

## Calcolo antenne mag-loop

Una mag-loop trasmittente (ovvero magnetic-loop o small transmitting loop) è un'antenna a spira di varie forme le cui dimensioni sono inferiori alla lunghezza d'onda alla quale deve funzionare.

Precisamente la lunghezza  $l$  del loop (della spira) trasmittente deve essere  $\frac{\lambda}{8} < l < \frac{\lambda}{4}$ , ovvero per la massima efficienza deve essere  $\frac{\lambda}{8} < l$ , mentre, per evitare l'auto-risonanza, deve essere  $l < \frac{\lambda}{4}$ . Ovviamente si possono usare dimensioni diverse tollerando uno scadimento delle prestazioni come trasmittente.

La figura in basso a sinistra è il diagramma di una mag-loop ottagonale mentre la figura a destra confronta i diagrammi 3-D di radiazione di una loop rettangolare a onda intera (uguale o più grande della lunghezza d'onda di funzionamento) e di quella ottagonale mag-loop soddisfacente alle relazioni di cui sopra. Notare la profonda differenza nel diagramma di radiazione: nell'antenna rettangolare ad onda intera la radiazione si sviluppa in direzione ortogonale al piano dell'antenna mentre nella mag-loop, più piccola della lunghezza d'onda, si sviluppa in direzione parallela al piano dell'antenna.

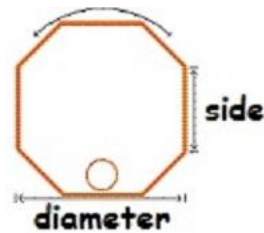


Fig.1

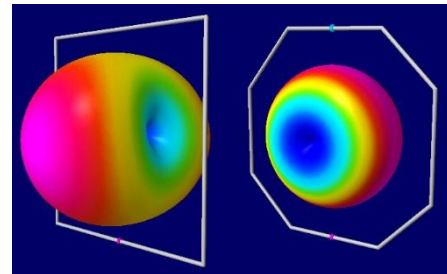


Fig.2

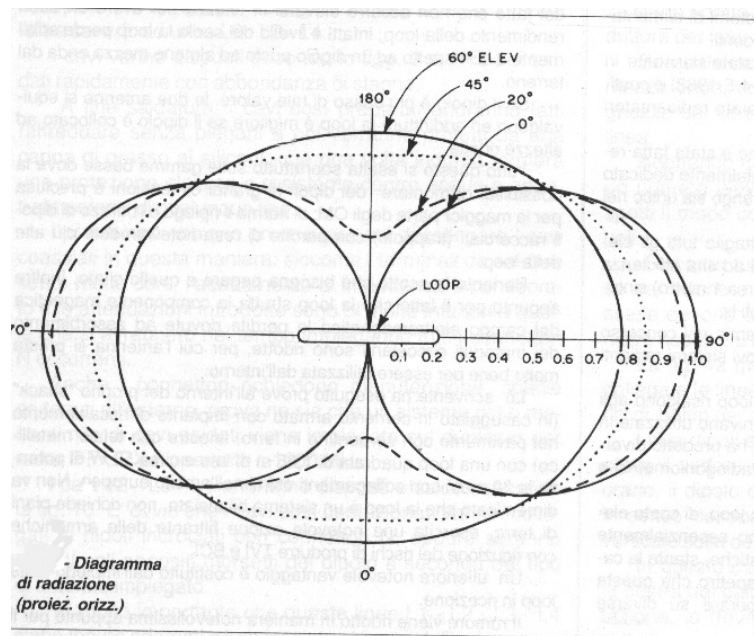


Fig.3

La figura a sinistra mostra il diagramma di radiazione in proiezione orizzontale di una mag-loop. Si nota il null-depth intorno alla perpendicolare al piano dell'antenna e la variazione del diagramma di radiazione in funzione dell'elevazione del piano di misura rispetto al piano dell'antenna. A 0° si vede chiaramente la sezione lungo il piano perpendicolare alla ciambella di radiazione visualizzata sulla destra della Fig.2. Via via che il piano si inclina il diagramma di radiazione diventa sempre più tondeggiante, raggiungendo il massimo sul piano dell'antenna a 90° di elevazione.



Nella figura accanto è mostrata la realizzazione di una mag-loop trasmittente circolare a  $\lambda = 6 \text{ metri}$  (50 MHz) da parte di KK5JY.Net

La spira più grande è costituita da un tubo di rame dello spessore di 1,6 cm (5/8") e diametro di 43,18 cm con un condensatore d'accordo di 3-30 pF posizionato al top in grado di sopportare 100 W di potenza ed è alimentata alla base da un piccolo loop (denominato controloop) interno dello spessore di 0,6cm (1/4") e diametro 1/5 del loop grande accoppiato in modo induttivo. Secondo l'autore una installazione ottimale prevede un'altezza dal suolo del top della spira di 1,5 metri ( $\lambda / 4$ ) (invece per "The ARRL Antenna Book The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas" quest'altezza va valutata al centro spira).

**Fig. 4**

Le caratteristiche ricavate dal software "aa5tb\_loop\_v1.22f.xlsx" per il loop grande sono:

**Givens:**

$\pi$ =	3.14159265359	Null constant $\pi \cdot D$
Loop Diameter <b>D</b> =	17.0040000 inches	0.4319016 m
Conductor Diameter <b>d</b> =	0.6250000 inches	0.0158750 m
Added Loss Resistance <b>RL</b> =	0.0000000 m $\Omega$	0.0000000 $\Omega$
RF Power <b>P</b> =	100.0000000 Watts	
Frequency <b>F</b> =	50.0000000 MHz	50000000 Hz
		1.3568589

**Calculations:**

Loop Circumference <b>S</b> =	<b>4.4516368 ft</b>	1.3568589 m
Loop Area <b>A</b> =	<b>1.5769923 ft<sup>2</sup></b>	0.1465074 m <sup>2</sup>
Radiation Resistance <b>RR</b> =	0.5253586 $\Omega$	<b>525.3586428 m<math>\Omega</math></b>

Loss Resistance <b>RL</b> =	0.0501631 Ω	<b>50.1630629 mΩ</b>	
Total Loss Resistance <b>RT</b> =	0.0501631 Ω	<b>50.1630629 mΩ</b>	
Efficiency <b>η</b> =	0.9128390	<b>91.2838973 %</b>	<b>-0.3960583 dB</b>
Inductance <b>L</b> =	0.0000009 H	<b>0.9137767 μH</b>	
Inductive Reactance <b>XL</b> =	<b>287.0714275 Ω</b>		
Tuning Capacitor <b>CT</b> =	0.0000000 F	<b>11.0881772 pF</b>	This is the tuning + distributed capacitance
(loaded) Quality Factor <b>Q</b> =	249.4010432		
Q(no loss) =	273.2147186		
Bandwidth <b>ΔF</b> =	200480.3162204 Hz	<b>200.4803162 kHz</b>	
Distributed Capacity <b>CD</b> =	<b>1.9262811 pF</b>		corrected/ Kai CD=8.92*radius
Capacitor Potential <b>Vc</b> =	<b>2675.7412710 V</b>		
Minimum Plate Spacing <b>Ps</b> =	0.0356766 in	<b>35.6765503 mils</b>	<b>0.9061844 mm</b>
Wavelength <b>λ</b> =	19.6713974 ft	<b>5.9958600 m</b>	
Circumference % <b>λ</b> =	<b>22.6299295 %</b>		

Il valore efficace della corrente circolante alla risonanza è  $I_L = \sqrt{\frac{PQ}{X_L}} = \sqrt{\frac{100 * 249,4}{287}} = 9,32 A$ . La potenza di picco irradiata, tenendo conto dell'efficienza, è  $P_{rad} = P_{RF} * \eta = 100 * 0.9128390 = 91,28390 W$ . Lo stesso è secondo la formula  $P_{rad} = R_{rad} * (\sqrt{2} * I_L)^2 = 0.5253586 * (\sqrt{2} * 9,32)^2 = 91,26782 W$ . Un possibile circuito equivalente del loop grande di questa antenna, sulla base dei dati forniti dal software, potrebbe essere il seguente

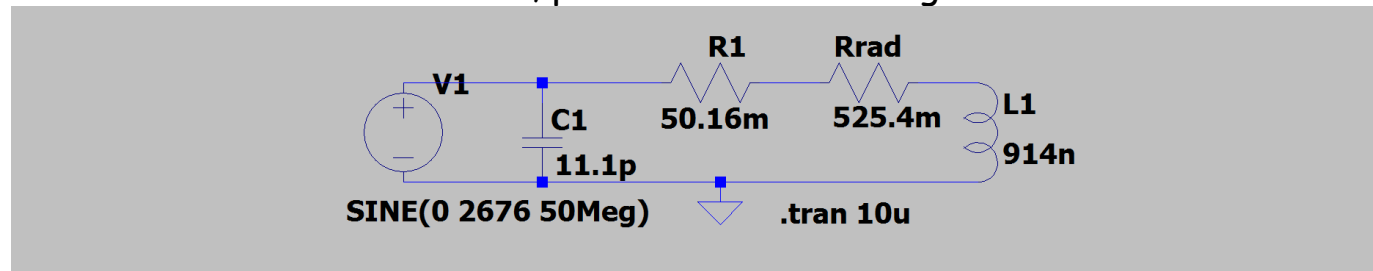


Fig.5

Il diagramma della corrente nel circuito è

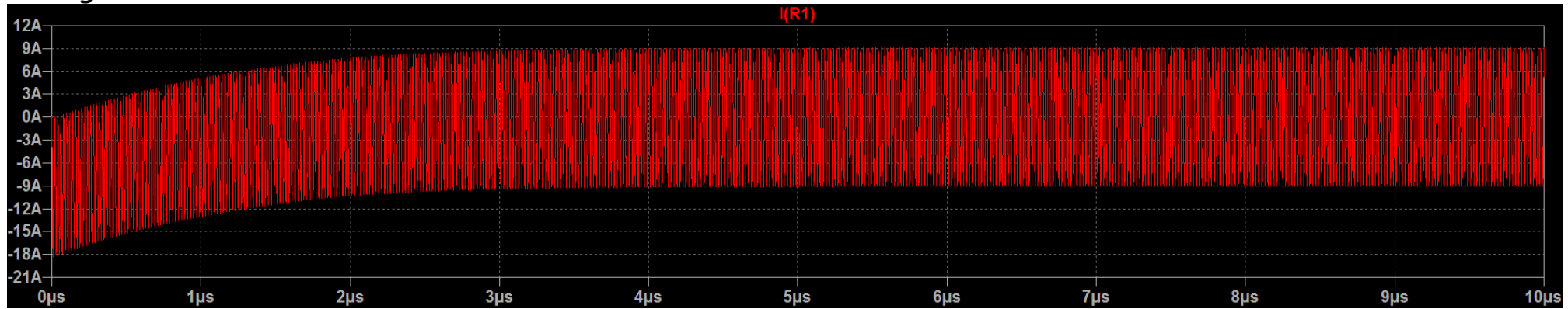


Fig.6

La corrente simulata di picco a regime è  $I=9,26A$  che però è parecchio minore di quella calcolata  $\sqrt{2} * I_L = 13,18A$  e più vicina al valore della corrente efficace calcolata. Non è chiara la ragione di ciò. Il diagramma FFT, con in evidenza l'armonica principale a 50MHz, è (Nella FFT di LTSpice selezionare: Number of data point samples in time=16777216 per la massima precisione, ed eventualmente zoomare)

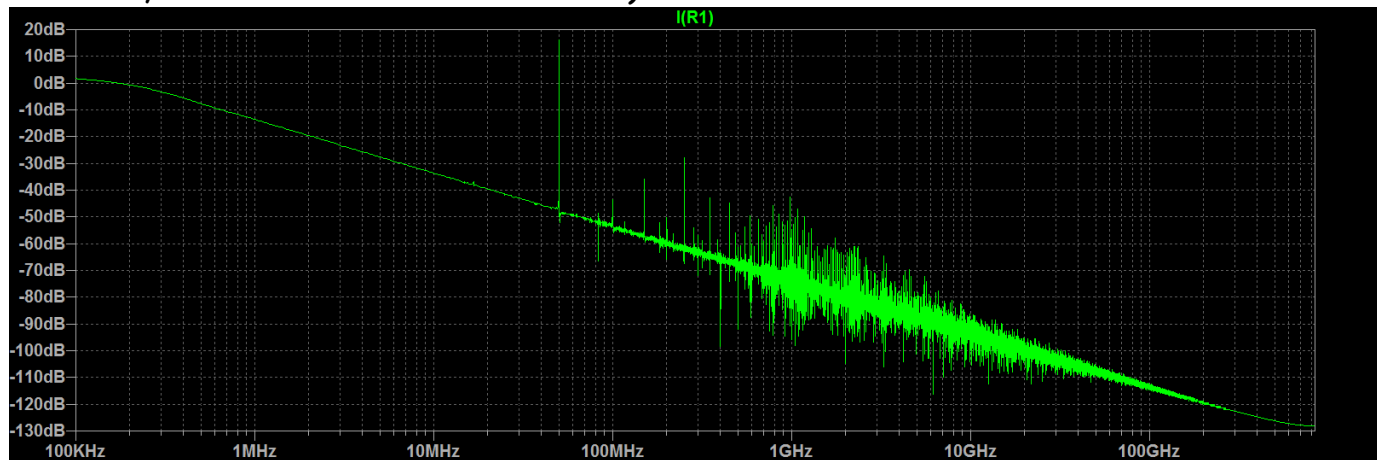


Fig.7

Si potrebbe simulare anche il loop piccolo (controlloop) di alimentazione per un circuito equivalente più completo dell'intera antenna. Bisogna capire come modellare l'accoppiamento tra loop piccolo e loop grande e modellare anche l'accoppiamento fra trasmettitore e loop piccolo.

Per la mag-loop micro da noi progettata i parametri in ingresso sono:

Forma antenna ottagonale

Perimetro antenna 6,28 cm

Diametro filo 1 mm

Frequenza di funzionamento 1 GHz (lunghezza d'onda 30 cm)

Potenza RF  $10^{-5} W$

I risultati ottenuti dal software online <http://www.66pacific.com/calculators/small-transmitting-loop-antenna-calculator.aspx> sono:

*Antenna efficiency: 68% (-1.7 dB below 100%)*

*Antenna bandwidth: 3840 kHz*

*Tuning Capacitance: 1 pF*

*Capacitor voltage: 0,834 volt RMS*

*Resonant circulating current: 0,003 A*

*Radiation resistance: 0,347 ohm*

*Loss Resistance: 0,165 ohm*

*Inductance: 42,4 nanohenry*

*Inductive Reactance: 267 ohm*

Quality Factor (Q): 261  
 Distributed capacity: 0 pF

Per confronto usando il software "aa5tb\_loop\_v1.22f.xlsx" si ha

**Givens:**

$\pi$ =	3.14159265359	Null constant $\pi \cdot D$	
Loop Diameter <b>D</b> =	0.7662572 inches	0.0194629 m	0.0611446
Conductor Diameter <b>d</b> =	0.0394000 inches	0.0010008 m	
Added Loss Resistance <b>RL</b> =	0.0000000 m $\Omega$	0.0000000 $\Omega$	
RF Power <b>P</b> =	0.0000100 Watts		
Frequency <b>F</b> =	1000.0000000 MHz	1000000000 Hz	

**Calculations:**

Loop Circumference <b>S</b> =	<b>0.2006057 ft</b>	0.0611446 m	
Loop Area <b>A</b> =	<b>0.0032024 ft<sup>2</sup></b>	0.0002975 m <sup>2</sup>	
Radiation Resistance <b>RR</b> =	0.3466329 $\Omega$	<b>346.6329496 m<math>\Omega</math></b>	
Loss Resistance <b>RL</b> =	0.1603638 $\Omega$	<b>160.3637983 m<math>\Omega</math></b>	
Total Loss Resistance <b>RT</b> =	0.1603638 $\Omega$	<b>160.3637983 m<math>\Omega</math></b>	
Efficiency $\eta$ =	0.6836986	<b>68.3698566 %</b>	<b>-1.6513533 dB</b>
Inductance <b>L</b> =	0.0000000 H	<b>0.0370919 <math>\mu</math>H</b>	
Inductive Reactance <b>XL</b> =	<b>233.0549906 <math>\Omega</math></b>		
Tuning Capacitor <b>CT</b> =	0.0000000 F	<b>0.6829073 pF</b>	This is the tuning + distributed capacitance
(loaded) Quality Factor <b>Q</b> =	229.8387431		
Q(no loss) =	336.1697018		
Bandwidth $\Delta F$ =	4350876.5601550 Hz	<b>4350.8765602 kHz</b>	
Distributed Capacity <b>CD</b> =	<b>0.0868047 pF</b>		corrected/ Kai CD=8.92*radius
Capacitor Potential <b>Vc</b> =	<b>0.7318816 V</b>		
Minimum Plate Spacing <b>Ps</b> =	0.0000098 in	<b>0.0097584 mils</b>	<b>0.0002479 mm</b>
Wavelength $\lambda$ =	0.9835699 ft	<b>0.2997930 m</b>	
Circumference % $\lambda$ =	<b>20.3956097 %</b>		

La corrente efficace circolante alla risonanza è  $I_L = \sqrt{\frac{PQ}{X_L}} = \sqrt{\frac{100 * 230}{233}} = 3,14 mA$ .

Valori un po' diversi rispetto al software online almeno parzialmente giustificabili con il fatto che le due forme sono differenti: il software online calcola un'antenna ottagonale mentre il file .xlsx prevede un'antenna circolare. Nel tentativo di compensare questa differenza si è assunto come diametro, nel file .xlsx,  $D = 1,946 cm$  ovvero quello di un cerchio di area equivalente a quella dell'ottagono con perimetro  $P=6,28cm$  (e non quello del cerchio inscritto come previsto dal software online: il cerchio adottato ha un diametro intermedio tra quello del cerchio inscritto e circoscritto all'ottagono).

### Commenti:

Con  $D = 1,946 cm$ , il diametro di un cerchio di area equivalente a quella dell'ottagono con perimetro  $P=6,28cm$ ,  $\nu_{max} = 10^9 Hz$  ( $\lambda = 30 cm$ ) e  $c = 3 * 10^8 m$  si ha  $\frac{2D\nu_{max}}{c} = 0,13 \ll 1$  per cui la condizione per l'uso di parametri concentrati

è soddisfatta. Anche se per  $D$  dovessimo usare il perimetro dell'ottagono comunque sarebbe  $\frac{2D\nu_{max}}{c} = 0,42 < 1$

In ogni caso le dimensioni imposte all'antenna progettata sono giuste per la frequenza di funzionamento come previsto dalle specifiche di cui sopra. L'unico parametro non ottimale è il diametro del conduttore che dovrebbe essere  $d \geq 1cm$  e non  $d = 1mm$  com'è. In questo caso però non è possibile soddisfare questa richiesta.

Il circuito equivalente a parametri concentrati per questa antenna, usando i dati del software online, potrebbe essere il seguente



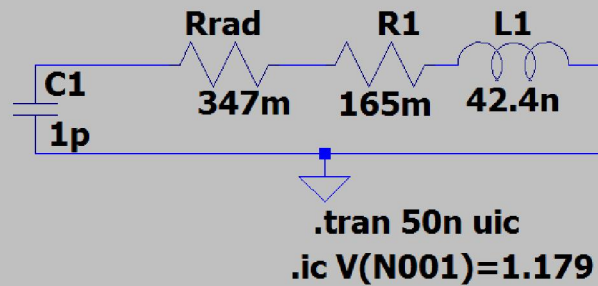


Fig.8

la cui risposta è

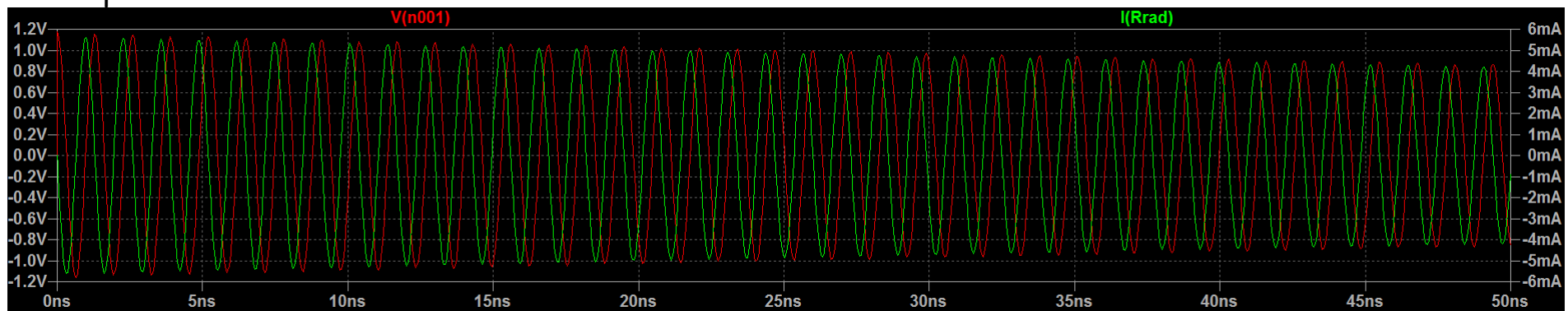


Fig.9

con frequenza di risonanza a 770 MHz e non a 1 GHz. Ma questa differenza si può spiegare in quanto il condensatore  $C_1$  adottato nello schema è di 1pF, come dato dal software online, mentre il calcolo con il file .xlsx dava  $C_1 = 0,6829073 pF$  che ingloba anche la capacità distribuita. Comunque è previsto che  $C_1$  sia accordabile.

Diagramma FFT nel quale si evidenzia l'armonica principale a 770MHz

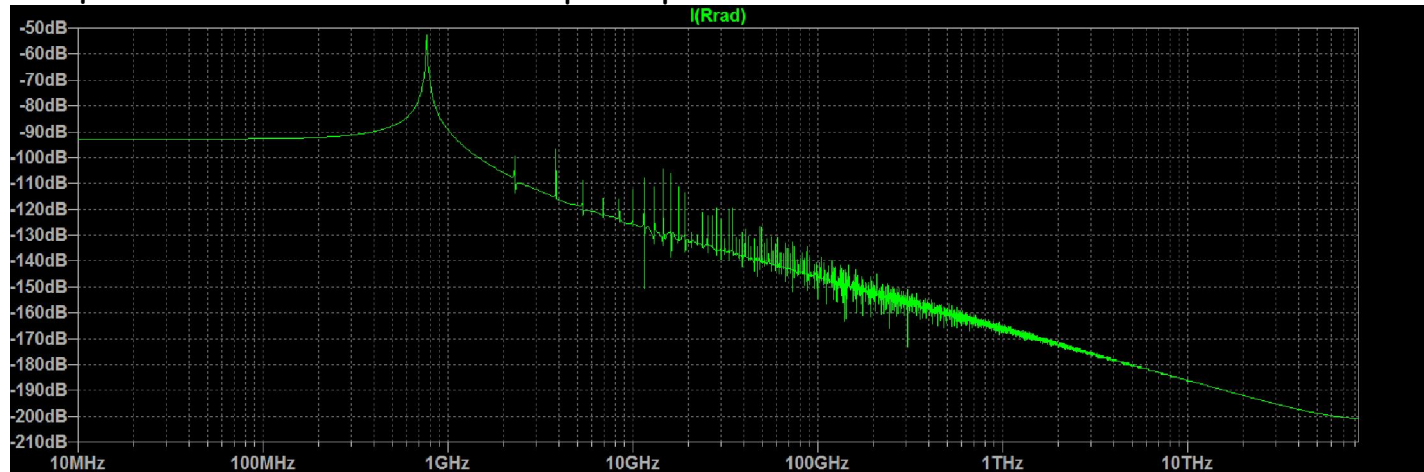


Fig. 10

Nella simulazione di cui sopra, trattandosi di un circuito non alimentato, si ottiene solo un transitorio di scarica del condensatore.

Per un circuito alimentato come il seguente

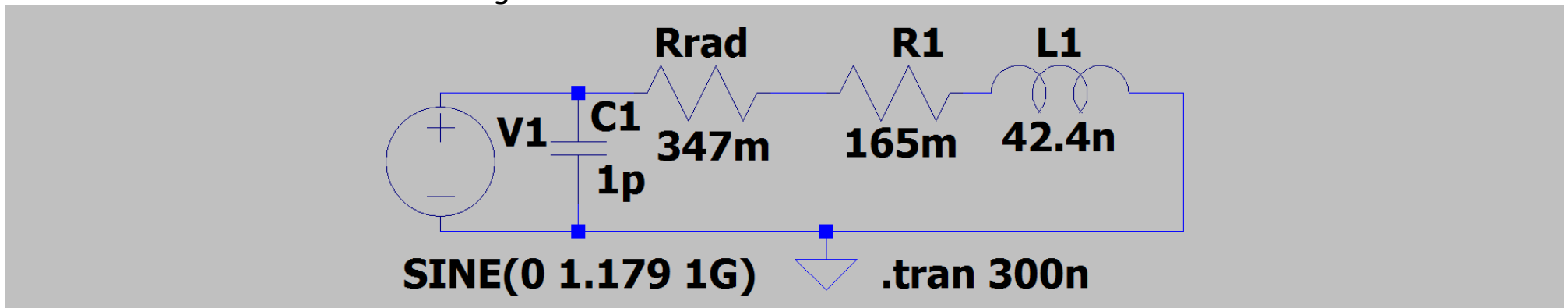


Fig. 11

la risposta alla forzante sinusoidale di 1GHz è ovviamente

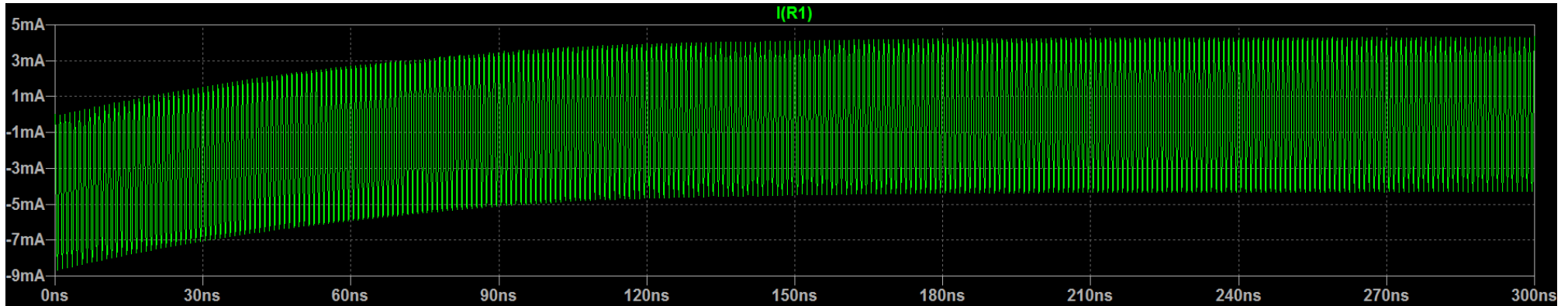


Fig. 12

in cui si può notare che, in questo caso, la corrente di picco  $I=4,36mA$ , è praticamente uguale a quella calcolata  $\sqrt{2} * I_L = \sqrt{2} * 3,14mA = 4,44mA$ . La frequenza di risonanza è, naturalmente, 1GHz

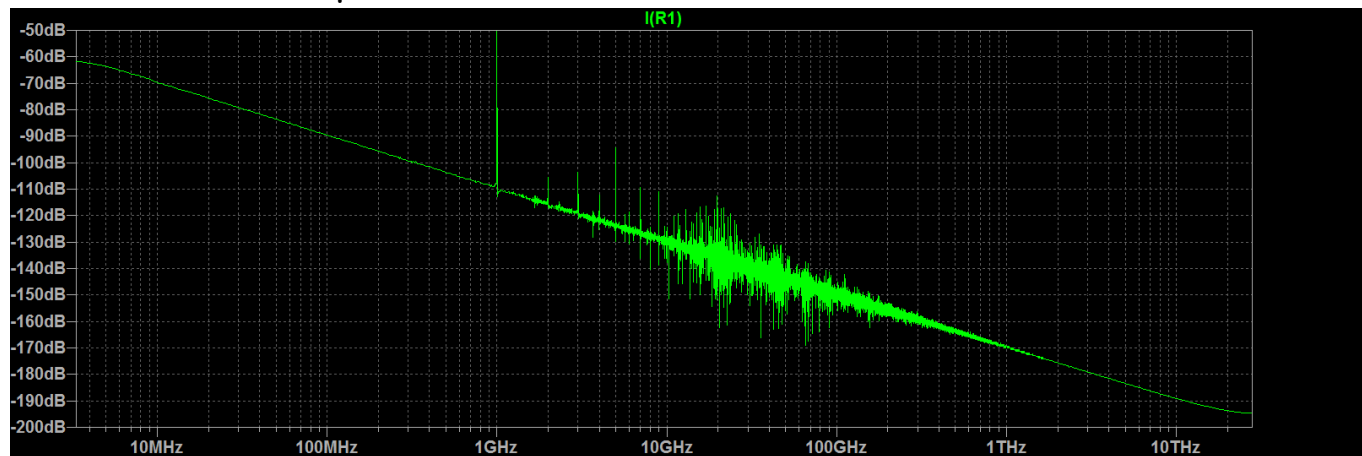


Fig. 13

La potenza di picco irradiata dovrebbe essere  $P_{rad} = P_{RF} * \eta = 0,68 * 10^{-5} W$ . In base ai dati dei software, con  $I = \sqrt{2} * I_L = \sqrt{2} * 3,14mA = 4,44mA$ , e della formula  $P_{rad} = R_{rad} * I^2$ , si ha lo stesso valore  $P_{rad} = 0,347 * 4,44^2 * 10^{-6} = 0,684 * 10^{-5} W$ .

Calcolo antenne "mag-loop" trasmettenti sulla base delle equazioni fornite in ch.5.11 del "The ARRL Antenna Book -The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, 21st Edition, 2007" e del software "aa5tb\_loop\_v1.22f.xlsx"

Da chiarire per circuito equivalente: The transmitting loop is a parallel-tuned circuit with a large inductor acting as the radiator (vedi nota in basso per  $V_C$  e  $I_L$ )

Radiation Resistance, Ohms:  $R_r = 3,12 * 10^4 \left( \frac{NA}{\lambda^2} \right)^2$  [un articolo dà un'altra forma  $R_r = 391,6 * 10^{-8} (f_{MHz}^2 * N * A_{m^2})^2$  che produce risultati molto vicini]

Loss Resistance, Ohms:  $R_L = \frac{0,83 * 10^{-6} \sqrt{f_{Hz}}}{d_{mm}}$ ,  $R_L = \text{ohm/cm}$ , assumes bulk copper  $58 * 10^6$  mho/m conductivity

[un articolo dà un'altra forma  $R_L = \frac{90,91 * 10^{-4} * f_{MHz} * l_m}{d_{mm}}$  per l'intera lunghezza dell'antenna che produce valori compatibili solo entro una certa banda di frequenze  $60MHz < f_{MHz} < 100MHz$  : in particolare le formule coincidono per  $f_{MHz} = 83,3569$ . All'esterno dell'intervallo su riportato i risultati cominciano a divergere troppo]

Efficiency (radiation coefficient):  $\eta = \frac{R_r}{R_r + R_L}$

Inductance per spira (coil) circolare (da Wiki)  $L_H = \mu_0 \frac{D_m}{2} \left[ \ln \left( \frac{4D}{\frac{d_m}{2}} \right) - 2 \right]$  con  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H / m$

Inductance per loop (coil) ottagonale:  $L(\mu H) = 0,016N^2 \left[ \ln \left( \frac{2,613 * s * N}{(N+1)l} \right) + 0,75143 + \frac{0,07153(N+1)l}{sN} \right]$

Inductive Reactance, Ohms:  $X_L = 2\pi f L$  con  $L$  in Henry

Tuning Capacitance, Farads:  $C_T = \frac{1}{2\pi f X_L}$   $X_L = X_{C_T} = \frac{1}{2\pi f C_T}$  This includes the distributed capacitance

Quality Factor:  $Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{X_L}{2(R_r + R_L)}$

Bandwidth, Hertz:  $\Delta f = \frac{f}{Q}$

**(NOTA)** Distributed Capacity: pF:  $C_D = 8,92 * \frac{D_m}{2} = 0,0446 * D_{cm}$  Formula da fonte pagina seguente perché in ARRL, 2007 è poco chiara e comunque fornisce valori eccessivamente grandi

Capacitor Potential, Volts:  $V_C = \sqrt{P X_L Q}$  This is the RMS value [specifica dal software "aa5tb\_loop\_v1.22f.xlsx"]

Resonant circulating current in loop, A:  $I_L = \sqrt{\frac{PQ}{X_L}}$  [Dalla definizione di Q e  $V_C$  anche questo dovrebbe essere

un valore RMS] (Le due eq. per  $V_C$  e  $I_L$  insieme implicano che capacitore e induttore nel loop siano visti come in

parallelo in quanto è  $\frac{V_C}{I_L} = X_L$ )

Capacitor Voltage Rating: circa 3000V/mm

Null Depth =  $-20 * \log_{10}(2\pi D)$

N = number of turns

A = area of loop, in  $m^2$

$\lambda$  = wavelength in m

f = operating frequency, Hz

d = conductor diameter, **mm** (se non è specificata altra unità)

s = side length in cm

l = coil length of antenna in cm: for single-turn coils  $N=1$  si ha  $l=d$  in **cm**

D = loop diameter, meters

P = RF power, Watts

**Small Loop Equations for a Copper Loop**  
*(circular loop assumed, results may vary with other shapes)*

Radiation Resistance, Ohms:  $RR = (3.38 \times 10^{-8})(f^2 A)^2$

Loss Resistance, Ohms:  $RL = (9.96 \times 10^{-4})(\sqrt{f})(S/d)$

Efficiency:  $\eta = RR/(RR+RL)$

Inductance, Henrys:  $L = (1.9 \times 10^{-8})S[7.353 \log_{10}(96S/\pi d) - 6.386]$

Inductive Reactance, Ohms:  $XL = 2\pi f(L \times 10^6)$

Tuning Capacitance, Farads:  $CT = 1/2\pi f(XL \times 10^6)$

Quality Factor:  $Q = (f \times 10^6)/\Delta f = XL/2(RR + RL)$

Bandwidth, Hertz:  $\Delta f = (f \times 10^6)/Q = [(f1 - f2) \times 10^6]$

Distributed Capacity, pF:  $CD = 8.92 * \text{radius}$

Capacitor Potential, Volts:  $VC = \sqrt{(PXLQ)}$

Capacitor Voltage Rating: 75,000V/in

Null Depth =  $-20 \log_{10}(2 * \pi * D)$

where

f = operating frequency, MHz

A = area of loop, square feet

S = conductor length, feet

d = conductor diameter, inches

$\eta$  = decimal value; dB =  $10 \log_{10} \eta$

P = transmitter power, Watts

D = loop diameter, meters

*assumes bulk copper  $58 \times 10^6$  mho/m conductivity*

*This includes the distributed capacitance*

*see Notes 6-7*

*This is the RMS value*

Ref. **The American Radio Relay League, The ARRL Antenna Handbook, Small High Efficiency Loop Antennas for Transmitting, Publication No. 15, p. 5-14, Table 4, 1988**

6. The original distributed capacitance was an over-estimate based on Ted Hart's equation.

7. Corrected self capacitance based on self-resonance in Storer/Siwiaik papers.  $C=8.92 \text{ b[meters] pF}$

## COMMENTI

Il fattore di merito  $Q = \frac{f}{\Delta f}$  di un circuito oscillante è normalmente definito, in termini di impedenza

complessa, come  $Q = \left| \frac{X}{R} \right|$  ovvero il modulo del rapporto tra reattanza e resistenza, tra potenza reattiva e

potenza attiva. Secondo le formule riportate nel cap. ch.5.11 del "The ARRL Antenna Book -The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, 21st Edition, 2007" e del software "aa5tb\_loop\_v1.22f.xlsx" il

fattore di merito vale  $Q = \frac{X_L}{2(R_r + R_L)}$  ovvero la metà della definizione di cui sopra. Ciò implica che  $V_C = \sqrt{P X_L Q}$

e  $I_L = \sqrt{\frac{P Q}{X_L}}$  siano valori efficaci (RMS). Infatti  $(\sqrt{2})^2 * V_C^2 = \frac{P X_L^2}{(R_r + R_L)}$  e  $(\sqrt{2})^2 I_L^2 = \frac{P}{R_r + R_L}$ . In queste espressioni

si riconosce che  $V_C$  e  $I_L$  sono valori efficaci. È anche  $\frac{V_C}{I_L} = X_L$ . Inoltre da  $(\sqrt{2})^2 I_L^2 * (R_r + R_L) = P$  si riconosce

che  $P$ , potenza RF circolante, è un valore di picco.