

リコンフィギュアブルアンテナを用いた 近傍界無線電力伝送システムの検討

丸山 駿[†] 陳 強[†] 袁 巧微^{††}

[†] 東北大学 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 仙台高等専門学校 〒 989-3128 宮城県仙台市青葉区愛子中央 4-16-1

E-mail: [†] maruyama@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 近傍界無線電力伝送システムにおいて、送受信アンテナが位置ずれした際の電力伝送効率低下が問題となっている。効率が低下する主な原因は、送受信アンテナ間の相互結合が低下すること、及びインピーダンスの不整合損失が発生することである。そこで本研究では、リコンフィギュアブルな送受信アンテナを使用することで、位置ずれ時の相互結合の低下を補償し、かつインピーダンスの整合状態を維持する手法を検討する。リコンフィギュアブルアンテナは、ループ型の素子の近傍に、終端にスイッチが装荷された無給電素子アレーを配置することで構成する。送受信アンテナが位置ずれしたとき、無給電素子の終端条件をスイッチングすることによって、送受信アンテナ間の相互結合、及びインピーダンス整合状態を変化させ、電力伝送効率の落ち込みを抑制する。数値解析と実験結果から、提案システムの有効性を示す。

キーワード 無線電力伝送, リコンフィギュアブルアンテナ, 無給電素子, インピーダンス整合, 相互結合

Study of Near-Field Wireless Power Transfer System Using Reconfigurable Antenna

Shun MARUYAMA[†] Qiang CHEN[†] and Qiaowei YUAN^{††}

[†] Tohoku University 6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

^{††} Sendai National College of Technology 4-16-1 Ayashichuuou, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 989-3128 Japan

E-mail: [†] maruyama@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract It has been known that the degradation of power transmission efficiency due to the misalignment of transmitting/receiving antennas is one of the problems in near-field wireless power transfer (WPT) system. This problem is caused by two factors. One is the reduction of the mutual coupling between transmitting/receiving antennas, the other is the impedance mismatching loss. In this research, the reconfigurable transmitting/receiving antennas is applied to the WPT system, which can compensate the reduction of mutual coupling and impedance change adaptively. The reconfigurable antenna is composed of loop type elements and parasitic loop-element with switches. The degradation of power transmission efficiency is suppressed even when the misalignment of transmitting/receiving antenna is occurred because the mutual coupling and impedance matching condition are changed by switching the termination conditions of parasitic elements. Results of numerical simulation and experiment demonstrate the effectiveness of proposed WPT system.

Keywords Wireless power transfer, Reconfigurable antenna, Parasitic element, Impedance matching, Mutual coupling

1. まえがき

近傍電磁界結合を利用した、近傍界無線電力伝送において、高効率な電力伝送を行うためには、送受信アンテナ間の相互結合が強く、かつインピーダンス整合状態を満たしている必要がある[1]-[2]。結合状態やインピーダンス整合状態は、送受信アンテナ間の位置関係によって変化するため、この要件は、特定の位置にアンテナを固定することを意味する。しかしながら、実際のアプリケーションでは、送受信アンテナを特定の位置に正確に配置することは困難である。例えば、

電気自動車へ給電するとき、運転者の技術によって駐車位置にばらつきが生じることは避けられない。従って、送受信アンテナが位置ずれした際にも、高効率な電力伝送を行うシステムの構築が求められていた。

従来研究では、共振器の位置を変えることで送受信アンテナ間の電磁界分布を変化させるシステム[3]や適応的なインピーダンス整合回路[4]等が提案されてきた。これらの手法は、送受信アンテナ間の相互結合とインピーダンス整合状態のどちらか一方を大きく変化させるが、もう一方の変化が伴わないため、位置ず

れが大きくなると電力伝送効率の大幅な低下を抑制できなかつた。

そこで、本研究では、送受信アンテナ間の相互結合とインピーダンス整合状態を変化させるため、リコンフィギュラブルアンテナを用いた近傍界無線電力伝送システムを検討している。著者はダイポール型のシステムを提案しているが[5]-[6]、本報告ではループ型のシステムについて検討を行う。提案システムでは、終端にスイッチが装荷された無給電素子をループ型素子の近傍に配置することで、送受信アンテナをリコンフィギュラブルにする。送受信アンテナが位置ずれした際、無給電素子の終端条件を適応的に切替えることで、送受信アンテナ間の電磁界分布、及びシステムのインピーダンスを変化させ、相互結合の低下、及びインピーダンスの不整合損失を低減する。以上のように、提案システムが、送受信アンテナの位置ずれに対して有効なシステムであることを数値解析・実験的に明らかにする。

2. 提案システムの構造

図1に提案する無線電力伝送システムの構造を示す。方形ループ型素子（黄色層、桃色層）の近傍に無給電素子アレー（水色層）を配置した。無給電素子の終端条件はスイッチによって“開放”，もしくは“短絡”に切替えることが可能であると仮定し、方形ループ型素子と無給電素子アレーを一体として、リコンフィギュラブルな送受信アンテナと捉えている。無給電素子は送信側と受信側にそれぞれ4個ずつ配置し、T1～T4、及びR1～R4と番号付けた。なお、無給電素子の形状は給電素子と同様に方形ループであり、大きさは給電素子の枠内に収まる程度とした。

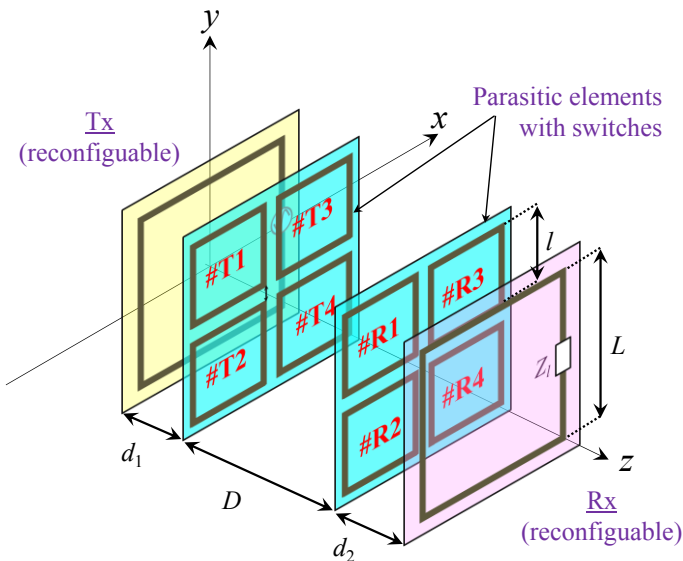


図1：リコンフィギュラブルアンテナを用いた無線電力伝送システムの構造。

3. 電力伝送効率の定義

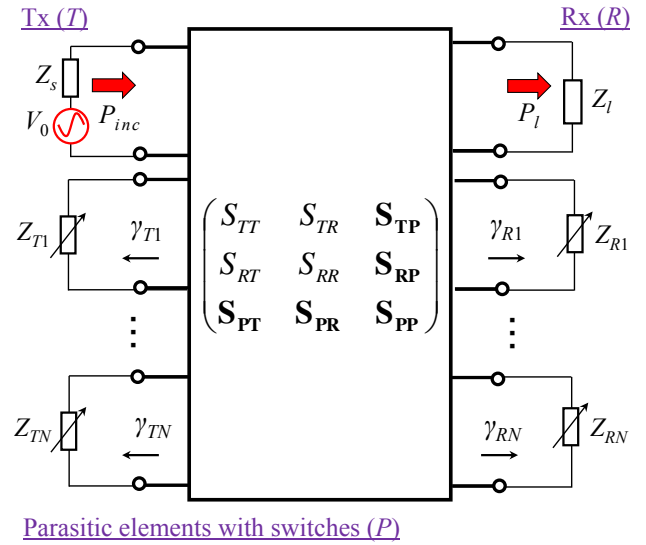


図2：提案システムの等価回路表現。

多端子回路網を用いて、図1で示した提案システムを等価的に表すと、図2のように表現することができる。はじめに、無給電素子の個数をN個とすると、システムのSパラメータは以下の $(N+2) \times (N+2)$ 行列で表現できる。なお、本報告では、無給電素子の個数は8個なので、 10×10 行列となる。

$$\begin{bmatrix} S_{TT} & S_{TR} & S_{TP} \\ S_{RT} & S_{RR} & S_{RP} \\ S_{PT} & S_{PR} & S_{PP} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 S_{TT} は送信アンテナの反射係数、 S_{RR} は受信アンテナの反射係数、 S_{TR} 、 S_{RT} は送受信アンテナ間の透過係数、 S_{TP} 、 S_{PT} は送信アンテナと無給電素子間の透過係数、 S_{RP} 、 S_{PR} は受信アンテナと無給電素子間の透過係数、そして S_{PP} は各無給電素子のSパラメータを表している。

つづいて、各無給電素子の反射係数を γ_N とし、それらを行列 Γ にまとめて、

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \gamma_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

と書き表す。数値解析においては、計算を簡単化するため、無給電素子の終端条件が“開放”のとき $\gamma_N = 1$ とし、“短絡”のとき $\gamma_N = -1$ と仮定する。

最後に、回路行列の縦続接続を用いて、 10×10 のSパラメータを 2×2 のS'パラメータに変形する。

$$\begin{bmatrix} S'_{TT} & S'_{TR} \\ S'_{RT} & S'_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{TT} & S_{TR} \\ S_{RT} & S_{RR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{TP} \\ S_{RP} \end{bmatrix} (I - \Gamma S_{PP}) \Gamma \begin{bmatrix} S_{PT} & S_{PR} \end{bmatrix} \quad (3)$$

この式から取得したS'パラメータを用いて、電力伝

送効率の算出式を以下の式で定義する.

$$\eta = \frac{P_l}{P_{inc}} = \frac{|S'_{RT}|^2(1-\Gamma_S^2)(1-\Gamma_l^2)}{|1-\Gamma_S\Gamma_{in}|^2|1-\Gamma_l S'_{RR}|^2} \quad (4)$$

ここで, P_{inc} は送信アンテナに入射する電力, P_l は負荷で消費される電力, $\Gamma_S, \Gamma_l, \Gamma_{in}$ はそれぞれ, 電源, 負荷, 給電点における反射係数を表している.

4. 数値解析結果

第2節の提案システムについて, モーメント法 (Method of Moments : MoM)を用いて数値解析を行った. なお, 各素子の素材は銅であると仮定し, 銅損失を考慮した. 数値解析によって(1)式のSパラメータを求め, (3)式によって変形した後, (4)式に代入することで, 電力伝送効率を求めた.

提案システムは以下の3つの異なる電力伝送効率基準によって評価した.

η_1 : 相互結合を常に最大化し, かつ理想的なインピーダンス整合状態を常に満たしている電力伝送効率
→送受信アンテナに理想的な負荷が常に装荷されており, 位置ずれ時にも不整合損失は生じないと仮定. 無給電素子の終端条件も最適化.

η_2 : 無給電素子の終端条件をスイッチングすることで得られる最大の電力伝送効率 (提案手法)
→送受信アンテナには, 位置ずれがないときの最適負荷を装荷し, 固定. 無給電素子の終端条件は最適化.

η_3 : 無給電素子の終端条件をスイッチングしなかった場合の電力伝送効率.
→送受信アンテナには, 位置ずれがないときの最適負荷を装荷し, 固定. 無給電素子の終端条件も初期状態のまま固定.

図3に, 受信アンテナがx軸方向に位置ずれしたときの数値解析結果を示す. dx が増加するにつれて, 電力伝送効率 η_3 (青線)が急激に低下している. 受信アンテナが位置ずれするとき, 送受信アンテナ間の相互結合が弱まり, 加えてインピーダンスの不整合損失が発生するが, η_3 ではこれらを補償する手段がないため, 効率が低下していると考えられる. 一方, 無給電素子の終端条件をスイッチングすることで得られる電力伝送効率 η_2 (赤線)は, 全ての点で η_3 を上回っていることが分かる. この η_3 から η_2 への変化幅が, 本提案手法の電電力伝送効率改善効果を表しており, 最大約23%の改善効果が確認できた. しかしながら, 送受信アンテナ間の相互結合, 及びインピーダンス整合状態の変化幅が限られているため, 理想的な電力伝送効率である η_1 (黒線)を達成することはできなかった. より高い改善効果を実現するためには, 無給電素子の個数や配置, 形状等を最適化することが必要であると考えられる.

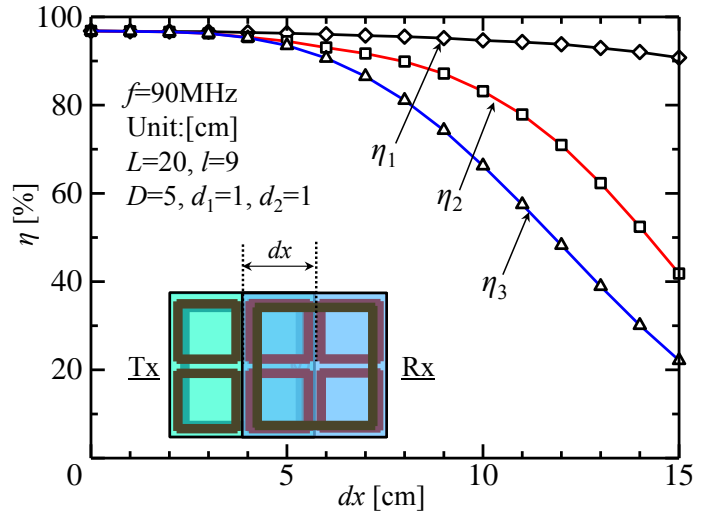


図3: 受信アンテナがx軸方向に位置ずれしたときの電力伝送効率の数値解析結果.

5. 実験結果

第2節の提案システムについて, 実験的検討を行った. はじめに, 試作した方形ループ型素子を図4に, 無給電素子アレーを図5にそれぞれ示す. 方形ループはシールドループアンテナとし, 同軸ケーブルを使用して作成した. 無給電素子はガラス・エポキシ基盤を加工することで作成した.

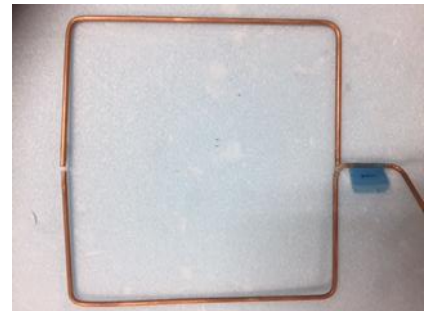


図4: 方形ループ型素子の試作品.



図5: 無給電素子アレーの試作品.

つづいて, 無給電素子のスイッチ機構を図6に示す. スイッチは, シリコンダイオード BAP64-03 (NXP セミコンダクターズ社) をバイアス回路によって電子的に切替えることで実現した. また, バイアス電圧源には NI USB-6216 (National Instruments 社) を使用し

た．この装置はマルチポートに電圧を出力でき、かつその ON/OFF を高速に切り換えることができるため、無給電素子の終端条件を素早く探索することに適している．なお、NI USB-6216 の出力電圧値は 5V で、サンプリングレートは 250 kS/秒である．また、図中のコンデンサは直流カットのため、インダクタは高周波電流カットのため、そして LED はバイアス電圧の検出用に装荷している．

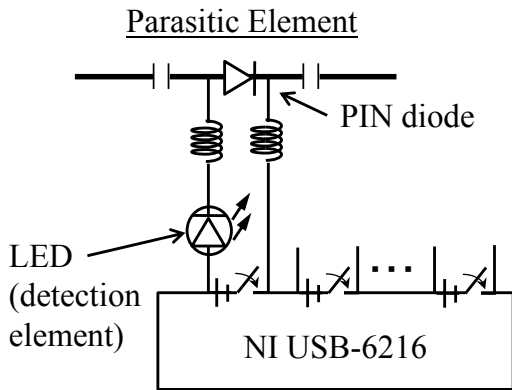


図 6 : スイッチ機構を装荷した無給電素子．

最後に、実験風景を図 7 に示す．ベクトルネットワークアナライザ N5224A (Keysight 社) を使用し、無給電素子の終端条件を切り換えながら、送受信アンテナの S パラメータを測定した．その上で測定結果を(4)式に代入し、電力伝送効率を求めた．使用周波数は、数値解析と同様に 90 MHz とした．

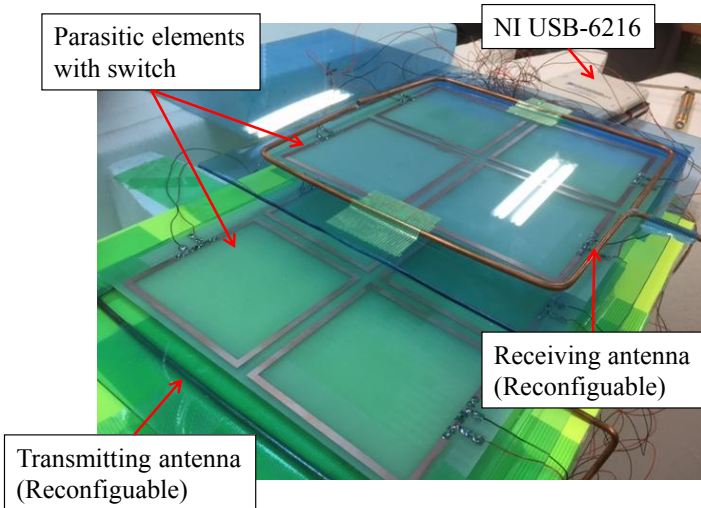


図 7 : 実験風景．

図 8 に、受信アンテナが x 軸方向に位置ずれした場合の実験結果を示す．数値解析結果と同様に、 dx が増加するにつれて、電力伝送効率 η_3 が急激に低下している．一方、提案手法を用いることによって、電力伝送効率が η_3 から η_2 に改善し、その改善幅は最大約 23% だった．

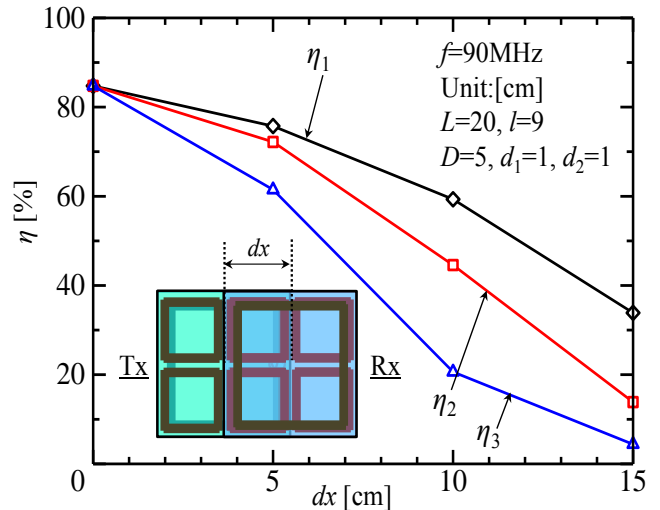


図 8 : 受信アンテナが x 軸方向に位置ずれしたときの電力伝送効率の実験結果．

6. むすび

本報告では、ループ型のリコンフィギュラブルアンテナを用いた近傍界無線電力伝送システムを提案し、数値解析、及び実験によって評価した．解析・実験結果より、受信アンテナが位置ずれする際、提案手法によって送受信アンテナ間の相互結合の低下、及びインピーダンス不整合状態を是正し、電力伝送効率の落ち込みを低減できることが明らかになった．

7. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 25420353 の助成を受けたものです．

文 献

- [1] Q. Chen, K. Ozawa, Q. Yuan, and K. Sawaya, "Antenna Characterization for Wireless Power Transmission System Using Near-Field Coupling," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 54, no. 4, pp. 108-116, Aug. 2012
- [2] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送," 電学論 D, vol. 130, no. 1, pp. 76-83, Jan. 2010.
- [3] H. Hoang, S. Lee, Y. Kim, Y. Choi, and F. Bien, "An Adaptive Technique to Improve Wireless Power Transfer for Consumer Electronics," IEEE Tran. on Consumer Electronics, vol. 58, no. 2, pp. 327-332, May 2012.
- [4] Y. Lim, H. Tang, S. Lim, and J. Park, "An Adaptive Impedance-Matching Network Based on a Novel Capacitor Matrix for Wireless Power Transfer," IEEE Tran. on Power Electronics, vol. 29, no. 8 pp. 4403-4413, Aug. 2014.
- [5] 丸山駿, 陳強, 袁巧微, "リコンフィギュラブルアンテナを用いた近傍界無線電力伝送システムの実験的検討" 信学技報, vol. 116, no. 321, pp. 25-29, Nov. 2016.
- [6] S. Maruyama, Q. Chen, and Q. Yuan, "Numerical Analysis on Near Field Wireless Power Transfer System Using Reconfigurable Transmitting /Receiving Antenna," IEICE Commun. Express, 2017.