

非共振送受波器と単一の共振器から成る共鳴方式 無線接続系に関する研究

M2011MM054 野原謙太

指導教員：奥村康行

1 はじめに

近傍界結合アンテナを用いる無線接続は、身近なものではRFIDに応用され、さらに共鳴方式の無線電力伝送は携帯端末にも使われている。2007年に伝送距離2mで45~50%の伝送効率を得られる共鳴方式ワイヤレス電力伝送技術が発表され[1][2]、ユビキタスエネルギー社会の実現の道が拓かれた。現在、各研究機構でも盛んに研究が行われている[3][4]。共鳴は共振周波数を等しくする二つのアンテナが近くに置かれたとき、一方のアンテナを共振周波数で励振すると他方のアンテナも同じ周波数で強く振動する現象である。アンテナの共振はアンテナ間距離の大小に関わらず、アンテナ間の伝送効率を高めるために取られる手段であり、入力インピーダンスの虚部、入力リアクタンスがゼロである状態を指す。

近傍界アンテナは、回路で解析するため従来の無線通信の考え方は通用しない分野であり、解明を要する問題点も多い。今後解明が進めば無線での電力伝送では電気自動車を駐車するだけで充電ができる可能性が出てくる。今後需要が出てくる可能性があるもので、早急に解明が望まれる分野である。本稿ではMITのMarin Sojagicのグループが近傍界結合ループアンテナを用いた伝送とは異なった原理に基づくもので共振器を中間点に設置したものをも提案する。以下の条件で設計する。

- ループアンテナの送受信器は共振しない
- 送受信器には何も負荷しない
- 送受信器ともに等距離の位置に共振器を置く

この条件を満たすために、電磁界解析シミュレータFEKO[5]の結果と実験の電力伝送効率の特性を比較する。実験は、ネットワークアナライザ(NA:Network Analyzer)を使用して、送信アンテナと受信アンテナ間の効率を測定し評価する。また、LC素子からなる等価回路を導出し、単一の共振器による無線接続による電力伝送の動作メカニズムと特徴を明確にする。

2 着想に至る経緯

2.1 先行研究 [6][7]

共振小型アンテナには構造を工夫して共振させたものと、リアクタンス素子を装荷して共振させたものがある。本研究では両者の良い点を取り入れたいと考える。まず前者ではリアクタンス素子を装荷することにより、動作メカニズムが簡単で基本特性を把握しやすい。後者では送受信器には何も装荷しないことで、実用化に向け考えられる。この二点からアンテナを設計する。まず後者のアンテナの解析するために、先に発表された図1に示した2つのループアンテナにコンデンサを直列接続したも

のを解析する。しかし実用化に向け考えたとき送受共に同じコンデンサを装荷することは困難である。よって装荷するコンデンサは1つにすべきである。

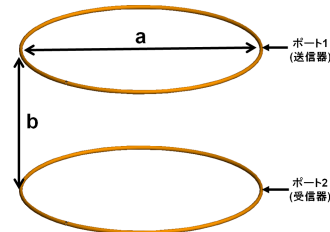


図1 ループアンテナ

2.2 リアクタンス装荷共振アンテナの特性

直径 $a = 50\text{cm}$ 、間隔 $b = 25\text{cm}$ 、線径 $r = 3.5\text{mm}$ 、周波数 $f_0 = 10\text{[MHz]}$ とする。両ループの静電容量は $\omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0$ ($\omega_0 = 2\pi f_0$) より、 $C = 1/\omega_0^2 L$ となる。FEKOで $\omega_0 L$ を求めることができる。送信機側をポート1、受信機側をポート2に対応させると、送受信機間の電力伝送効率は散乱行列要素 (S パラメータ) を用いて表せる。周波数は8~12MHzの間で計測する。 $\omega_0 L$ を求める際に周波数 $f_0 = 10\text{[MHz]}$ で共振するように C を決定する。シミュレーションは完全導体として扱っているため、導体損失は考慮されていないものとする。図2は S パラメータの S_{11} と S_{21} の周波数に対する変化を示す。 S パラメータとはポート間の伝送効率を示している。

$f_1 = 9.57\text{MHz}$ 、 $f_2 = 10.49\text{MHz}$ で $S_{21} = 0\text{dB}$ となっている。この2点で伝送効率の最大化ができる。

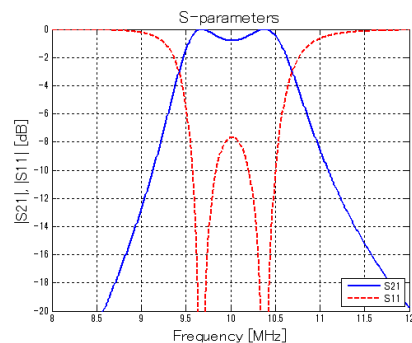


図2 電力伝送効率

3 単一の共振器を用いたループアンテナによる無線電力伝送

今回提案するリアクタンス装荷アンテナでは先行研究と形状や長さなどは全く変えない。しかし図1で直列に

装荷していたコンデンサは取り外す．この状態では共振させたい周波数では共振しない．そこでリアクタンス装荷していないアンテナの間にコンデンサを装荷した共振器を置く．構造をこのようにすることで，2章で紹介した無線接続の方法の利点を取り入れられる．リアクタンス素子装荷する点と，構造を工夫すると送受信器に何も装荷しない点が提案するアンテナにある．この2点を取り入れることでより実用化への可能性が開かれる．

共振器はリアクタンス装荷ループアンテナと同じように設計する．直径 $b = 60\text{cm}$ ，線径 $r = 3.5\text{mm}$ とする．共振器も送受信器と 13.56MNz で電力伝送効率の最大化を FEKO の optimizer, OPTFEKO によって設計する．単一の共振器を用いたループアンテナのモデルを図3に，パラメータは表1に示す．

図4のSパラメータのグラフから， 13.56MNz で $S_{21} = 0\text{dB}$ がとなり電力を供給できている．比較的広い周波数で高い電力伝送効率を得られている．

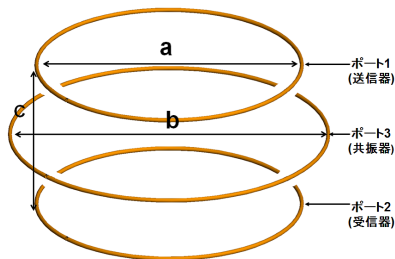


図3 単一の共振器を用いたループアンテナ

表1 単一の共振器をもつループアンテナのパラメータ

a[cm]	b[cm]	c[cm]	C[pF]	Z ₀ [Ω]
50	60	25	81.215	100

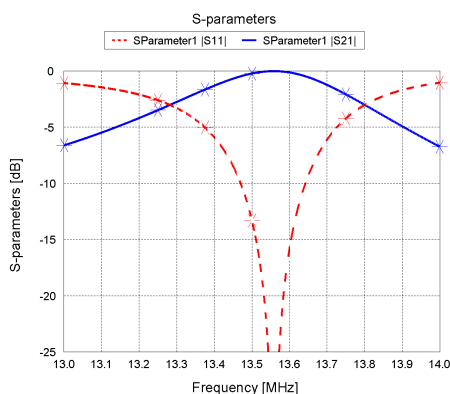


図4 Sパラメータ

4 解析方法

電力伝送効率の最大化は共役映像インピーダンスを使用することで可能となる．近傍界アンテナは回路で見ることで全貌が明らかになる．回路で見るため偶モードのインピーダンスとアドミタンスの鋭い点で共振，反共振

の周波数を特定する．等価回路はリアクタンス関数を連分数展開することで導くことができる．回路定数は偶モードから導いた共振，反共振の周波数から特定する．導かれた等価回路からSパラメータ，映像インピーダンスを求める．シミュレーションのデータと比較し，等価回路が正しいか検証する．

4.1 電力伝送効率の最大化と共役映像インピーダンス

図5の関係で最適値を $Z_t = R_t + jX_t$ ， $Z_r = R_r + jX_r$ とする．入力インピーダンスは共役整合の条件より，ポート2に Z_r を接続したとき，ポート1は Z_t^* に等しい．次に回路の可逆性により，送受を入れ換えても同じ条件が得られる．よってポート1に Z_t を接続したとき，ポート2の入力インピーダンスは Z_r^* に等しい．この条件を使うことで電力伝送効率を最大化できる．

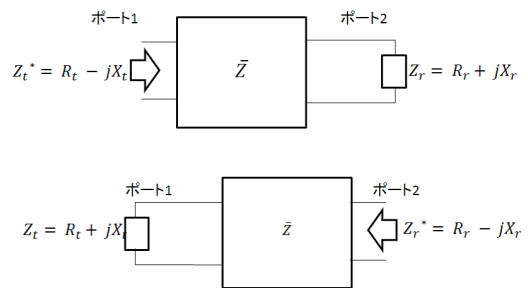


図5 共役映像インピーダンス

4.2 偶モードでの解析

偶モードでシミュレーションを行うことで，共振，反共振周波数が特定できる．偶モードとは給電点を送受信器で同相大で給電することである．等価的に開放状態になる．この状態ではポート1，ポート2から接線成分が磁氣的に0になる．図6，7では偶モードに対する入力インピーダンスと入力アドミタンス示す．周波数特性は鋭いピークをもつことから，共振，反共振が生じている．給電素子と非給電素子から成るアンテナ構造も複雑に見えるシステムであっても，システム全体の大きさが電気的小型であると，共振，反共振が比較的近い周波数で生じる．

奇モードも存在するが今回は解析しない．奇モードは等価的に短絡になる．この状態ではポート1，ポート2から接線成分が電氣的に0になる．よって今回は偶モードのみで共振，反共振周波数を見る．しかし送受のアンテナ自身もつリアクタンスは奇モードで解析する．それを L_{lfo} (low frequency odd-mode) とする．奇モードは等価的に送受信器それぞれのもつリアクタンスのみとなり， $j\omega$ を見れば1次関数である．よって低周波のリアクタンスを $j\omega$ で割れば求まるものである．これは低周波では奇モードの方が安定するためである．

4.3 等価回路の導入

ループのような構造は導線が切れ間なくつながっており，このような構造を閉路型構造と呼ぶ．偶モードの入力インピーダンスはほぼ純リアクタンスとなる．よって

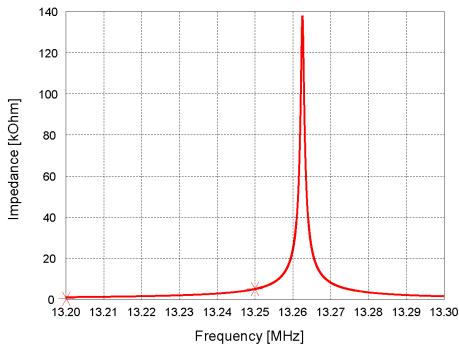


図 6 偶モードでの入力インピーダンス

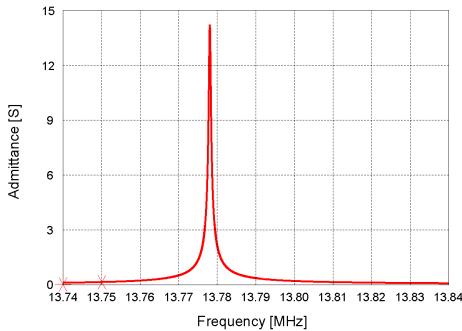


図 7 偶モードでの入力アドミタンス

等価回路はリアクタンス関数から導く．共振周波数 (f_{se})，反共振周波数 (f_{pe}) の 2 点あらわれるため式 (1) のようにあらわされる．無損失回路では $0 < f_{pe} < f_{se}$ を満たす．これを満たさない場合は放射が損失が大きいと判断されるので，本論文の対象外とする．

式 (1) を連分数展開することで図 8 の等価回路が導くことができる．各定数の式は (2)，(3)，(4) となる．更に映像インピーダンス式 (5) のように表せる．

$$Z(s) = sL_0 \frac{s^2 - s_{se}^2}{s^2 - s_{pe}^2} \quad (1)$$

$$s = j2\pi f, s_{se} = j2\pi f_{se}, s_{pe} = j2\pi f_{pe}$$

se : 共振周波数 (直列共振) pe : 反共振周波数 (並列共振)

$$L_0 = L_1 f_0 \quad (2)$$

$$L_1 = \left(\frac{f_{se}^2}{f_{pe}^2} - 1 \right) L_0 \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi)^2 (f_{se}^2 - f_{pe}^2) L_0} \quad (4)$$

$$Z(f) = 2\pi f L_0 \sqrt{-\frac{f^2 - f_{se}^2}{f^2 - f_{pe}^2}} \quad (5)$$

入力インピーダンスと入力アドミタンスのから共振，反共振の周波数は 4.2 章で特定できている．よって等価回路の L_0, L_1, C_1 の値は $L_0 = 2.51003\mu\text{H}$ ， $L_1 = 99.348\text{nH}$ ， $C_1 = 1.4492\text{nF}$ である．等価回路は偶モードで解析し，電界結合型で動作している．

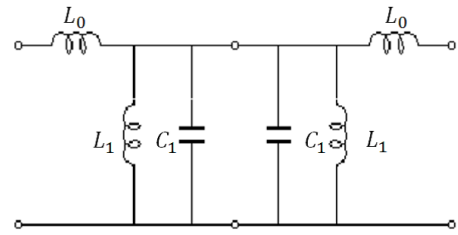


図 8 等価回路

4.4 等価回路から求めた S パラメータと映像インピーダンスの特性

等価回路から S パラメータと映像インピーダンスの周波数ごとのグラフが作成できる．図 9 は等価回路から求めた S パラメータである．図 4 のグラフと一致しており等価回路が正しいことがわかる．図 10 は周波数に対する映像インピーダンスのグラフを表し，13.56MHz で 100Ω となりこのグラフからも電力伝送効率の最大化が確認できる．

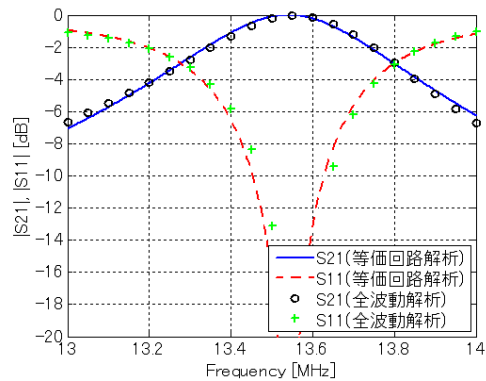


図 9 等価回路から求めた S パラメータ

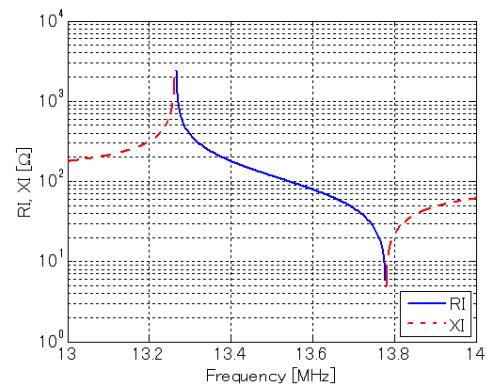


図 10 周波数に対する映像インピーダンスの変化 ($R_0 = 100\Omega$)

5 実験モデルと評価

5.1 実験モデル

今回シミュレーションした結果では空間に距離を一定に保たなければならない．この状態では実際に実験は難しい．そこで鏡像法を用いることでその問題を解決することができる．半円を銅板上に設置することで，電磁気学的に同じモデルで実験できる．鏡像法では構造が同じ状態で銅板の下部に現れる．そこで装荷するコンデンサはシミュレーションの2倍の静電容量となる．図11に実験モデルを示す．

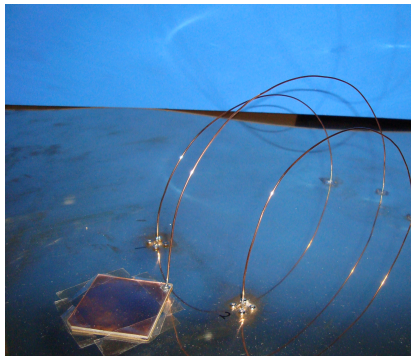


図 11 実験モデル

5.2 実験

シミュレーションでは 13.56MHz の GRAND 板が大きくなるため実験では小規模なものを設計した．周波数は 40MHz，送受信器は 10cm，共振器は 12.5cm にした．実験とシミュレーションで求めた電力伝送効率の比較を図12に示す．シミュレーション結果は図4とは違い，実験で使用した GND 板の真鍮とアンテナの銅でロスを含む結果である．シミュレーションした結果では 40MHz で約 -0.54dB で約 86% の伝送効率である．実験では 40.3MHz で約 -0.9dB で約 82% の伝送効率である．最大電力伝送効率はかなり近い値がとれた．しかしシミュレーションと違う周波数で最大になっている．これは共振器の大きさや，コンデンサの静電容量がシミュレーションと一致していないためである．

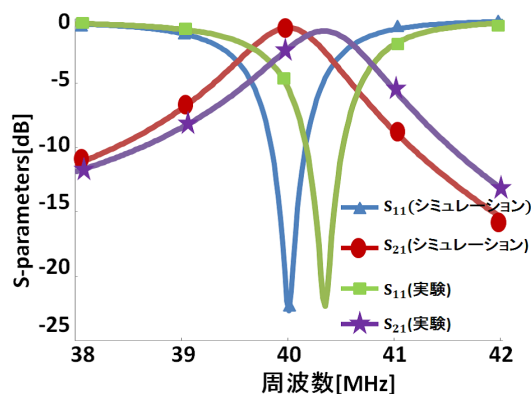


図 12 実験から求めた S パラメータ

6 むすび

本稿ではループアンテナの装荷されたコンデンサを外し，共振させるため共振器にコンデンサを装荷したものを提案した．しかしこのモデルは精密で距離，大きさで電力伝送効率が変化し，静電容量，共振器の大きさで周波数帯が変化する．今後電気自動車などへの無線充電を考慮したときに問題点がでてくる．今回の提案モデルでは装荷する静電容量が1つになった．今後は更に高周波帯域で高い伝送効率があげられることができ，設計の誤差に影響が少ないものへの発展が必要であると考える．

今回の実験モデルではシミュレーションと同じ条件で行っても，電力は約 86% しか送ることができない．共振周波数に近づくと大きな電力が流れ，ロスも大きくなる．理由としてアンテナの銅が抵抗を持っているためである．ループアンテナの線径を太くすると抵抗が小さくなるため電力ロスも軽減できる．よって高効率な電力伝送を行うにはなるべく太い銅線を使うべきである．

今後電気自動車などへの無線充電を考慮したときに進展した点と問題点がある．進展した点では，受信器には何も装荷しない点である．同じ静電容量のコンデンサを装荷するのは困難である．問題点は受信器の位置である．車の停車位置で伝送効率が変化してしまい，充電時間が変化してしまう．このような点が今後改良が必要であると考え

謝辞

本研究に際して，修士1，2年にご指導頂いた奥村康行教授，有益なアドバイスを頂いた藤井勝之講師，様々にご指導を頂きました稲垣直樹先生に深謝いたします．

参考文献

- [1] A. Karalisa, J.D. Joannopoulos, M. Soljačić, “Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer,” *Annals of Physics*, 323, pp.34–48, Elsevier, Available online 27, Apr 2007.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. d. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *Science Express*, Vol.317, No.5834, pp.83–86, Jul. 2007.
- [3] 庄木裕樹，“ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み,” *信学技報*, WPT2010-07, pp.19–24, Jul. 2010.
- [4] 居村岳広，堀洋一，“電磁界共振結合による伝送技術,” *電学誌*, Vol.129, No.7, pp.414–417, 1991.
- [5] FEKO ホームページ, <http://www.feko.info/>.
- [6] 稲垣直樹，堀 智，“近傍界結合アンテナを用いる無線接続の基礎,” *信学論 (B)*, Vol. 94-B, No.3, Mar. 2011.
- [7] 稲垣直樹，堀 智：“共鳴方式無線接続システムの偶奇励振リアクタンス関数と影像インピーダンスに基づく特性評価,” *信学論 (B)*, Vol. 94-B, No3, Sep. 2011.