

Alimentación Inalámbrica de un Móvil con Arreglo de Bobinas Resonantes

Héctor Trujillo y Jorge L. González
 Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME)
 P.O.Box 8016, Ciudad Habana, Cuba
 hector.trujillo@electrica.cujae.edu.cu

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al aplicar un conjunto de repetidores inductivos resonantes para la alimentación inalámbrica de un móvil que se desplace según la trayectoria definida por tales resonadores. Se realiza el cálculo de la inductancia mutua entre las bobinas circulares de los resonadores mediante integración numérica con Matlab. Los resultados obtenidos se comparan con otros publicados en la literatura calculados usando otros métodos lo que valida los resultados obtenidos. Se realiza un montaje experimental con tres bobinas y una cuarta adosada al móvil y se determina mediante simulación con PSPICE y experimentalmente los voltajes en la carga situada en el móvil. Se encuentra que la forma de las curvas del voltaje en la carga contra distancia son similares, si bien hay diferencias significativas entre sus valores atribuibles a la complejidad de la respuesta de estos sistemas. El método propuesto es factible de implementar y facilita la alimentación de móviles al realizar la misma de manera inalámbrica

Keywords: resonadores, repetidores de potencia, alimentación inalámbrica, móvil, robot

Introducción

Se ha reportado [1], el empleo de un conjunto de bobinas dispuestas a lo largo de una "pista" para la alimentación inalámbrica de un móvil (un robot por ejemplo) que se desplace a lo largo de tal pista. Se selecciona mediante conmutación la bobina con mayor acoplamiento o cercana al móvil. Se emplean diferentes métodos para calcular la inductancia propia y la mutua como reporta Conway [3]. En este trabajo se aplica un conjunto de resonadores inductivos acoplados usados como repetidores de potencia [5,6], para la alimentación inalámbrica de un móvil que se desplace según la disposición geométrica del arreglo de resonadores. Se presenta el cálculo de la inductancia mutua entre dos bobinas circulares con un ángulo α cualquiera respecto al eje de la Y entre las dos bobinas. Esta versión puede ser ventajosa sobre la reportada en [1] ya que no se requiere alimentar todas las bobinas ni conmutar de unas bobinas a otras.

Arreglo de las Bobinas.

La bobina 2 está inclinada un ángulo α alrededor del eje Y como se muestra esquemáticamente en la figura 1.

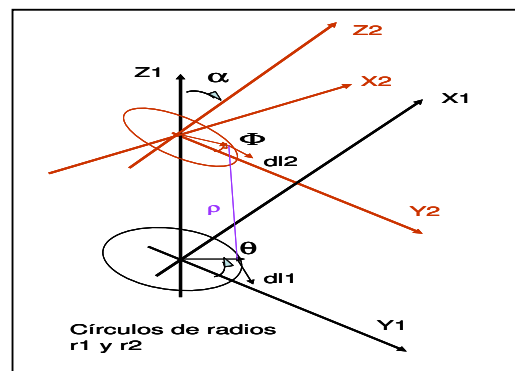


Figura 1. Bobinas separadas a una distancia Z_0 , inclinadas un ángulo α alrededor del eje Y

Para calcular la inductancia mutua entre las dos bobinas se parte de la expresión general:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{C_1} \iint_{C_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{\rho} \quad (1)$$

Usando las ecuaciones paramétricas para las dos bobinas, esto es, para la bobina 1:

$$x = r \cos \theta \quad y = r \sin \theta \quad Z_{01} = 0 \quad (2)$$

Y para la bobina 2:

$$x_2 = x_0 + \cos \alpha \sqrt{r^2 - y_2^2} \quad (3a)$$

$$z_2 = z_{02} + \sin \alpha \sqrt{r^2 - y_2^2} \quad (3b)$$

$$y_2 = y = r \sin \varphi \quad (3c)$$

El valor de ρ se puede expresar como:

$$\rho = \sqrt{[Z_{02} + r \sin \alpha \cos \varphi]^2 + [X_0 + r \cos \alpha \cos \varphi - r \cos \theta]^2 + [r \sin \varphi - r \sin \theta]^2} \quad (4)$$

Y para el producto escalar $\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2$ queda:

$$\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2 = r^2 (\sin \theta \cos \alpha \sin \varphi + \cos \theta \cos \varphi) d\theta d\varphi \quad (5)$$

Sustituyendo (4) y (5) en (1) se obtiene la expresión para calcular la inductancia mutua, M, la cual se realiza numéricamente usando Matlab.

Validación de Casos Particulares

Bobinas Circulares Coaxiales

Se emplean los datos constructivos de un juego de dos bobinas de alambre. Los resultados del cálculo de la inductancia mutua (M) entre las mismas a distintas distancias, se resumen en la tabla 1 mediante los métodos: analítico (en función de las integrales elípticas) y el numérico aquí reportado.

El cálculo usando las integrales elípticas se realiza empleando las expresiones:

$$M_{1,2} = N_1 N_2 \mu_0 \sqrt{r_1 r_2} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (6)$$

En esta ecuación, K y E son las integrales elípticas completas, dadas como:

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} \quad (7)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

Que se relacionan con (6) como:

$$k^2 = m = 4r_1 r_2 / (Z_0^2 + (r_1 + r_2)^2) \quad (8)$$

Esta "k" no debe confundirse con la "k" del acoplamiento entre las bobinas, para evitarlo se denominó a la "k" de acoplamiento k_{ac} .

Tabla 1. Valores comparativos de M (μ H)
Cálculos analíticos y numéricos.
 $N_1 N_2 = 80$, $R_1 = R_2 = 5,5$ cm

Zo/r	M _{1,2} Elípt	M _{1,2} Num
0,25	8,003	8,3066
0,5	4,896	4,8955
1,0	2,174	2,1739

Bobinas Coplanares.

En la tabla 2 se presentan los valores calculados de M usando (1) y los valores reportados en la tabla II de Conway [3]. Se consideran bobinas coplanares de 1m y 0,5 m de radio; separadas a 1,75m sus ejes y para valores de Zo que se indican en la tabla. Se observa la buena concordancia entre los valores reportados y los calculados en este trabajo.

Tabla 2. Resultados comparativos de M(μ H).

Zo(m)	Conway	Este trabajo
0	-0,09106	-0,0911
0,25	-0,064086	-0,0641
0,5	-0,029082	-0,0291

Giradas y Coincidentes en el Vértice

Las bobinas ya no son coaxiales, se calcula el corrimiento en Z y en X para que los vértices de los ángulos de las bobinas coincidan.

Experimentalmente (figura 3), se pegaron las bobinas a unos soportes de madera y se hicieron unos surcos en la base para restringir los desplazamientos en las posiciones de medición.

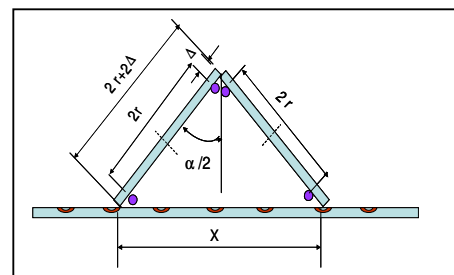


Figura 3. Bobinas giradas y coincidentes

El ángulo α se calcula como:

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \left[\frac{X}{4r + 4\Delta} \right] \quad (9)$$

Para los cálculos teóricos de M en función del ángulo se usó el siguiente Mfile:

`function ZETA5=ZETA5(ang,N,delti,shift)`

```

shift=shift/5.5
for i=1:N
ang=ang+delti
ALF=ang*3.1416/180
X0=-(1+shift)*(1-cos(ALF))
Z0=(1+shift)*sin(ALF)
ZETA5=@(fi,cit)(0.001*80*5.5*(sin(cit)*...
sin(fi)*cos(ALF)+cos(cit)*cos(fi))./...
sqrt((Z0+sin(ALF)*cos(fi)).^2+...
(X0+(cos(ALF))*cos(fi)-cos(cit)).^2+...
(sin(fi)-sin(cit)).^2))
AA=dblquad(ZETA5,0,2*pi,0,2*pi)
end

```

Donde se usa a “shift” en sustitución de delta. Se midieron los valores de M correspondientes a cada α , y se calcularon teóricamente, los resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. M (μH) práctica y calculada en función de α

X(cm)	α°	Mpr	Mcal	Error (%)
4	20,03	9,25	8,686	6,09
6	30,24	7,125	6,642	6,78
8	40,71	5,875	5,272	10,26
10	51,54	4,875	4,273	12,34
12	62,9	3,975	3,507	11,77
14	75	3,175	2,901	8,63
16	88,16	2,76	2,411	12,6
18	103	2,425	2,007	17,24
23	180	1,15	1,26	-9,56

Resulta una concordancia aceptable entre teoría y experimento. Intervienen además en los resultados prácticos el grueso de los enrollados (ver fig. 3).

Alimentación de un Móvil

Se presentan resultados preliminares de la aplicación de los repetidores inductivos inalámbricos [5,6] de forma que faciliten la alimentación de un objeto que se desplaza según una trayectoria definida por los repetidores.

Móvil con Bobina Inclinada. Simulación

Se usaron bobinas similares a las empleadas en el epígrafe 2, con una C parásita media del enrollado de 67,6pF. Se calculó el capacitor a añadir para obtener una frecuencia de resonancia $f_r = 1,7\text{MHz}$. Los valores de L medidos para las cuatro bobinas construidas dieron un valor medio de 37,2 μH . El esquema empleado se muestra en la figura 6.

Se toma $\alpha = 45$ grados. Se usan 3 bobinas separadas a una distancia igual al radio

de las mismas. Esto implica que L1 - L2 y L2 - L3 están separadas “r”. La bobina móvil Lm se

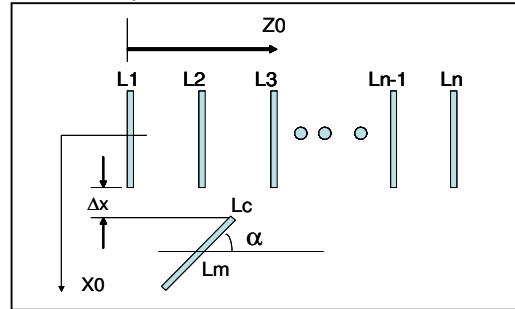


Fig 6 Esquema para alimentar un móvil

desplazará según Z0, desde cero hasta 2r, con su centro separado del centro de las fijas una distancia de:

$$X0 = r + 0,0909r + 0,707r = 1,798r$$

Si Lm está a la derecha de las bobinas fijas, $Z0 > 0$ y si está a la izquierda $Z0 < 0$, por tanto se calculan los dos casos. Se programó un Mfile para estos cálculos, tomando $\text{ang} = 45$ grados, $N = 16$, $\text{delti} = 0.25$, $Z0 = -0.25$, $X0 = 1,798$. Con los valores de M así obtenidos y el valor de $L = 37,2\mu\text{H}$, se calculan los coeficientes de

$$\text{acoplamiento: } k_{ac} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (10)$$

Con los valores del coeficiente de acoplamiento y de L y C se corre el programa PSPICEAD con el archivo repetidormovil3, para las distintas posiciones del móvil:

```

*repetidormovil3
v1 2 0 ac 24
ri 1 2 0.05k
ra 0 1 10.8k
L1 0 1 37.2u
C1 0 1 235.45p
rb 3 0 10.8k
L2 3 0 37.2u
C2 3 0 235.45p
rc 4 0 10.8k
L3 4 0 37.2u
C3 4 0 235.45p
rd 5 0 10.8k
Lm 5 0 37.2u
Cm 5 0 235.45p

```

```

RL 5 0 1.k
k1 L1 L2 0.073048
k2 L2 L3 0.073048
k3 L1 L3 0.020973

```

```

k1m L1 Lm -0.005497
k2m L2 Lm -0.04693
k3m L3 Lm 0.018977

```

```

.AC dec 10000 1500k 1900k

```

```
.probe V(5) I(ri)
.end
```



Figura 7. Foto del montaje experimental

El valor medido para la resistencia paralelo de pérdidas de las bobinas a 1,7MHz fue de 10,8k Ω . Los resultados se grafican en la figura 8.

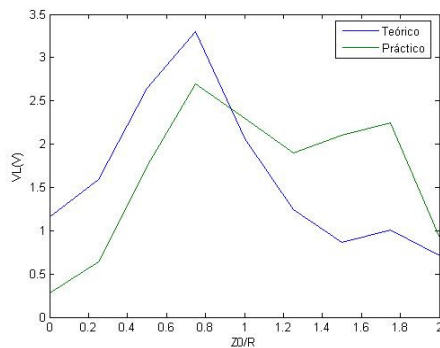


Figura 8. Voltaje en la carga móvil contra distancia @ 1,7MHz. $\alpha=45$ grados, teoría y práctica.

El arreglo de repetidores posee una respuesta de frecuencia compleja [5,6]. La posición y magnitud de cada máximo posible dependerá de los valores reales de cada componente debido a la tolerancia de los mismos Si solo se considera la Tx y el móvil a $2r$ se obtendría un voltaje en la carga muy inferior al que se obtiene usando el arreglo.

Resultados Experimentales

Se realizó un montaje experimental con tres bobinas y la móvil como se muestra en la foto de la figura 7, donde se fijó $\alpha = 45$ grados en la bobina móvil. Se usó una RL de 0,99k como carga. Se alimentó con 1,7MHz y amplitud de 24 volts pico- pico. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 8.

Conclusiones

Se valida el método numérico empleado para calcular la M entre dos bobinas circulares incluso en el caso de que exista un ángulo α entre las mismas. Se puede energizar inalámbricamente un móvil mediante repetidores inductivos. Las respuestas práctica y teórica muestran la misma forma pero con diferencia elevada entre los valores, atribuible a que el arreglo de repetidores posee una respuesta de frecuencia compleja [5,6] donde la posición y magnitud de cada máximo posible dependerá de los valores reales de cada componente debido a la tolerancia de los mismos.

Referencias

- [1] J.T.Boys and A.W.Green. "Inductive power pick-up coils" United States Patent 5528113. <http://www.freepatentsonline.com/5528113.html>
- [2] Y.P. Su., X. Liu and S.Y. Ron Hui.: " Mutual inductance calculation of movable planar coils on parallel surfaces". IEEE Trans. on Power Electronics, Vol 24, 4, April, 2009.
- [3] J.T.Conway.: "Noncoaxial inductance calculations without the vector potential for axisymmetric coils and planar coils", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 4, Apr 2008.
- [4] S. Babic and C. Akyel.: "Improvement in calculation of the self and mutual inductance of thin wall solenoids and disk coils". IEEE Transactions on Magnetics , Vol 36, No 4, pp 1970-1975, Jul 2000.
- [5] H. Trujillo.: " Wireless power repeaters. Part I, Theory" Sección de posters, CASME, Mérida, Yucatán, México, Dec. 2009.
- [6] H. Trujillo.: " Wireless power repeaters. Part II, Experimental results" Sección de posters, CASME, Mérida, Yucatán, México, Dec. 2009.