campo all'interno, ciò non avvenga.

Rimane da spiegare perché, non appena si collega un'antenna, il coassiale improvvisamente sembra perdere le sue caratteristiche peculiari e appaia interagire con l'esterno come una bifilare bilanciata.

Quello che succede è molto semplice: dal momento in cui abbiamo collegato uno stilo, abbiamo esposto, non più protetto dalla schermatura, un conduttore collegato al polo "A" del generatore. Ecco che immediatamente, lo chassis della radio e tutta la parte esterna della

calza collegati al polo "B", che fino ad ora non avevano modo di chiudere il circuito, si trovano a disposizione un elemento collegato al polo "A" con il quale possono instaurare un campo elettromagnetico. E lo fanno immediatamente.

Quando prendiamo in mano il cavo in questo frangente, non stiamo disturbando la corrente differenziale nella linea, come facevamo afferrando la linea bilanciata. Stiamo disturbando il "secondo circuito" formato da un lato dallo stilo e dall'altro dalle masse metalliche (calza esterna, chassis, cavi di alimentazione, trecciole di massa, eccetera) la cui impedenza complessiva costituisce il carico collegato alla fine del coassiale. In pratica, stiamo tenendo con le mani l'antenna di cui la calza del coassiale ora fa parte a tutti gli effetti.

Si noti che il discorso vale al contrario anche per lo stilo: lo stilo può sviluppare il campo E/M perché lui fornisce il collegamento con il polo "A" può interagire con le "masse" per chiudere il circuito con il polo "B". In altre parole, un'antenna per radiare o per ricevere ha bisogno sempre di **conduttori collegati ad entrambi i poli del generatore**, perché anche lei deve chiudere un circuito: la "end-fed" che funziona collegata ad un solo polo, non esiste.

## Conclusioni

In conclusione la linea coassiale è sbilanciata perché, grazie alla sua forma a conduttori concentrici, protegge il conduttore centrale

dalla formazione di campi E/M esterni che potrebbero creare "circuiti alternativi". Avendo il suo campo confinato all'interno, il coassiale è molto pratico può essere interrato, murato o fatto viaggiare fianco di altri cavi. Non bisogna dimenticare però che non appena viene collegato ad un'antenna, cioè viene esposto il centrale, se non vengono prese opportune contromisure, il cavo coassiale e tutti gli annessi e connessi diventa parte radiante e ricevente dell'antenna.

La linea bilanciata, invece, è logicamente più critica in quanto ha bisogno attorno a sé di uno spazio di rispetto nel quale poter sviluppare indisturbata il campo E/M che trasporta l'energia. A differenza del coassiale, la bifilare se viene collegata ad un'antenna dallo sviluppo simmetrico (ad esempio, un dipolo orizzontale alimentato al centro), non radia né riceve senza dover adottare alcun accorgimento. Dato che le nostre radio, accordatori e via dicendo hanno uscita sbilanciata (cioè con massa del PL collegata allo chassis), per interfacciarsi con una linea bilanciata senza farla radiare è necessario un balun. Infine, la facilità di ottenere impedenze caratteristiche elevate consente alla bifilare di lavorare con minime perdite a fronte di fortissimi disadattamenti, cosa che il coassiale non è in grado di fare.

