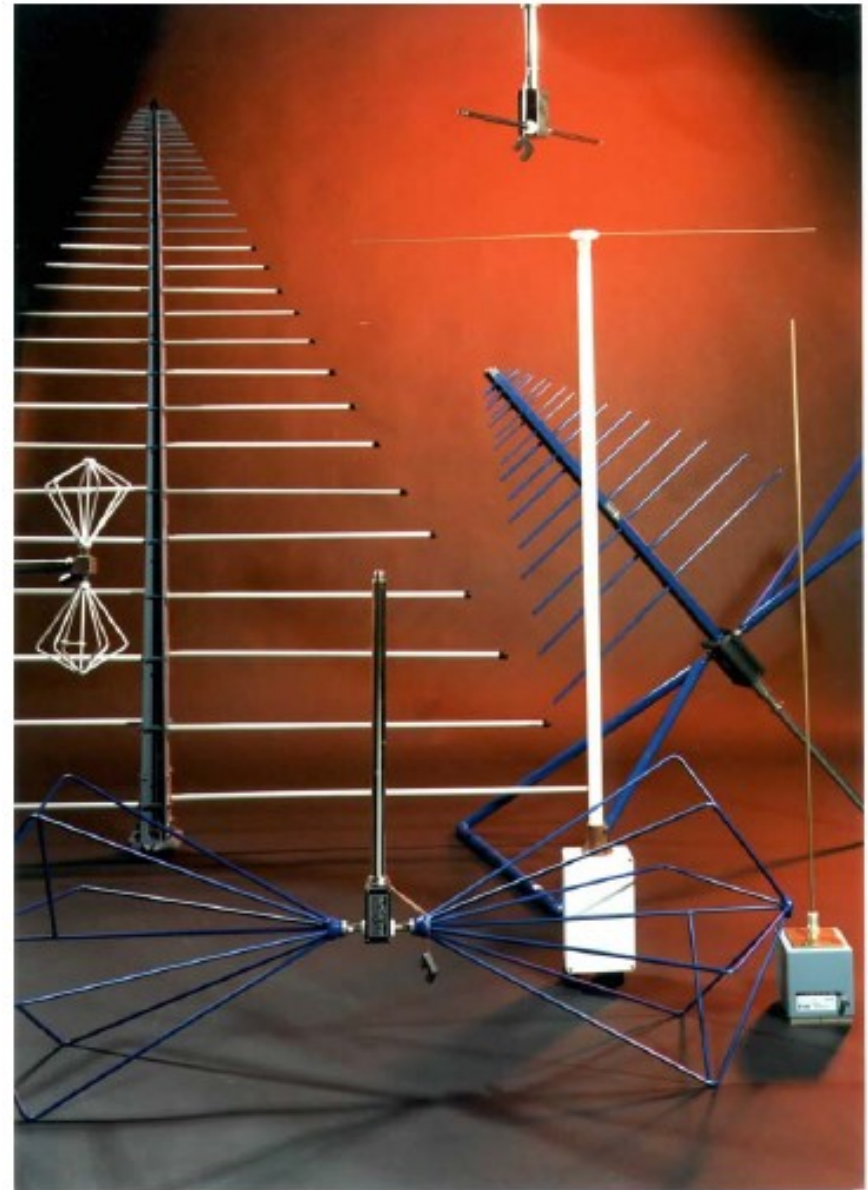


Antenne di piccole dimensioni

Presentazione realizzata per la
sezione ARI di Milano
settembre 2007

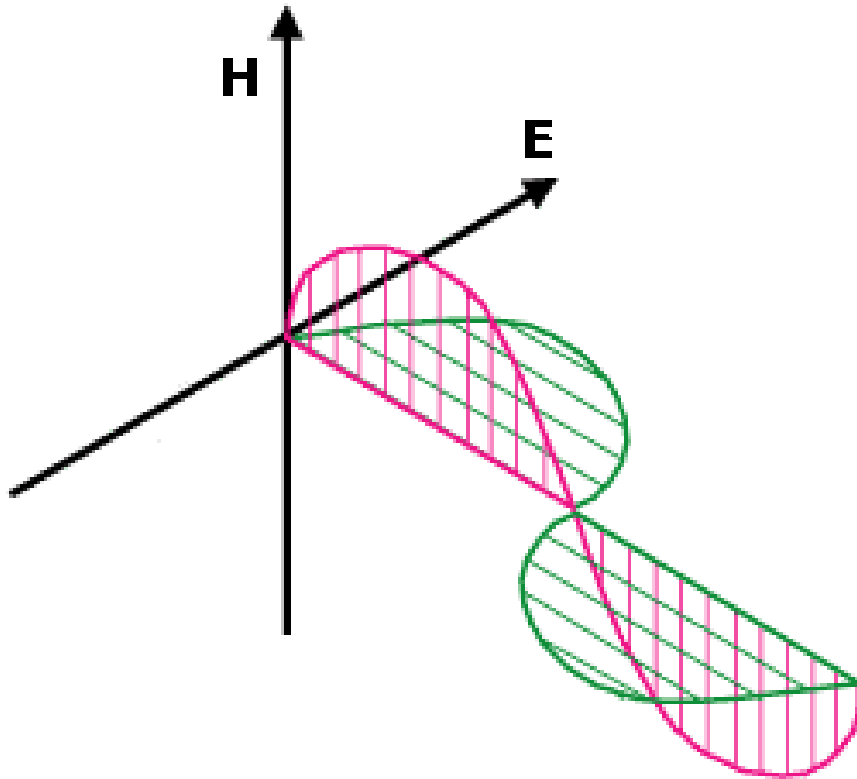
Claudio Pozzi, IK2PII



Argomenti

1. Richiami sul campo elettromagnetico
2. Antenne riceventi di piccole dimensioni
3. Antenne riceventi per campo elettrico
4. Antenne riceventi per campo magnetico (cenni)
5. Antenne trasmettenti tipo Marconi di piccole dimensioni
6. Bibliografia

Campo Elettromagnetico

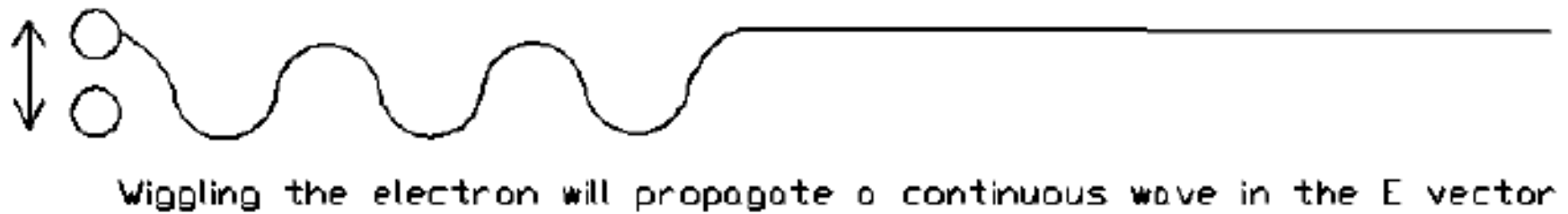
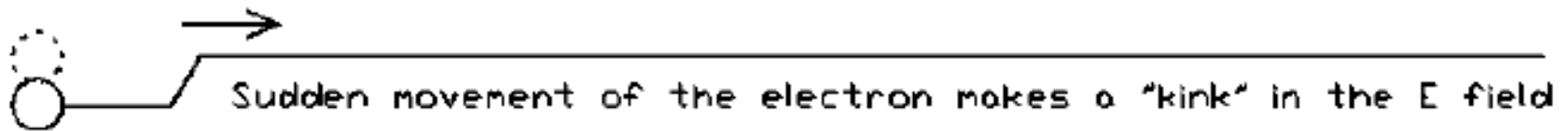


Densità di potenza (S). È la potenza radiante incidente perpendicolarmente a una superficie, divisa per l'area della superficie in questione ed è espressa in Watt per metro⁻² (W/m^2).

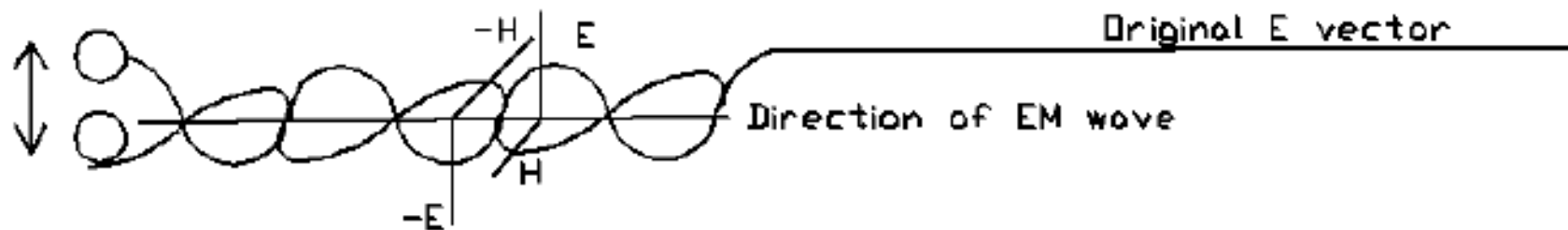
Intensità di campo elettrico. È una grandezza vettoriale (E) che corrisponde alla forza esercitata su una particella carica indipendentemente dal suo movimento nello spazio. È espressa in Volt per metro⁻¹ (V/m).

Intensità di campo magnetico. È una grandezza vettoriale (H) che, assieme all'induzione magnetica, specifica un campo magnetico in qualunque punto dello spazio. È espressa in Ampere per metro⁻¹ (A/m).

Generazione del campo elettromagnetico



The same vibration is a current and makes an H field in the horizontal direction



Generazione del campo elettromagnetico

Il campo elettromagnetico viene generato da **cariche elettriche accelerate**.

Accelerazione significa **variazione di velocità** oppure **variazione di direzione**.

L'intensità del campo è proporzionale al numero di cariche accelerate (corrente di antenna).

Relazioni

In regime di campo lontano (per antenne non direttive a distanza dall'antenna $> 1 \lambda$) vale la seguente relazione:

$$E = \eta_0 H$$

dove:

E = campo elettrico (V/m)

H = campo magnetico (A/m)

$\eta_0 = 120 \cdot \pi \Omega$, impedenza dello spazio, circa
377 Ω

Antenna ricevente

L'antenna ricevente **cattura** energia dal campo EM presente nello spazio e la **rende disponibile** ai morsetti d'antenna del ricevitore.

Antenne di piccole dimensioni

Sono generalmente utilizzate per la misura del campo elettromagnetico.

Sono di due tipi:

- Sensibili al **campo elettrico** (monopoli o dipoli corti)
- Sensibili al **campo magnetico** (loop di piccole dimensioni)

Sono antenne non risonanti, a larga banda, per sola ricezione.

Antenne di misura

Dipolo corto



Loop Magnetico



Si definisce efficienza o **fattore di antenna** il rapporto tra il campo elettrico (o magnetico) presente nello spazio e la tensione sviluppata ai morsetti dell'antenna.

$$AF_{el} = \frac{E}{V} \quad (1/metro)$$

$$AF_{mag} = \frac{H}{V} \quad (siemens/metro)$$

Se consideriamo l'antenna come un trasduttore a due porte il **fattore di antenna é l'analogo della funzione di trasferimento S_{21} .**

Poichè l'antenna è caricata dall'impedenza di ingresso del ricevitore il fattore d'antenna deve essere specificato se è a circuito aperto o chiuso sull'impedenza di carico prevista.

Il fattore d'antenna comprende tutte le perdite (balun, cavo etc) e può dipendere dalla frequenza.

Monopolo corto vs Loop (fonte IK1ODO)

Monopolo

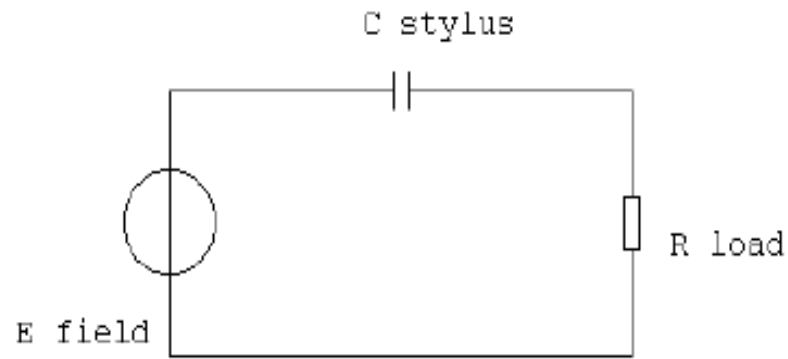
- Sensibile alla **componente elettrica E** del campo
- **Tensione** di uscita proporzionale al campo elettrico E
- Tensione di uscita indipendente dalla frequenza
- Circuito equivalente: **generatore di tensione** (campo elettrico) in serie alla capacità intrinseca dello stilo. La resistenza di carico forma un filtro passa alto con la capacità.

- La **resistenza** di carico deve essere **infinita** per avere risposta in frequenza piatta.
- Il campo elettrico **non è perturbato** (non circola corrente)

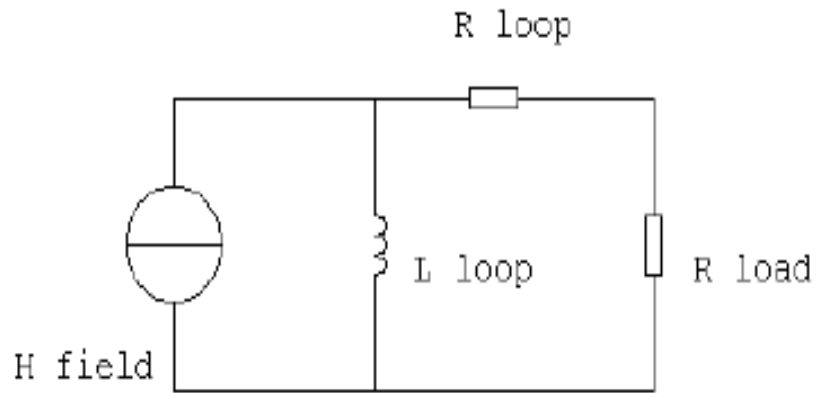
Loop magnetico

- Sensibile alla **componente magnetica H** del campo
- **Corrente** di uscita proporzionale alla campo magnetico H
- Corrente di uscita indipendente dalla frequenza
- Circuito equivalente: **generatore di corrente** (campo magnetico) in parallelo all'induttanza intrinseca del loop. La resistenza di carico in parallelo all'induttanza forma un filtro passa alto.
 - La resistenza del filo (**Rloop**) in serie alla resistenza di carico **limita la corrente di uscita**.
- La **resistenza** di carico (inclusa Rloop) deve essere **zero** per avere risposta in frequenza piatta.
- Il campo magnetico è **completamente riflesso** (la corrente che circola nel loop ha segno opposto e genera un campo che cancella quello incidente), l'onda incidente viene riflessa.

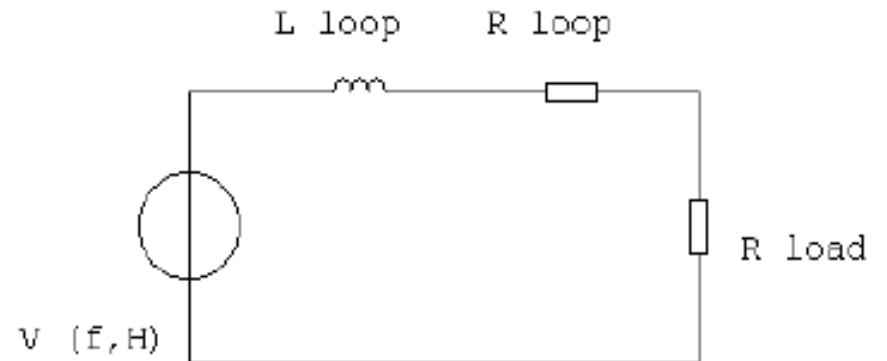
Monopolo corto vs Loop (fonte IK10DO)



Monopole equivalent circuit (A)



Loop equivalent circuit (B)



Loop equivalent circuit (C)

Monopolo corto vs Loop

Monopolo

Loop

La tensione di uscita è difficilmente calcolabile.

Nelle antenne professionali il fattore d'antenna viene misurato su un banco di prova.

E' **omnidirezionale**.

La tensione di uscita **dipende dalla frequenza** e si calcola con:

$$V = 2\pi\mu_0 N A H_0 f \cos\theta$$

dove:

$2\pi\mu_0$ = costante, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

N = numero di spire

A = area del loop, in m²

H₀ = campo magnetico, in A/m

f = frequenza, in Hz

cosθ = coseno dell'angolo tra il campo magnetico e l'asse del loop

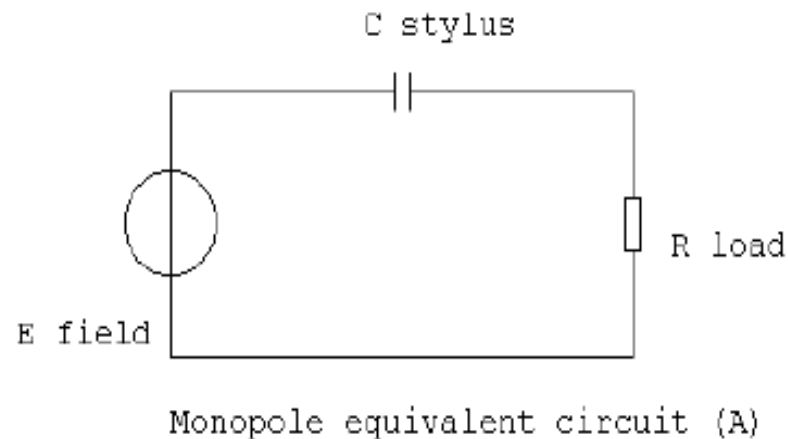
E' **direttivo**.

Quando un'antenna corta non funziona?

Abbiamo visto che il monopolo deve essere terminato su una **resistenza infinita**.

L'impedenza di ingresso dei ricevitori (R_{load}) è normalizzata a 50Ω .

Il ricevitore si comporta come un **corto circuito** tra antenna e terra.



Monopolo corto in pratica

Occorre collegare uno “stilo” ad un adattatore di impedenza con impedenza di ingresso la più alta possibile, bassa capacità verso massa e impedenza di uscita di 50 ohm.

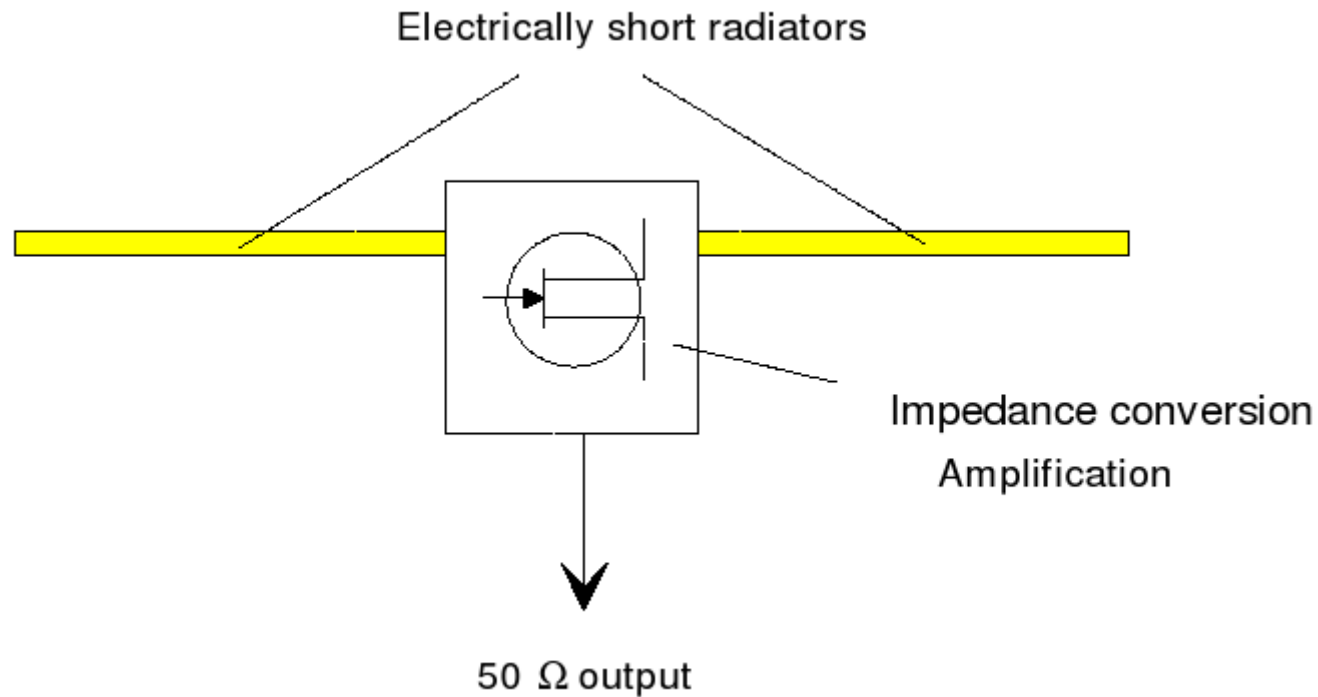
L'antenna corta è un'antenna attiva.

Le antenne professionali usano come “stilo” un tubo lungo circa 1 metro con diametro di 2 -3 cm.

Al posto dello stilo si può usare un tubo corto con diametro elevato, una lattina di birra!

La capacità di una lattina di birra può essere stimata in poche decine di pF, sufficienti ad accoppiarsi con il campo elettrico.

Monopolo corto in pratica

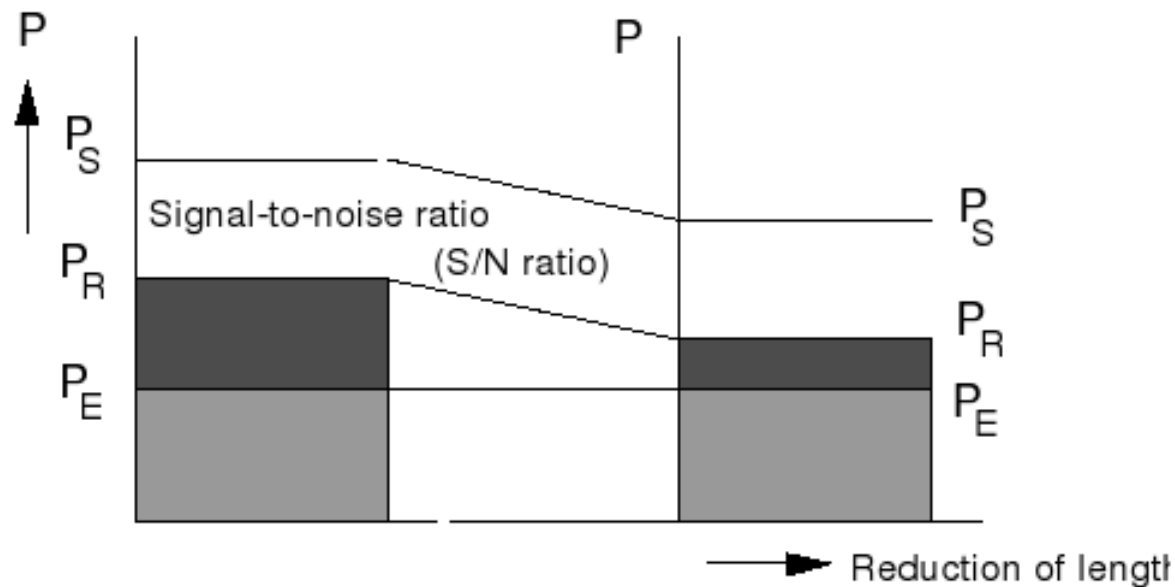


Principio di funzionamento (fonte Rohde Schwarz)

L'adattatore di impedenza è parte dell'antenna.

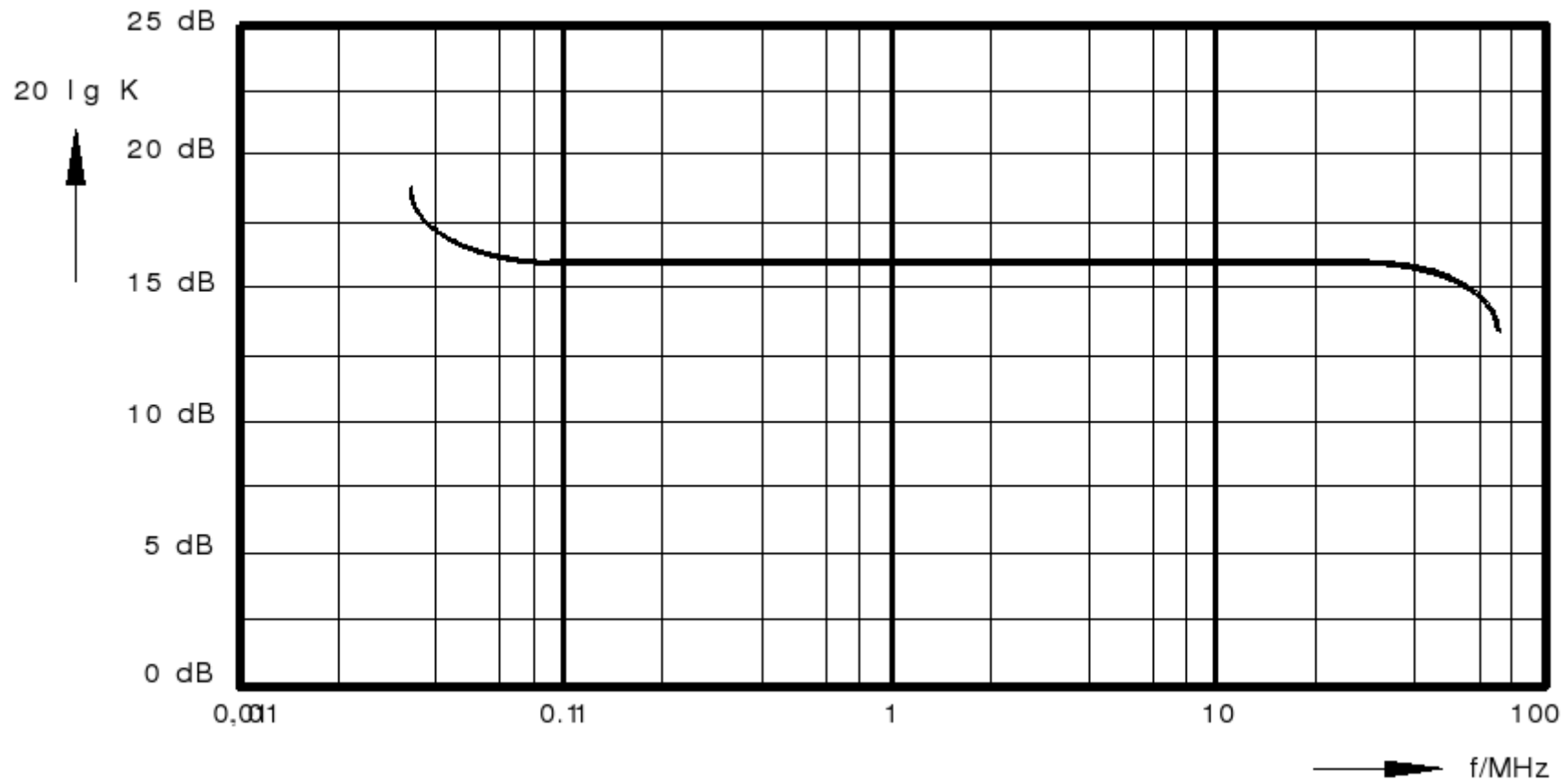
Monopolo corto in pratica

Il rapporto segnale/rumore per un'antenna corta rimane costante, specialmente alle frequenze basse dove domina il rumore atmosferico. (fonte Rohde Schwartz)

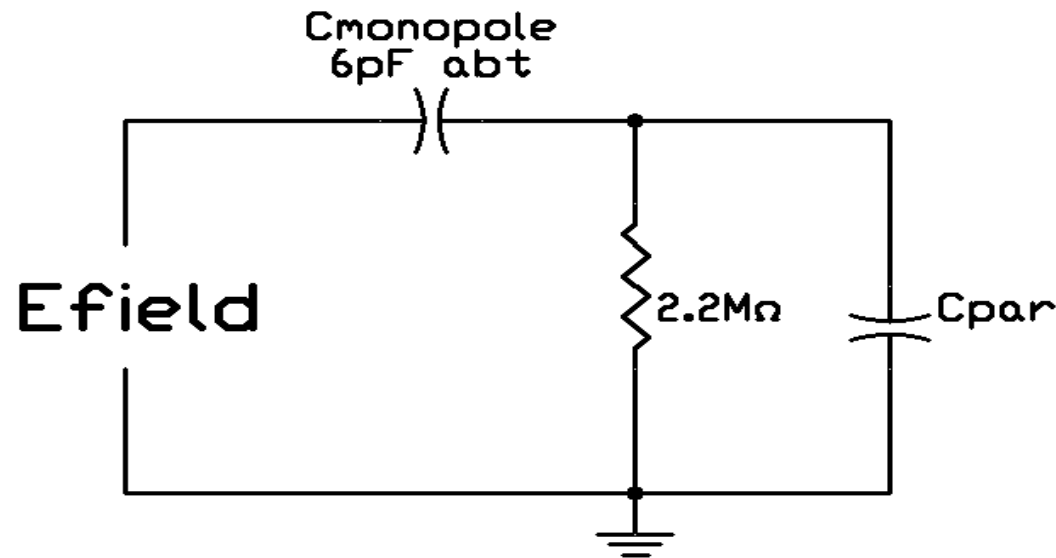


Monopolo corto in pratica

Il fattore d'antenna rimane costante su un'ampia gamma di frequenze. (fonte Rohde Schwartz)



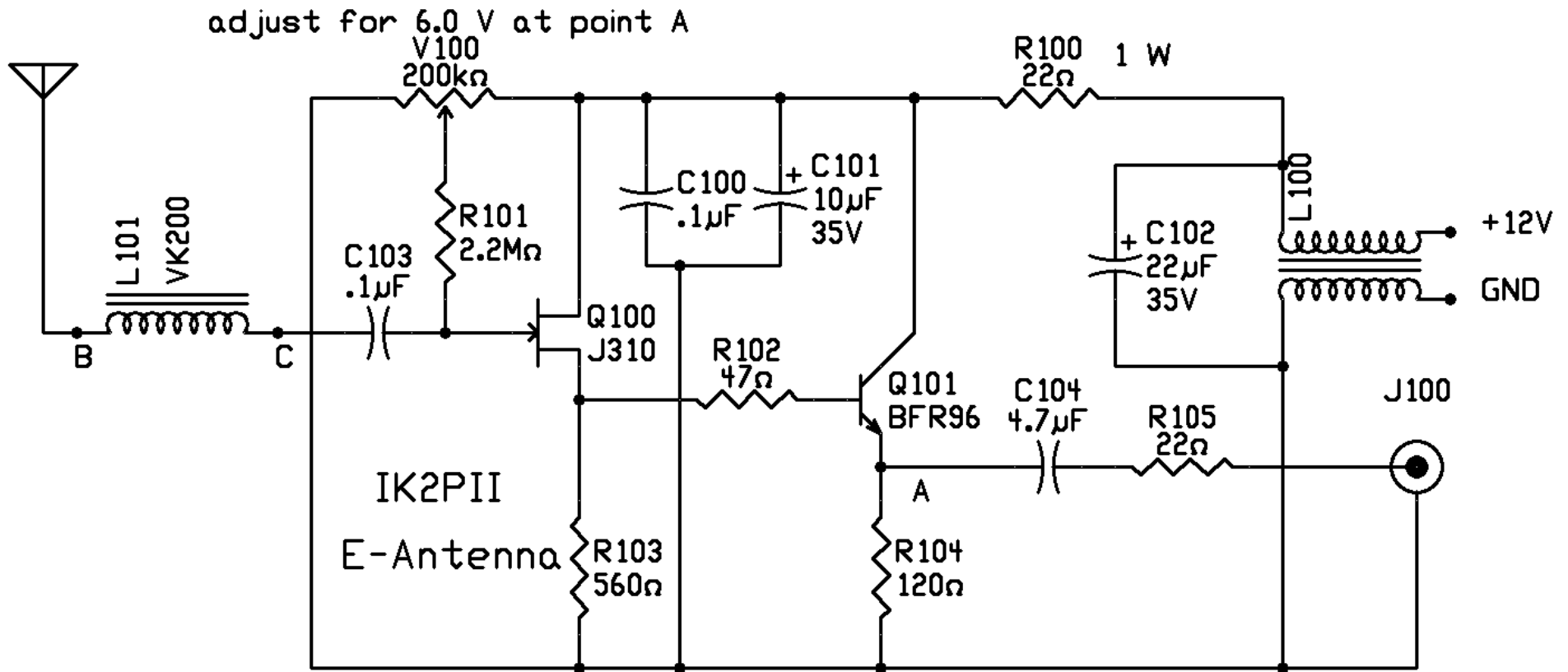
Monopolo corto in pratica



Circuito equivalente

C_{par} sono la capacità di gate del FET e le capacità parassite. In serie alla capacità intrinseca del monopolo formano un partitore capacitivo con risposta in frequenza piatta.

Monopolo corto, lo schema



Monopolo corto, lo schema

Il circuito ha guadagno circa 1 (non guadagna).

Per avere una impedenza di ingresso elevata occorre usare un FET in circuito source follower, tuttavia il FET non ha una impedenza di uscita sufficientemente bassa da pilotare senza perdite il cavo coassiale da 50 ohm, quindi occorre inserire anche un transistor configurato ad emitter follower.

Il circuito è accoppiato in corrente continua, per avere una risposta in frequenza estesa fino alle onde lunghissime che interessano gli appassionati di RadioNatura.

Monopolo corto, lo schema

Il transistor Q101 è polarizzato con una corrente di 50 mA per una tensione di emettitore di 6 volt (1/2 della tensione di alimentazione) in modo che resista ai segnali forti.

Il BFR96 può essere sostituito dai vari 2N3866, 2N5109, BFR95 con un piccolo dissipatore.

C104 è un condensatore in poliestere (oppure un elettrolitico, positivo verso l'emettitore, con un ceramico da 100 nF in parallelo), R105 elimina la tendenza del circuito ad oscillare se il cavo coassiale verso il ricevitore è lungo.

Monopolo corto, lo schema

Il FET Q100, un J310, è polarizzato con I_{drain} di 12 mA per avere una bassa intermodulazione, la caduta di tensione su R103 permette di avere sulla base di Q101 una tensione di 6,7 volt ($6\text{ V} + V_{\text{BE}}$ di Q101).

Per ovviare alla dispersione dei parametri del FET (I_{DSS} e tensione di pinch-off) ho previsto il trimmer multigiri V100, che deve essere montato con il cursore posto a massa. Poi si regola per avere 6,0 volt sull'emettitore di Q101.

L101 forma un filtro passa basso con la capacità di gate del fet e attenua le VHF (radio FM).

L100 impedisce ai disturbi sull'alimentazione di raggiungere il circuito.

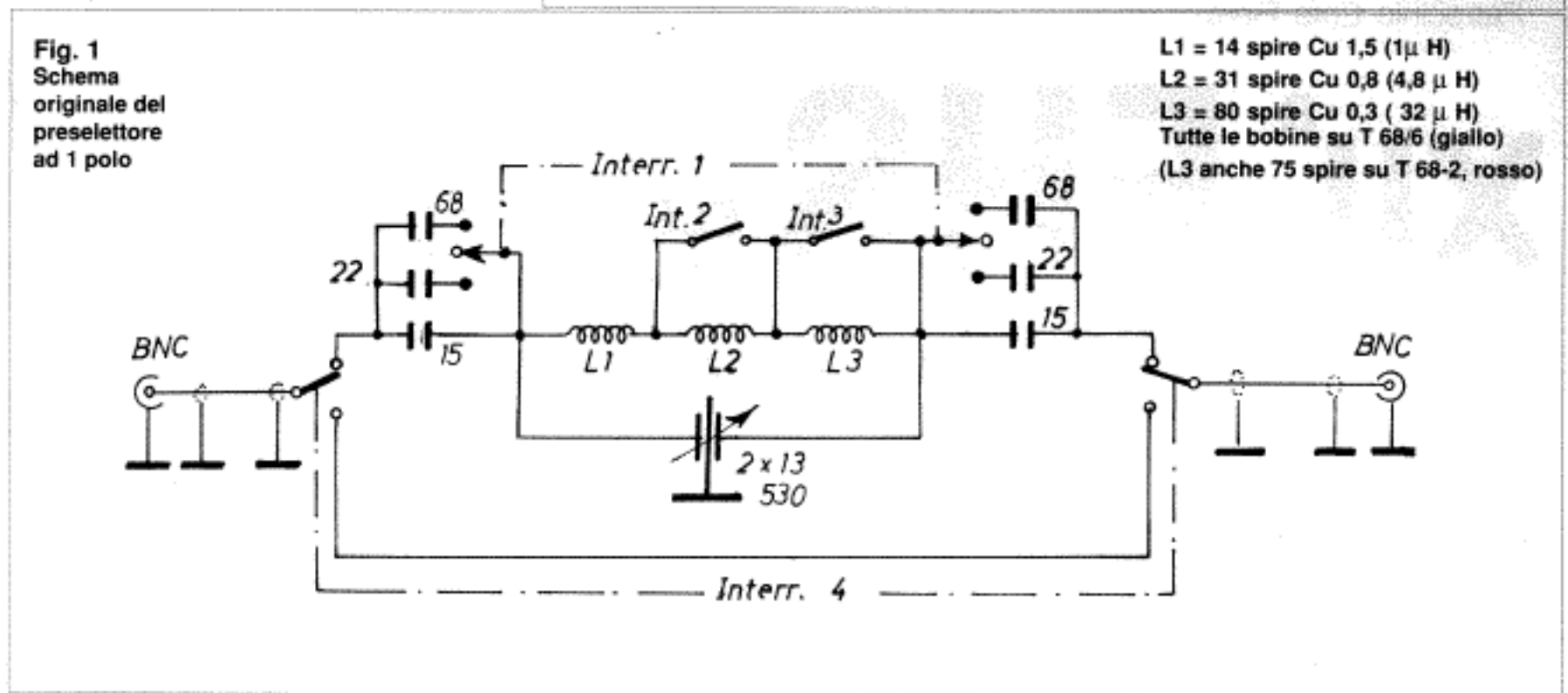
Monopolo corto, pregi

- Piccole dimensioni.
- Facilmente trasportabile.
- Autocostruzione facile, economico.
- Larga banda, dalle onde lunghissime alle VHF.
- Rendimento: circa 2 punti S in meno rispetto al dipolo.
- Ideale pr SWL o appassionati di radioascolto, anche in onde medie – lunghe – lunghissime.
- Interessante per 40 – 80 – 160 metri.

Monopolo corto, difetti

- Richiede una linea per l'alimentazione.
- Per funzionare bene deve essere installato in uno spazio libero, a qualche metro da terra o dal tetto, su un palo isolante. Ostacoli vicini riducono il rendimento.
- Porta all'ingresso del ricevitore un ampio spettro di frequenze, il ricevitore può intermodulare o saturare.
- Con alcuni ricevitori è necessario usare un preselettore. Ad esempio quello di I0ZV.

Il preselettore di IOZV



Il preselettore di IOZV

Tabella 1 - Dati di risposta del preselettore ad un polo (dati originali)

Bobine inserite	Condensatori di accoppiam.	Frequenza di accordo	Attenuazione dB risultante in b.p.
L1	15	38 - 9,6	1,6 - 14
	37	30,5 - 9,4	0,6 - 5
	83	24,1 - 9,05	0,2 - 1,5
L1 + L2	15	15,9 - 4	2,5 - 18
	37	12,7 - 3,96	0,8 - 7
	83	9,7 - 3,8	0,4 - 2,2
L1 + L3	15	6,3 - 1,7	6,2 - 28
	37	5,1 - 1,68	1,8 - 14
	83	3,87 - 1,59	0,5 - 5,3
L1 + L2 + L3	83	3,66 - 1,49	0,5 - 5,3

Bobine inserite	Condensatori di accoppiam.	Frequenza MHz	kHz Banda passante	Attenuazione dB risultante in b.p.
L1 + L3	15	1,83	10	24
	37	1,83	13	11,2
	83	1,83	27	3,8
L1 + L3	15	3,7	39	11
	37	3,7	87	3
	83	3,7	300	0,5
L1 + L2	15	7	51	7,2
	37	7	170	1,5
L1 + L2	15	10	150	4
	37	10	600	1
L1	15	10	72	12,5
	37	10	130	3,3
L1	15	14	120	6,7
	37	14	390	1,5
L1	15	21	380	3,1
	37	21	1700	0,6
L1	15	28,5	1000	1,7
	37	28,5	1600	0,4

Antenne per campo magnetico

Loop

Ha un diametro tra i 10 e i 20 cm circa.

Poichè ha una funzione di trasferimento assoluta, calcolabile, è usata per misure di campo elettromagnetico.

Abbiamo già visto la relazione tra campo magnetico e tensione ai capi del loop.

Per il campo elettrico:

$$V = \frac{2\pi}{c} f N A E \cos\Phi \approx 2,1 \cdot 10^{-7} f N A E \cos\Phi$$

dove:

V = tensione ai morsetti (circuito aperto, $Z = \infty$)

c = velocità della luce = 299792458 m/sec

f = frequenza, in Hz

N = numero di spire

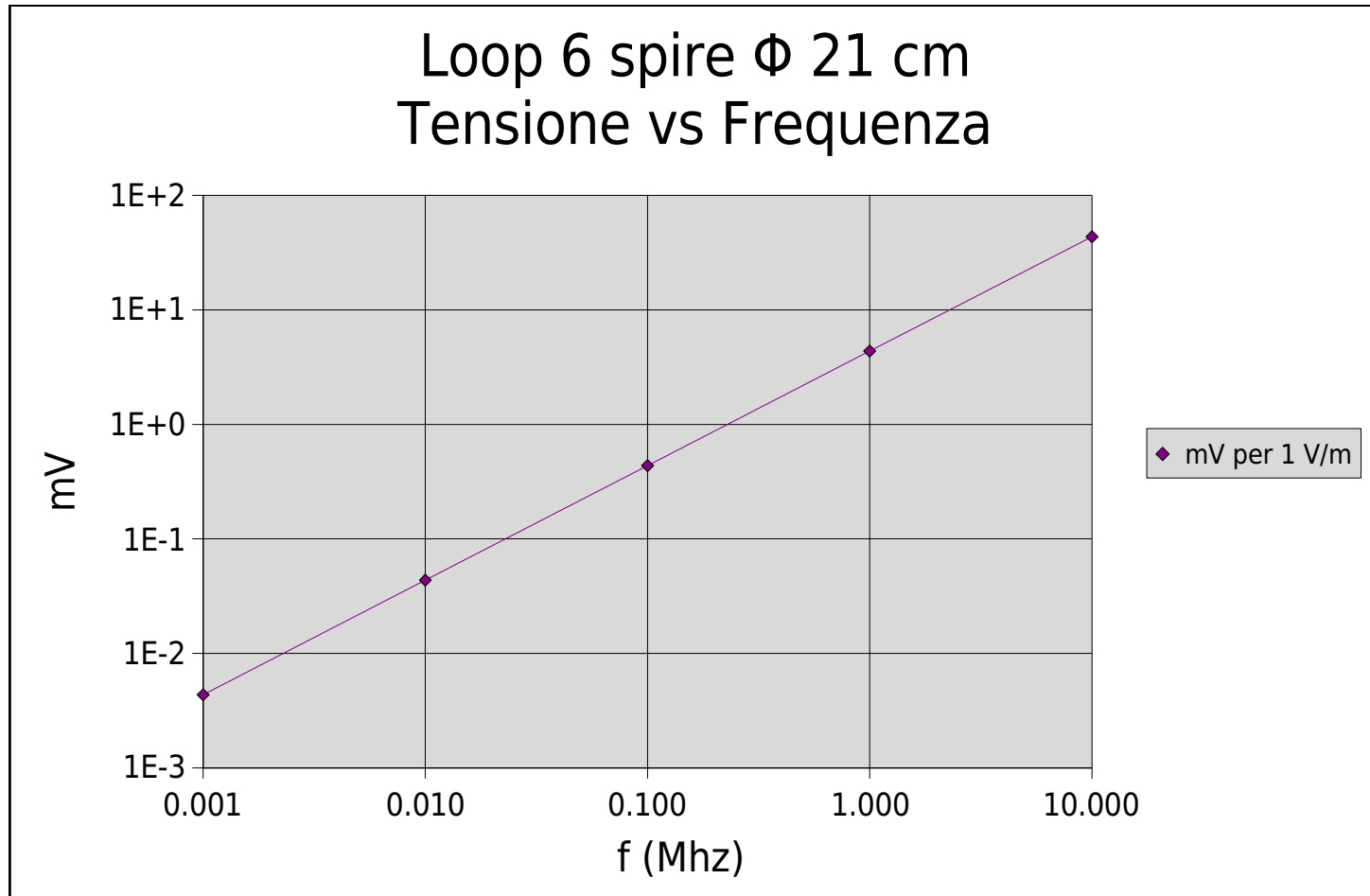
A = area del loop, in metri

E = campo elettrico, in V/m

Φ = angolo tra asse del loop e direzione campo magnetico

Loop

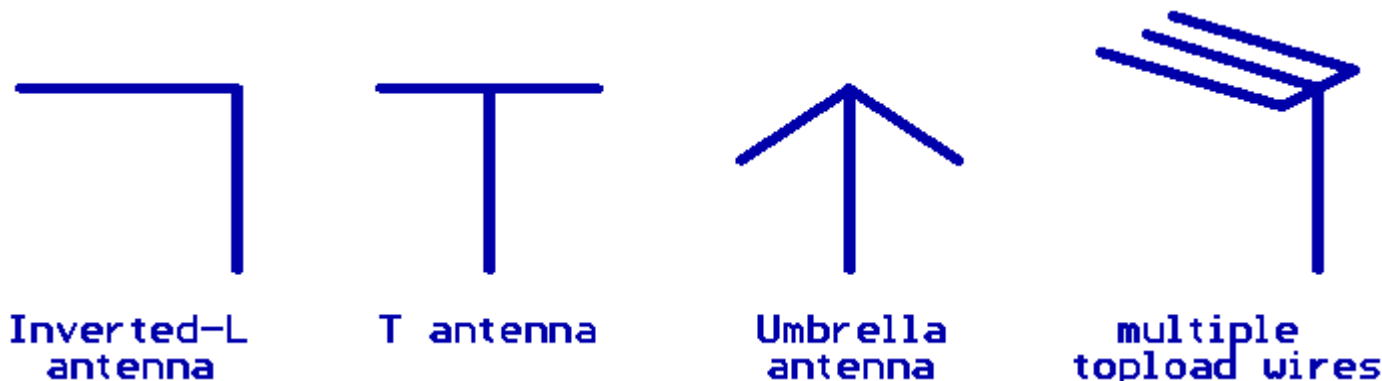
Esempio di loop magnetico di piccole dimensioni per onde lunghe e medie, 6 spire con diametro 21 centimetri. Viene collegato ad un voltmetro selettivo.



Antenne trasmettenti tipo Marconi

L'antenna piccola in trasmissione

Prenderemo in considerazione l'antenna verticale e una sua variante, l'antenna verticale con carico capacitivo in testa.



Sono antenne a polarizzazione verticale, il tratto che irradia è quello verticale.

Per antenna “corta” si intende un'antenna con lunghezza molto inferiore a $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda, ad esempio una verticale di 7 metri per i 160 metri.

L'antenna piccola in trasmissione

Si definisce rendimento o **efficienza di radiazione** dell'antenna (in trasmissione) il rapporto tra la potenza applicata ai suoi morsetti e la potenza effettivamente irradiata sotto forma di campo elettromagnetico. La potenza accettata dall'antenna ma **non irradiata** viene dissipata sotto forma di **calore** nelle parti che costituiscono il sistema radiante: conduttore, bobina di carico, impianto di terra.

$$\eta_{\text{radiazione}} = \frac{P_{\text{input}}}{P_{\text{irradiata}}}$$

L'antenna piccola in trasmissione

L'antenna in trasmissione non può essere a larga banda, come l'antenna piccola in ricezione, deve essere **risonante**.

- Un conduttore lungo un multiplo esatto di $\frac{1}{4} \lambda$ è **risonante**, alla frequenza di risonanza si comporta come una resistenza
- Un conduttore **lungo** rispetto a $\frac{1}{4} \lambda$ si comporta come un'induttanza e deve essere portato in risonanza mettendo in serie una **capacità**.
- Un conduttore **corto** rispetto a $\frac{1}{4} \lambda$ si comporta come una capacità e deve essere portato in risonanza mettendo in serie un'**induttanza** (bobina di carico).

L'antenna piccola in trasmissione

L'**efficienza di radiazione** di un'antenna dipende da tre fattori:

- la resistenza di radiazione dell'antenna
- la corrente d'antenna
- la direttività (o guadagno)

Inoltre occorre considerare la **resistenza di terra** che è in serie alla resistenza di radiazione.

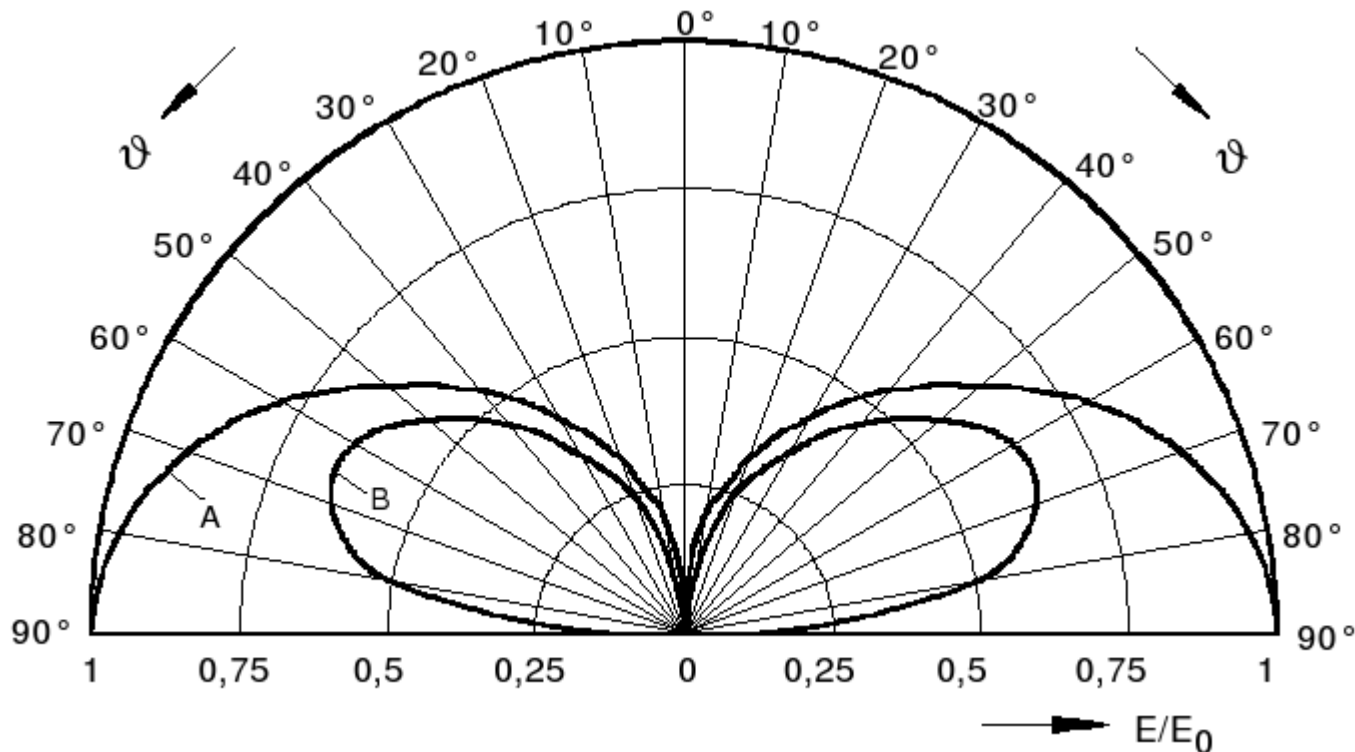
La resistenza di radiazione e la corrente

La resistenza di radiazione dell'antenna è definita come il rapporto tra la potenza irradiata e il quadrato della corrente (RMS) di antenna. Si considera la corrente ai morsetti.

$$R_{rad} = \frac{P_{irradiata}}{I_{Arms}^2}$$

La direttività (guadagno)

La direttività è definita dal diagramma di radiazione (rispetto ad un'antenna di riferimento). Nella figura il caso di un monopolo verticale: A su un piano di terra senza perdite, B su un piano di terra medio.



Esempio

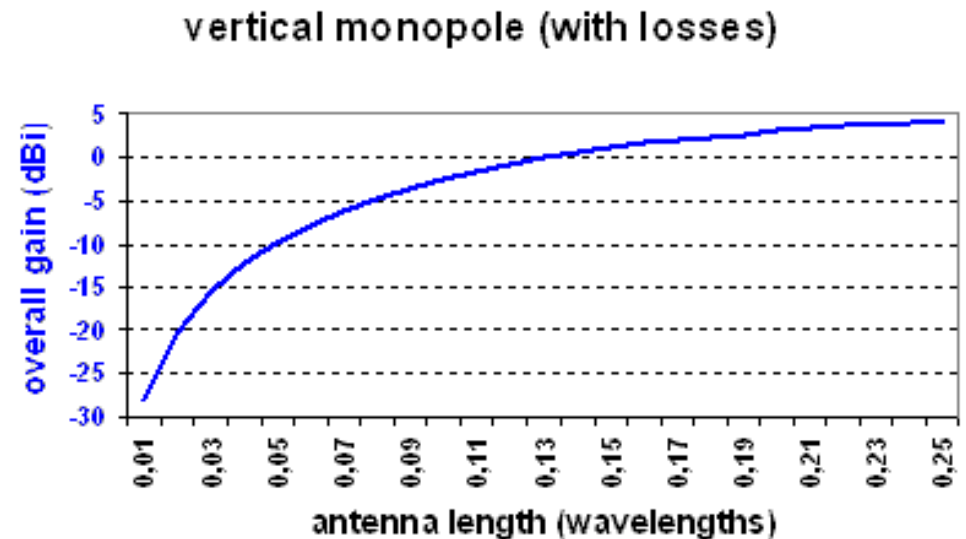
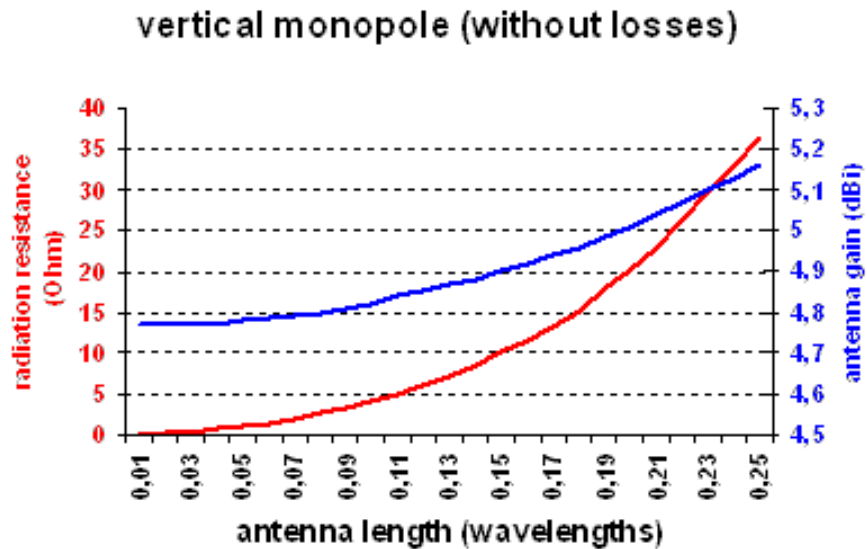
Ad esempio:

un'antenna con resistenza di radiazione di 10Ω , una corrente di antenna di 2 A e un guadagno (direttività) di 4 (6dB) irradia una potenza di $10 \times 2^2 \times 4 = 160 \text{ Watt}$.

In questo caso non sono considerate le perdite: efficienza di radiazione = 1 .

Esempio

Nelle figure è rappresentato il comportamento di un monopolo ideale, senza perdite, e quello di uno reale, con perdite.



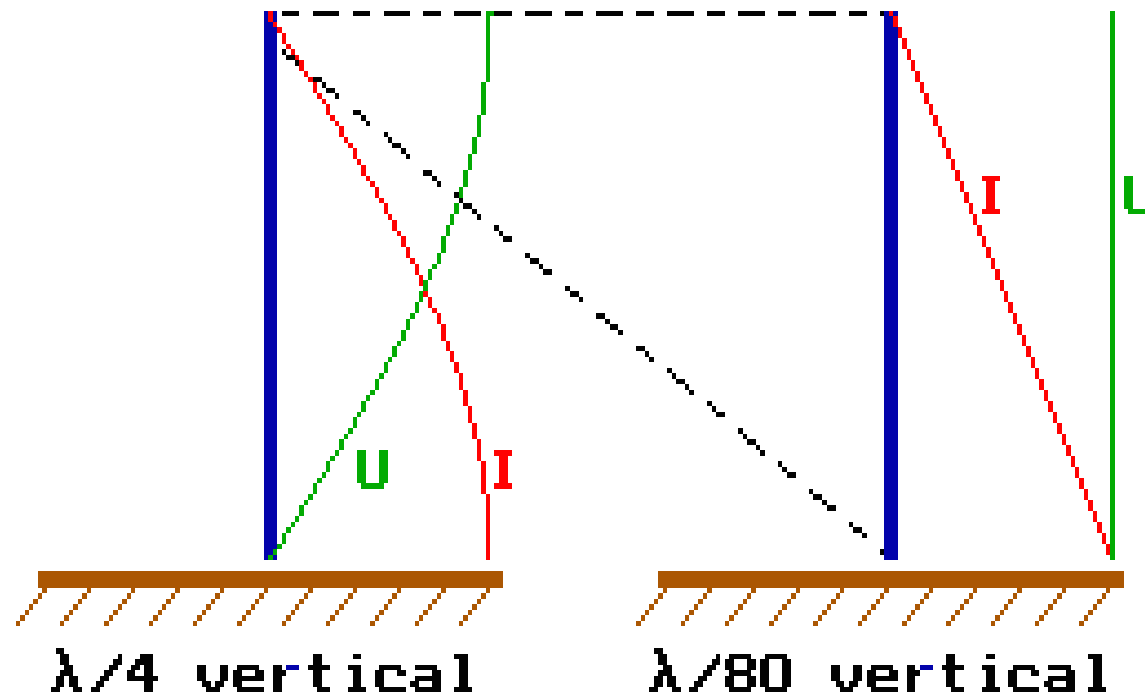
Effetti dell'accorciamento

- La direttività (guadagno) cala leggermente ma in modo trascurabile, meno di 0.5dB.
- La **resistenza di radiazione crolla** quando l'antenna diventa corta.
- L'impedenza di antenna ha una componente capacitiva elevata
- Le **perdite nella resistenza di terra e nella bobina di carico** aumentano man mano che l'antenna si accorcia, perché diminuisce la resistenza di radiazione.

Distribuzione della corrente d'antenna

La corrente (**I**) e la tensione (**U**) di antenna in un monopolo $\lambda/4$ e in un monopolo $\lambda/80$.

Ricordiamo che l'intensità del campo EM irradiato è proporzionale alla corrente.



Efficienza di radiazione

Si può calcolare anche con la seguente formula:

$$\eta_{\text{radiazione}} = \frac{R_{\text{radiazione}}}{R_{\text{radiazione}} + \sum R_{\text{perdita}}}$$

dove:

$\sum R_{\text{perdita}}$ è la somma della resistenza di terra e delle resistenze parassite.

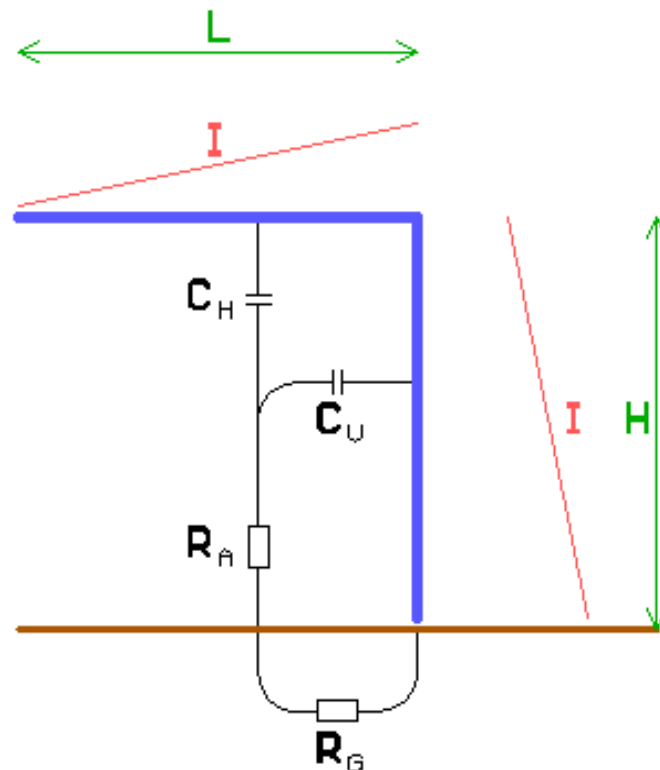
Se ricordiamo che il campo EM è proporzionale alla corrente risulta ovvio che se aumenta la resistenza di perdita la corrente di antenna diminuisce.

$$\sum P = \sum (I^2 R_i) = I^2 \sum R_i$$

$\sum P$ = somma delle potenze (irradiata e dissipate)

L'effetto del carico capacitivo

La corrente di antenna vale zero alla sua estremità. Il carico capacitivo alla sommità dell'antenna fa aumentare la corrente nel tratto verticale, quello che irradia. Fa anche aumentare la capacità totale e quindi diminuisce il valore dell'induttanza di accordo (meno filo = meno perdite resistive).



Il carico capacitivo

Le capacità si calcolano nel seguente modo:

- tratto verticale: circa 6 pF/metro
- tratto orizzontale: circa 5 pF/metro

esempio: 10 metri verticale + 10 metri orizzontale

$$(10 * 6) + (10 * 5) = 60 + 50 = 110 \text{ pF}$$

L'induttanza di accordo

L'induttanza di accordo si calcola con la seguente formula:

dove:

L = induttanza, in Henry

f = frequenza, in Hertz

C = capacità, in Farad

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C}$$

oppure:

L = induttanza in μH

f = frequenza, in Mhz

C = capacità, in pF

$$L = \frac{25330}{f^2 C}$$

Esempio per i 160 metri

Esempio: filo 10 m verticale + 10 m orizzontale: $C = 110 \text{ pF}$
 $f = 1.840 \text{ Mhz}$

$$L = \frac{25330}{f^2 C} = \frac{25330}{1.840^2 \cdot 110} = 68 \mu\text{H}$$

Per ridurre le perdite nell'induttanza è opportuno che il diametro della bobina sia circa uguale alla lunghezza dell'avvolgimento. Meglio avvolgere le spire affiancate, senza spaziatura. Il filo deve avere un diametro elevato (filo smaltato $\Phi 1,5 \text{ mm}$).

Calcolo dell'induttanza

Si usa la seguente formula empirica (valida per il rapporto diametro/lunghezza circa 1):

$$L = \frac{(N \times d)^2}{(460 \times d) + (1020 \times l)}$$

dove:

L = induttanza, in μH

N = numero di spire

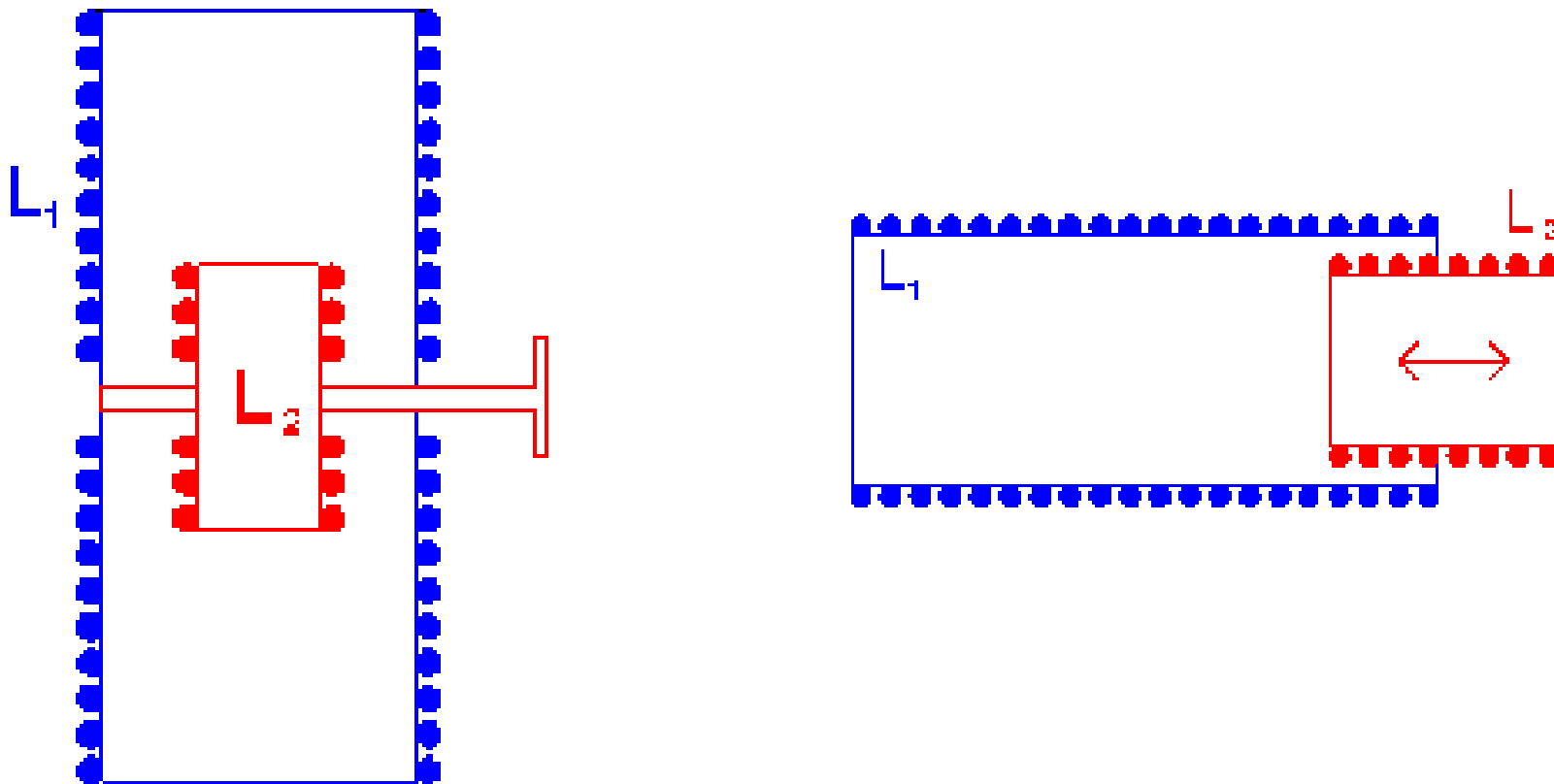
d = diametro avvolgimento, in mm

l = lunghezza avvolgimento, in mm

E' comodo inserire la formula in un foglio elettronico e procedere al calcolo per tentativi.

Il variometro

Per fare un fine-tuning dell'induttanza e portare l'antenna in risonanza è comodo costruire un variometro.



Il variometro



Software per il calcolo

In Internet si trova del software liberamente scaricabile per calcolare antenne corte e bobine di carico.

In particolare la collezione di programmi di G4FGQ:

<http://www.g4fgq.regp.btinternet.co.uk>

Con questi programmi si possono fare facilmente simulazioni di “cosa succede se...”, prima di intraprendere la costruzione.

Sul sito di IN30TD è possibile calcolare on-line bobine di carico e variometri:

<http://www.qsl.net/in3otd>

Le resistenze parassite

Devono essere ridotte al minimo per migliorare l'efficienza.

Sono presenti nell'induttanza di accordo e nel piano di terra.

Per ridurre quelle dell'induttanza si usa un filo con diametro elevato e si costruisce una bobina con Q elevato, con i criteri visti prima.

Per ridurre le resistenze del piano di terra occorre installare un numero elevato di radiali disposti a raggiera (almeno 10), sepolti o appoggiati a terra, lunghi almeno come il carico capacitivo in testa.

Adattamento di impedenza

L'impedenza dell'antenna, alla frequenza di risonanza, è esclusivamente resistiva:

$$Z = R_{\text{radiazione}} + R_{\text{perdite bobina}} + R_{\text{perdite terra}}$$

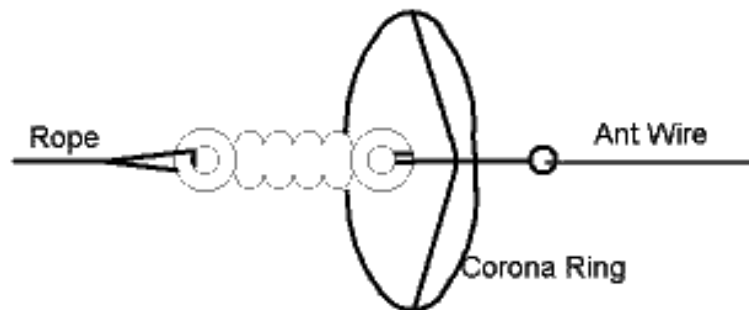
L'adattamento a 50 Ω si può fare con un trasformatore non risonante oppure andando a cercare sulla bobina una presa che presenta il ROS minimo.

Da questa formula si capisce anche dove si concentrano le perdite, le resistenze sono in serie e la corrente è costante:

$$P = I^2 R = I^2 R_{\text{radiazione}} + I^2 R_{\text{perdite bobina}} + I^2 R_{\text{perdite terra}}$$

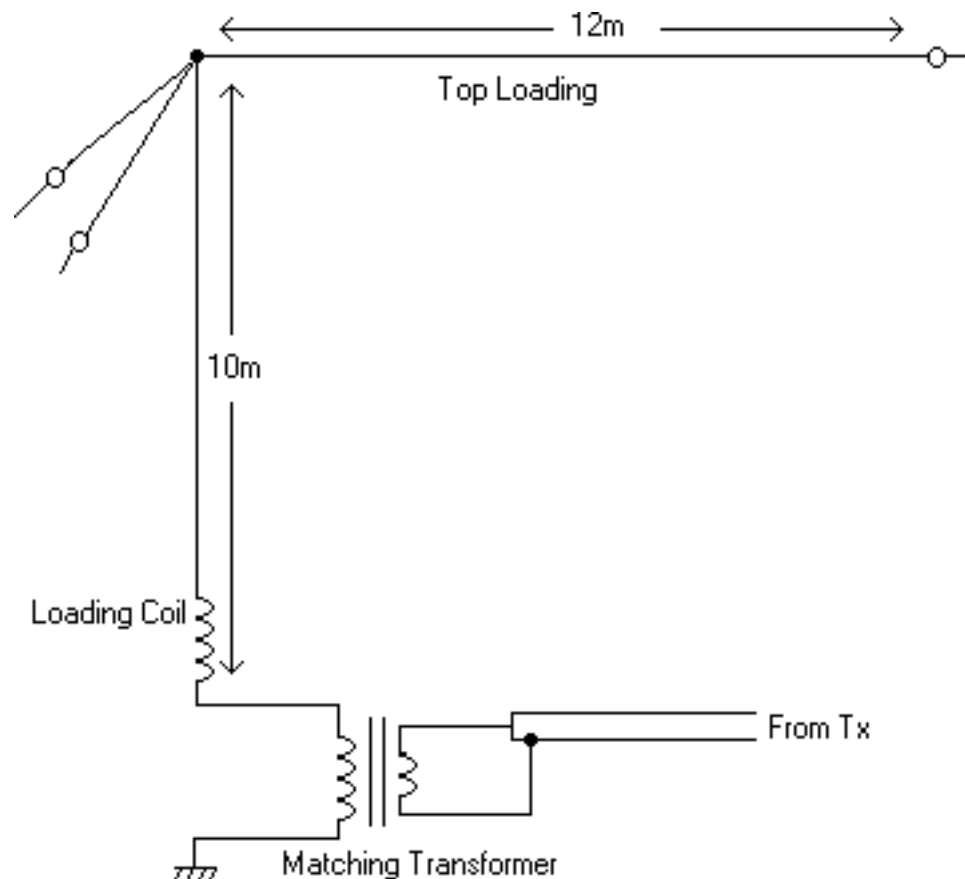
Effetto corona

Al termine del filo si sviluppa una tensione molto elevata che può dar luogo ad una scarica (effetto corona) a volte visibile solo al buio. Per evitarlo terminate il filo con un cerchietto.



Esempio

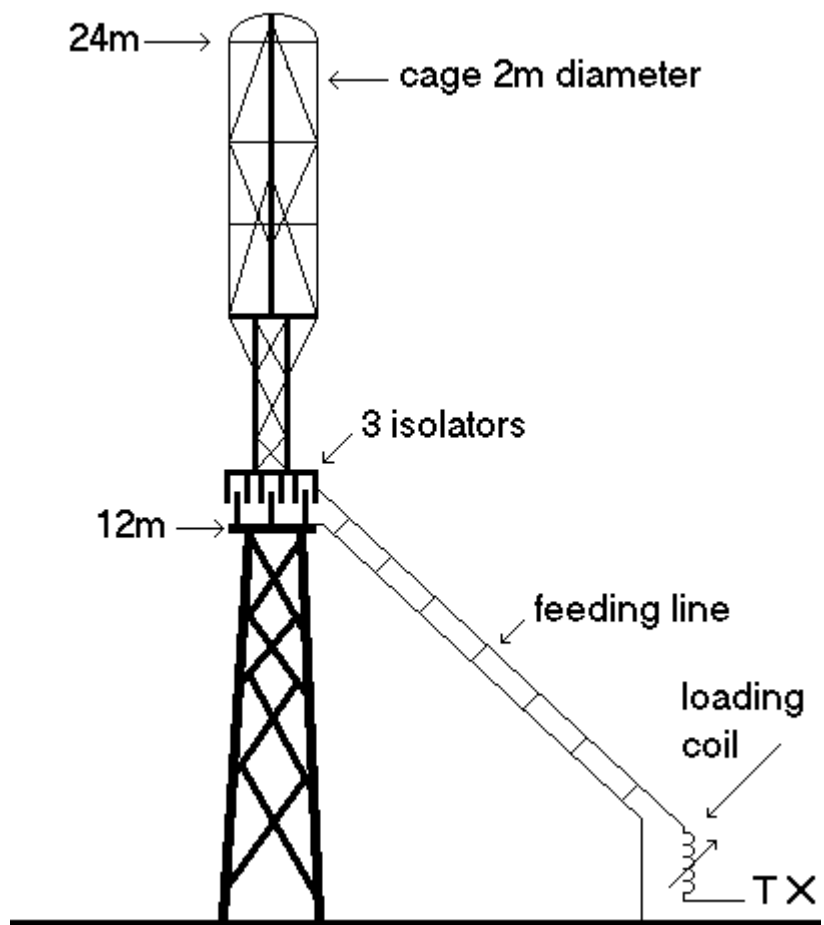
Un monopolo corto, con carico capacitivo, induttanza di accordo e trasformatore di adattamento di impedenza per i 136 kHz.



Riepilogo, fonte Rohde Schwartz

Antenna type	Directivity factor	In dB	Effective length	Radiation resistance
Isotropic radiator	1	0	-	-
Electrically short antenna on conductive plane	3	4.7	$h/2$	$40 \left(\frac{\pi h}{\lambda}\right)^2 \Omega$
$\lambda/4$ antenna on conductive plane	3.3	5.1	0.16λ	40Ω
$5 \lambda/8$ antenna on conductive plane	6.6	8.2		
Electrically short dipole	1.5	1.8	$l/2$	$20 \left(\frac{\pi l}{\lambda}\right)^2 \Omega$
Half-wave dipole	1.64	2.1	$\lambda/\pi = 0.32 \lambda$	73Ω
Turnstile antenna	0.82	- 0.86		
Full-wave dipole	2.4	3.8	$\gg \lambda$	200Ω
Small loop antenna with n loops	1.5	1.8	$n \cdot \frac{\pi^2 D^2}{2 \cdot \lambda}$	$20 \Omega \pi^6 n^2 (D/\lambda)^4$
Full-wave loop (ring, circumference = 1λ)	2.23	3.5		
Yagi-Uda antenna (6 elements)	typ. 10	typ. 10 dB		

Antenna di ON6ND, "piccole dimensioni"



Bibliografia

- (1) Frank Gentges (K0BRA), "The AMRAD Active LF Antenna", QST, September 2001
<http://www.arrl.org/tis/info/pdf/0109031.pdf>
- (2) Ralph W. Burhans, "Active antenna coupler for VLF", Ham Radio, october 1979
- (3) Christof Rohner, "Antenna Basics", Rohde&Schwarz, 1999 ([cercare sul WEB con GOOGLE](#))
- (4) SCHWARZBECK MESS - ELEKTRONIK, "VAMP 9243 9 kHz - 30 MHz Low noise active monopole antenna", <http://www.schwarzbeck.de/Datenblatt/m9243.pdf>
- (5) SCHWARZBECK MESS - ELEKTRONIK, "Calibration of Vertical Monopole Antennas (9kHz - 30 MHz)"
- (6) Angiolo Chiti (I5SXX), "Antenna a Loop tipo STODDART", RadioRivista 1/2004, pag. 34
- (7) Angiolo Chiti (I5SXX), "Campi elettromagnetici e loro livello", RadioRivista 2/2004, pag. 28
- (8) Marco Bruno, IK1ODO, "Thinking about ideal loops", <http://www.vlf.it>
- (9) Francesco Cherubini (I0ZV), "Filtri preselettori per H.F.", RadioRivista 9/1989 pag. 38 (vedi anche M. Martin (DJ7VY), R.Waxweiler (DJ7VD), CQ DL 7/1984 pag. 320 e 9/1984 pag. 433)
- (10) il sito WEB di R. Strobbe (ON7YD), <http://wireless.org.uk/on7yd>
- (11) Claudio Pozzi (IK2PIL), "E-Antenna: monopolo corto a larga banda", RadioKit ottobre 2006