

Antenne a Loop

- *loop elementari*
- *loop confrontabili con la lunghezza d'onda*
- *adattamento*
- *loop con ferrite*
- *design - modelli NEC*

Gaetano Marrocco, PhD

Gaetano Marrocco

Introduzione

- Sono antenne frequentemente usate in HF, VHF e UHF e, come sensori di campo, anche nelle microonde
- Vengono realizzate in forma circolare, rettangolare, triangolare e poligonale
- Loop con lunghezza complessiva (perimetro per numero di spire) piccola rispetto alla lunghezza d'onda ($N \times C < \lambda / 10$) hanno una resistenza di radiazione molto piccola e quindi sono dei radiatori molto scadenti
- Sono spesso usate, in configurazione isolata, come antenne riceventi in radio portatili, telefoni cellulari, cercapersone e come antenne direzionali in applicazioni di radionavigazione
- Il loop piccolo (small loop) si comporta come un dipolo magnetico (indipendentemente dalla forma) con un pattern di radiazione che ha un nullo nella direzione ortogonale al loop e il massimo sul piano dello stesso
- Quando la lunghezza del loop aumenta fino ad una lunghezza d'onda, il massimo si sposta lungo l'asse

Gaetano Marrocco

LOOP INFINITESIMO A CORRENTE COSTANTE

Si consideri un loop

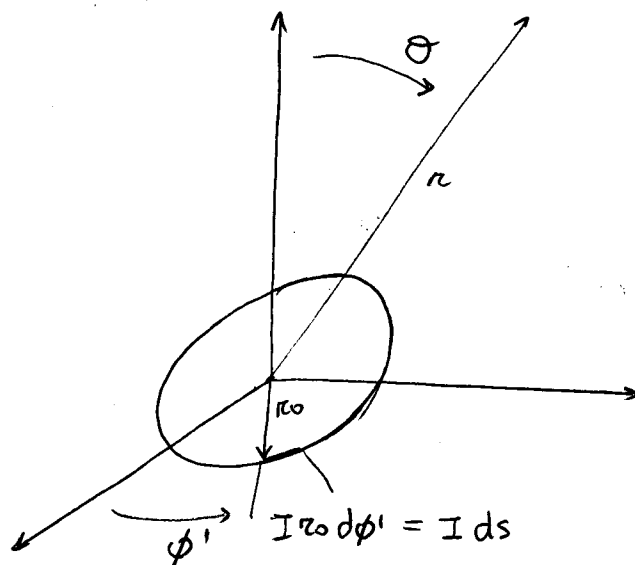
di perimetro molto inferiore

alle lunghezza d'onda

$$2\pi r_0 \ll \lambda$$

$$k_0 r_0 \ll 1$$

sul quale scorre
una corrente costante



$$\underline{J}(\phi') = I_0 \delta(z) \delta(\sqrt{x^2 + y^2} - r_0) \hat{\phi} \quad \text{loop sul piano } (x, y)$$

Per ottenere il campo lontano bisogna inserire l'espressione della corrente nell'integrale di radiazione per geometrie strutturate fili:

$$\underline{E}(r) = -j k_0 \eta_0 \frac{e^{j k_0 r}}{4\pi r} \int_{\text{fili}} \left[\hat{t} - (\hat{z} \cdot \hat{t}) \hat{z} \right] I(r') e^{j k_0 \hat{z} \cdot r'} dz'$$

$$\begin{cases} \underline{r}' = r_0 (\hat{x} \cos \phi' + \hat{y} \sin \phi') \\ \hat{t} = \hat{\phi}(\phi') = -\hat{x} \sin \phi' + \hat{y} \cos \phi' \\ \hat{r} = \hat{x} \cos \phi \sin \theta + \hat{y} \sin \phi \sin \theta + \hat{z} \cos \theta \end{cases}$$

Lavoro l'esponentiale $e^{jk_0 \hat{z} \cdot \underline{r}'}$

$$\hat{z} \cdot \underline{r}' = \sin \vartheta (\cos \phi \cdot \cos \phi' + \sin \phi \sin \phi') r_0$$

↓ delle formule di Werner

$$\cos(\phi - \phi')$$

$$\Rightarrow e^{jk_0 \hat{z} \cdot \underline{r}'} = e^{jk_0 r_0 \sin \vartheta \cos(\phi - \phi')}$$

Lavoro il termine d'ordine $\hat{z} - (\hat{z} \cdot \hat{z}) \hat{z}$

$$\hat{z} \cdot \hat{z} = + \sin \vartheta (\cos \phi \sin \phi' + \cos \phi' \sin \phi)$$

⋮

Saltando un po' di passaggi ed eseguendo l'integrale, si ottiene la seguente espressione per il campo lontano

$$\underline{E} = \eta_0 k_0^2 \pi r_0^2 I_0 \sin \vartheta \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \hat{\phi}$$

chiamo $S = \pi r_0^2$ area del loop

$$\begin{aligned} E_{\phi} &= \eta_0 k_0^2 I_0 S \sin \vartheta \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \\ H_{\theta} &= H_0 \hat{\theta} = -k_0^2 I_0 S \sin \vartheta \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \end{aligned}$$

E_{ϕ}, H_{θ}

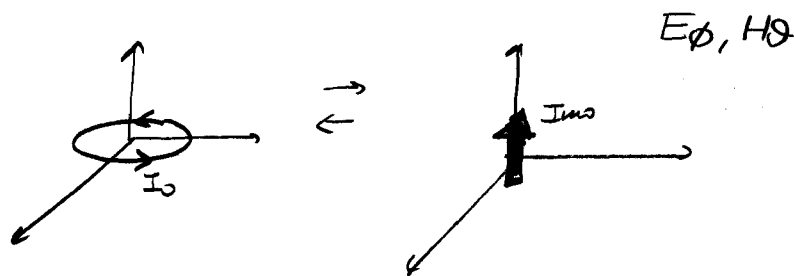
Si ricorda l'espressione del campo medio di un dipolo elementare magnetico di momento $I_{mo} \Delta l$ e posto lungo \hat{z} :

$$E_{\phi} \sim -j k_0 I_{mo} \Delta l \sin \theta \frac{e^{-j k_0 r}}{4\pi r}$$

Del confronto tra le due equazioni si deduce che il loop di corrente costante media come il dipolo magnetico elementare orientato lungo \hat{z} avente come momento di dipolo magnetico

$$I_{mo} \Delta l = j k_0 \mu_0 I_0 S$$

Si è così individuato una possibile realizzazione fisica di un dipolo elementare



Il diagramma di radiazione di un loop infinitesimo è quindi identico a quello di un dipolo elementare elementare, avendo invertito le componenti di campo elettrico con le componenti di campo magnetico

$$D_{max} = 1.5$$

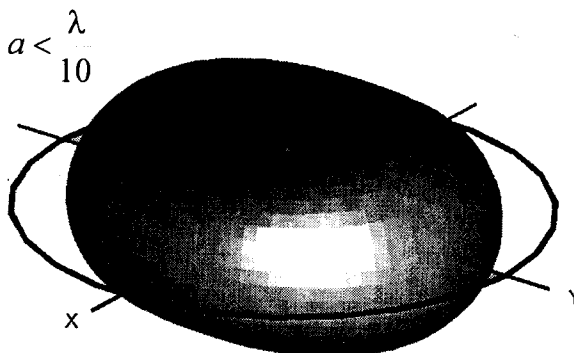
Small circular loop - Far field

approssimazione in campo lontano ($kr \gg 1$)

$$H_{\theta} \approx -\frac{\pi S I_0}{\lambda^2 r} \sin \theta e^{-jkr}$$

$$E_{\phi} \approx Z_0 \frac{\pi S I_0}{\lambda^2 r} \sin \theta e^{-jkr}$$

$$Z_w = -\frac{E_{\phi}}{H_{\theta}} = Z_0$$



$S = \pi a^2$: area del loop

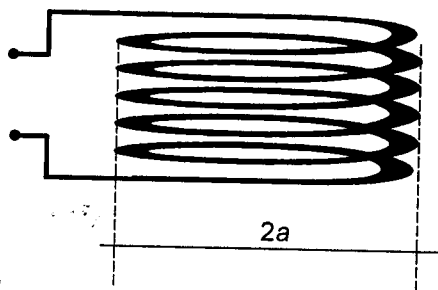
Gaetano Marrocco

Small circular loop: resistenza di radiazione

Resistenza di radiazione di un loop piccolo di superficie S e costituito da N avvolgimenti

$$R_r = \eta \left(\frac{2\pi}{3} \right) \left(\frac{kS}{\lambda} \right) N^3 = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda} \right)^4 N^2$$

$$C = 2\pi a$$



La resistenza di radiazione della singola spira è molto bassa (frazioni di ohm) e può essere inferiore alla resistenza ohmica del conduttore

Esempio:

$$a = \lambda/20$$

$$C = 2\pi a = \pi \frac{\lambda}{10}$$

$$R_r \text{ (una spira)} = 20 \frac{\pi^6}{10^4} = 1.92 \Omega$$

per ottenere una resistenza di radiazione pari a circa 50 ohms:

$$N = \sqrt{50 / R_r \text{ (una spira)}} = 5.09$$

$$R_r (N = 5) = R_r \text{ (una spira)} \cdot 25 = 48.07 \Omega$$

Gaetano Marrocco

Resistenza di Radiazione

Si calcola nel modo usuale

$$P_R = \frac{1}{2} R_R |I_0|^2 \Rightarrow R_R = \frac{2 P_R}{|I_0|^2}$$

$$P_R = \frac{1}{2\eta_0} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |E_\phi|^2 r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi =$$

$$= \frac{1}{2\eta_0} \eta_0^2 k_0^4 S^2 \frac{I_0^2}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^2\theta \sin\theta \, d\theta =$$

$$= \frac{S^2 \eta_0 I_0^2 k_0^4}{12\pi}$$

$$R_R = 320 \pi^6 \left(\frac{r_0}{\lambda_0}\right)^2$$

È ancora più bassa che nel caso di un dipolo elementare

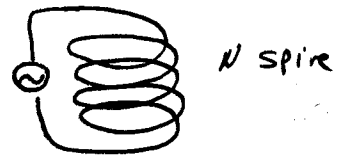
Esempio

$$r_0 = 10 \text{ cm} \quad f_0 = 1 \text{ MHz} \quad (\lambda = 300 \text{ m})$$

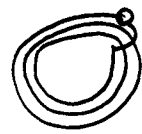
$$\Rightarrow R_R = 3,8 \cdot 10^{-9} \Omega !!$$

Per aumentare la resistenza di radiazione si utilizzano loop a più spire.

In tal caso la resistenza di radiazione aumenta di un fattore N^2 .



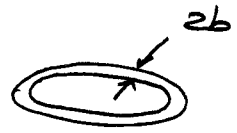
Reattanza d'ingresso



In loop piccoli ha una reattanza d'ingresso induttiva (diadunamente al dipolo elementare che è invece capacitivo)

L'induttanza equivalente ha la seguente espressione

$$L_{TOT} = L_A + L_i$$

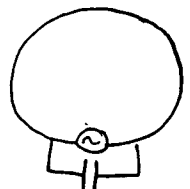


$\left. \begin{aligned} L_A &= \mu_0 \mu_r \left[\ln\left(\frac{8a}{b}\right) - 2 \right] \\ L_i &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \end{aligned} \right\} \text{1 SPIRE}$

induttanza esterna
legato flusso magnetico concatenato all'esterno del conduttore

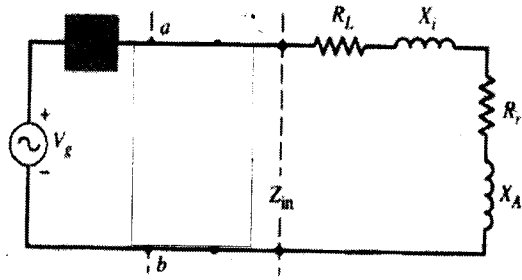
induttanza interna
tiene conto del flusso magnetico concatenato all'interno del conduttore

Per fare risuonare un loop bisogna connettere in parallelo all'elemento una capacità



Small circular loop: circuito equivalente

Un loop piccolo è generalmente induttivo. Per lavorare in condizioni di risonanza è spesso caricato con una capacità



R_r : resistenza di radiazione

R_L : resistenza ohmica

$X_A = \omega L_A$: reattanza induttiva esterna dell'antenna

$X_i = \omega L_i$: reattanza induttiva del conduttore

$$Z_{in} = (R_r + R_L) + j(X_A + X_L)$$

$$Y_{in} = G_{in} + jB_{in}$$

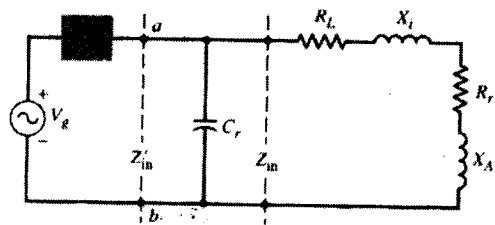
$$L_A = \begin{cases} \mu_0 a [\ln(\frac{8a}{b}) - 2] & \text{- loop circolare di raggio } a, \text{ conduttore di raggio } b \\ 2\mu_0 \frac{a}{\pi} [\ln(\frac{a}{b}) - 0.774] & \text{- loop quadrato di lato } a, \text{ conduttore di raggio } b \end{cases}$$

$$L_i = \frac{a}{\omega b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}}$$

Gaetano Marrocco

Small circular loop: circuito equivalente

Per far risuonare l'antenna alla pulsazione ω , il capacitore C_r va scelto in modo da eliminare la parte immaginaria dell'ammettenza d'ingresso



$$Z_{in} = (R_r + R_L) + j(X_A + X_L)$$

$$Y_{in} = G_{in} + jB_{in}$$

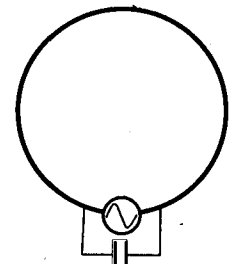
$$Z'_{in} = \frac{R_{in} - jX_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2}$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi f} \frac{X_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2}$$

$$j\omega C_r = -j \frac{X_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2}$$

In tal caso l'impedenza d'ingresso diventa:

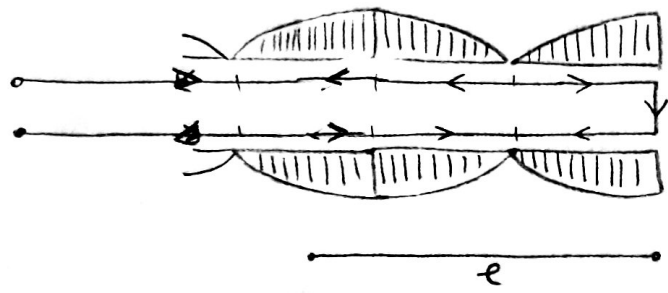
$$Z'_{in} = R_{in} + \frac{X_{in}^2}{R_{in}}$$



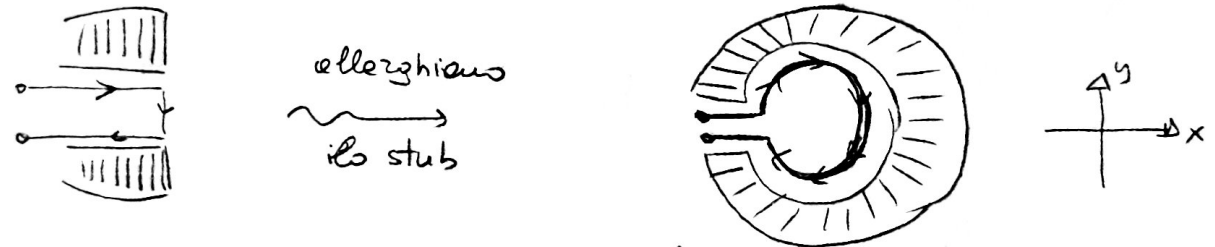
Gaetano Marrocco

CORRENTI E PATTERN AL VARIARE DELLE DIMENSIONI

Le correnti di un loop possono essere dedotte da quelle di una linea di trasmissione chiusa in corto

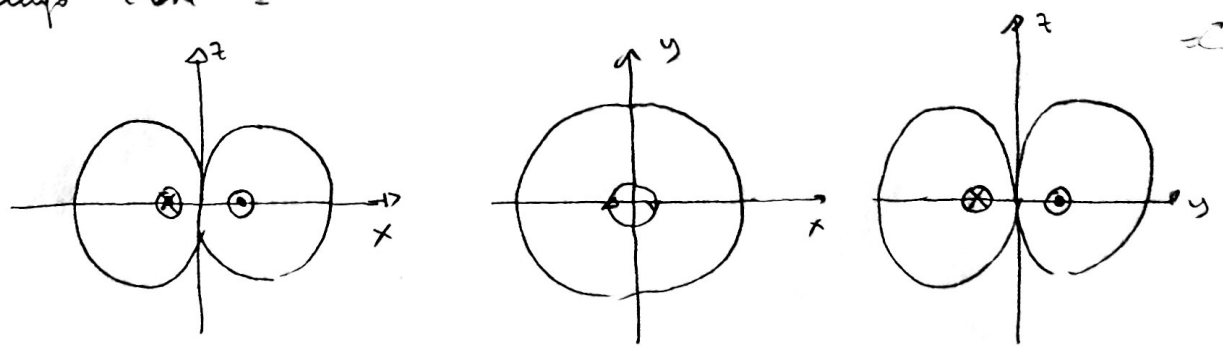


1) loop infinitesimo $ka \ll 1 \Rightarrow l \ll \lambda$



Le correnti sul loop \hat{e} quasi uniforme. E come ora due dipoli euri allacciati che in media in opposizione di fase con lo stesso esprime di corrente.

Ci sar \hat{e} quindi una interferenza distruttiva lungo l'asse \hat{z}



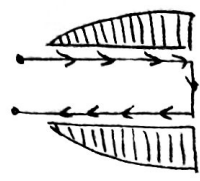
ciambello come il dipolo elementare

loop e mezza onda

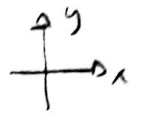
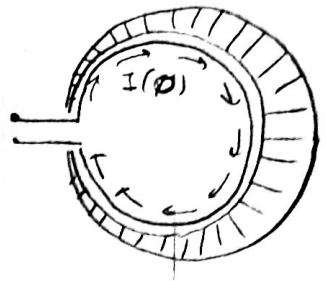
$$C = 2\pi r = \frac{\lambda}{2}$$

$$l = \frac{C}{2} = \frac{\lambda}{4}$$

$$2) \quad k_0 r_0 = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad l = \frac{\lambda}{4}$$



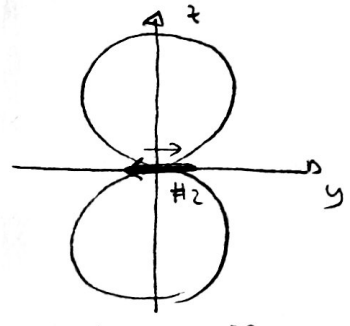
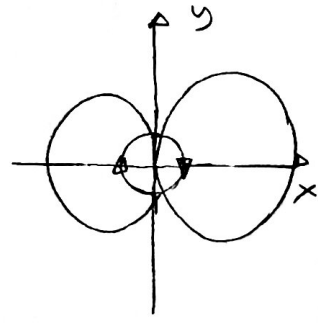
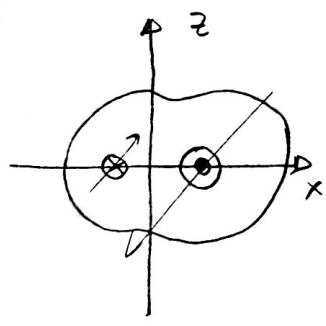
$$l = \frac{\lambda}{2}$$



La corrente sul loop queste volte subisce ^{semi-}oscillazioni complete ma non cambia mai di segno.

Nel punto di alimentazione la corrente è molto bassa e di conseguenza la resistenza d'ingresso è molto alta. Si ha una risonanza parallela (anti risonanza)

Il loop è equivalente a due dipoli circolari accoppiati, orientati lungo \hat{y} che interferiscono in opposizione di fase ma con ampiezze molto differenti. Non c'è quindi una cancellazione del campo lungo l'asse del dipolo.

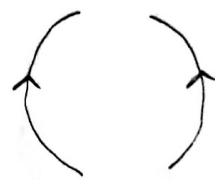


domina il dipolo circolare #2

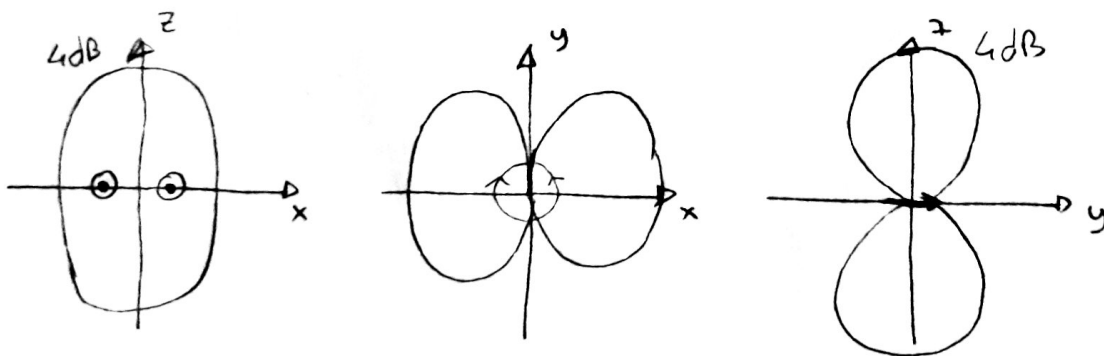
3) Loop ad onda intera $l = \frac{\lambda}{2}$ $k_{gr} = 1$



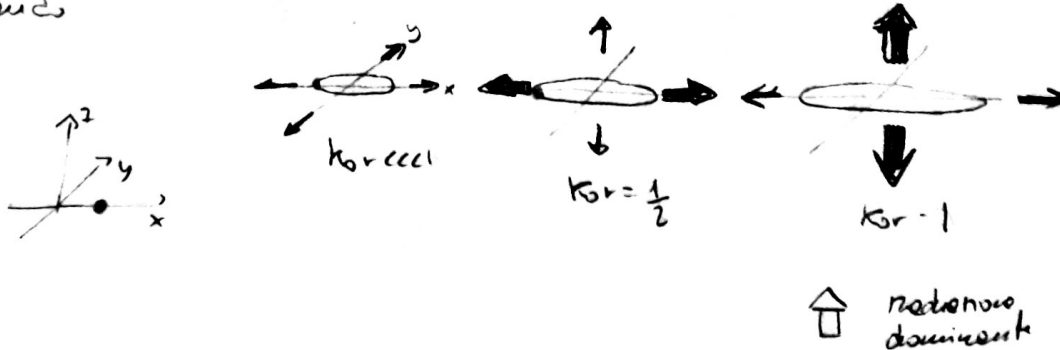
Le corrente nel loop subisce una oscillazione completa e quindi la fase viene di 2π per cui i versi di percorrenza si invertono. La struttura è equivalente a due dipoli curvilinei con corrente sempre solidali che ora interferiscono in fase producendo una interferenza costruttiva lungo l'asse del loop.



Le corrente di alimentazione è massima e quindi l'impedenza d'ingresso non è elevata. Si ha una risuonanza serie (risuonante)



Riepilogo



Large Loops

Con l'aumentare delle dimensioni della circonferenza del loop, la corrente sul conduttore non può più essere considerata costante.

Un'andamento plausibile è quello cosinusoidale che comunque non tiene conto degli effetti nel punto di alimentazione.

Una rappresentazione più accurata è data in forma di serie di Fourier

$$I(\phi') = I_0 + 2 \sum_{n=1}^M I_n \cos(n\phi')$$

$ka = C/\lambda$ – perimetro "elettrico"

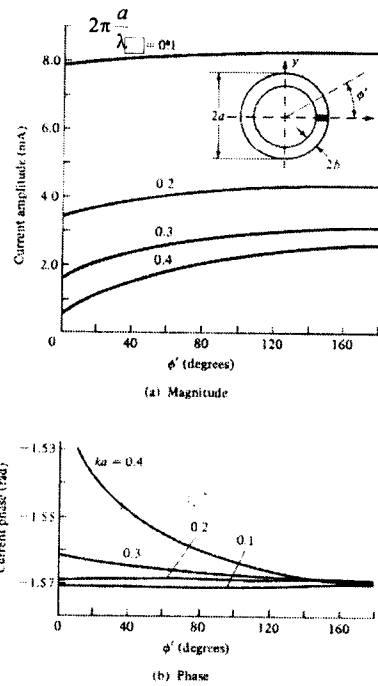
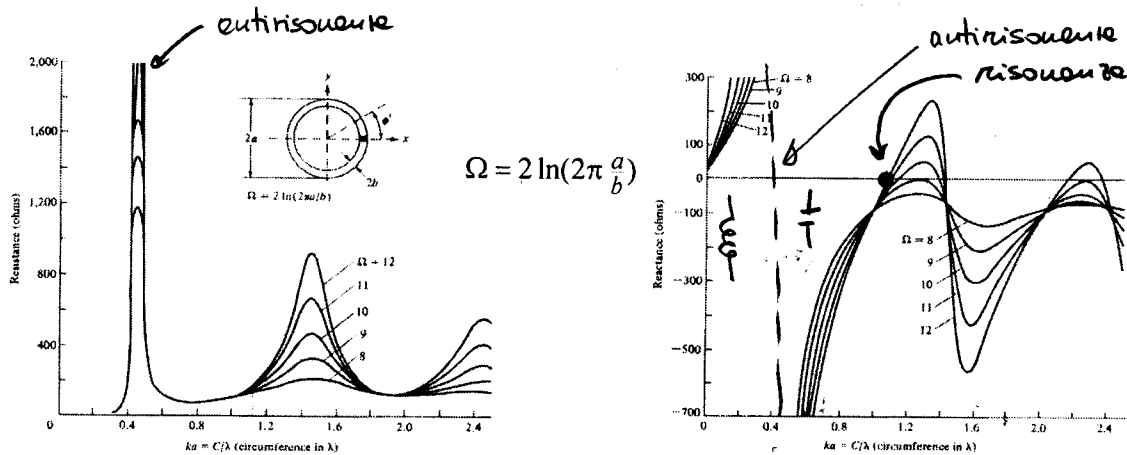


Figure 5.9 Current magnitude and phase distributions on small circular loop antennas. (SOURCE: J. E. Storer, "Impedance of Thin-Wire Loop Antennas," *AIEE Trans.*, Vol. 75, November 1956. © 1956 IEEE)

per $C > 0.2\lambda$ la corrente non può piu' essere considerata costante

Gaetano Marrocco

Large loop - impedenza d'ingresso



C. Balanis, "Antenna Theory", John Wiley and Son, 1997 Canada

- si ha una prima risonanza per $C \approx \lambda$ (perchè non a $\lambda/2$?)
- loop piccoli sono induttivi (mentre i dipoli elettrici piccoli sono capacitivi)
- il diametro del conduttore ha influenza sulla resistenza d'ingresso in prossimità delle frequenze di risonanza
- se il diametro b è tale per cui $\Omega < 9$, possono sparire alcune risonanze

Gaetano Marrocco

Large loop - direttività

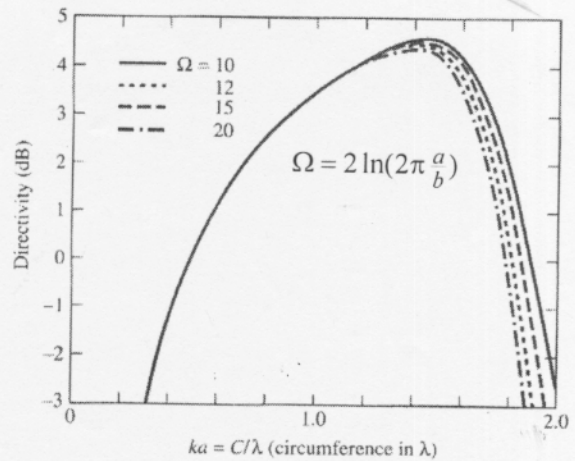
direttività lungo $\theta=0^\circ$

Per circonferenze piccole il massimo del pattern di radiazione giace sul piano del loop ($\theta=90^\circ$) mentre si sposta lungo l'asse ($\theta=0^\circ, 180^\circ$) quando la circonferenza si avvicina ad una lunghezza d'onda (perchè?)

La direttività dipende dalla sezione del conduttore solo per grandi circonferenze

se b diminuisce

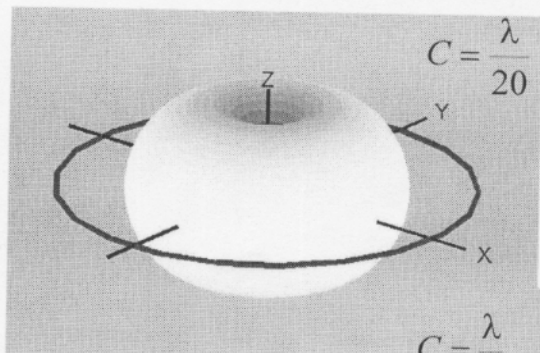
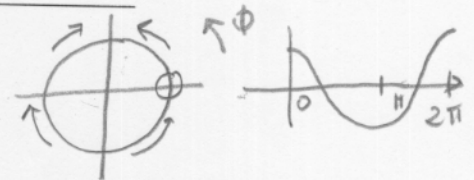
- Ω aumenta
- R_{in} aumenta
- la risonanza è più netta (alto Q, banda più stretta)
- D_θ diminuisce



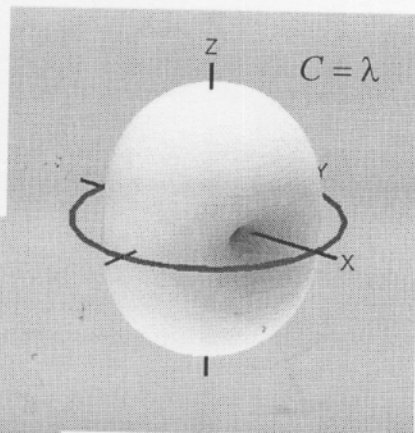
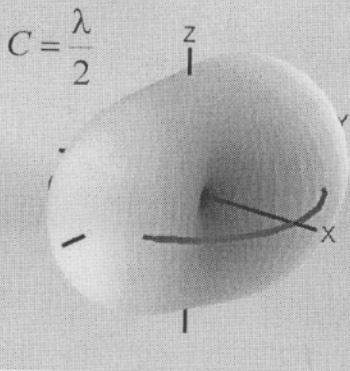
C. Balanis, "Antenna Theory", John Wiley and Son, 1997 Canada

Gaetano Marrocco

Pattern v.s. perimetro



$C=1m$
 $b=1mm$
 $\Delta=5cm$



Gaetano Marrocco