

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実験的検討

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、高い電力伝送効率を実現するためには、送受信アンテナのインピーダンス整合が重要である。しかしながら、実際のアプリケーションにおいて、送受信アンテナのインピーダンス整合状態を維持することは困難である。なぜならば、送受信アンテナが初期位置から位置ずれしたり、姿勢変化したりすると、システムのインピーダンスが変化するためである。そして大きな不整合損失が発生し、結果的に電力伝送効率は大幅に低下する。本報告では、リコンフィギュアブルアンテナを用いた新しい近傍界無線電力伝送システムを提案し、実験的にその効果を検証する。リコンフィギュアブルアンテナは終端にスイッチが装荷された無給電素子から構成され、スイッチを切り替えることで、インピーダンスが変化する。送受信アンテナが位置ずれしたとき、スイッチングによってインピーダンス整合を維持し、より高い電力伝送効率を実現する。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

Experimental Investigation of Near Field Wireless Power Transfer System by 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 In order to realize a high power transmission efficiency of near field wireless power transfer (WPT) system, impedance matching of the transmitting and receiving antennas are required. However, in the practical applications, it is difficult to keep the impedance matching condition. This is because the impedance of WPT system is changed when transmitting/receiving antennas move or rotate. Therefore, the power transmission efficiency of the near field WPT system decreases greatly due to the large mismatching loss. In this report, we propose a novel near field WPT system by using the reconfigurable antennas, and evaluate the antenna experimentally. The reconfigurable antennas are composed of the parasitic elements with electrical switches. The impedance is changed when the termination conditions of the parasitic elements are switched. Then the impedance matching condition can be kept even when the transmitting/receiving antennas move, and the high power transmission efficiency is achieved. Results of experiment demonstrated the effectiveness of our proposed system.

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

1. まえがき

無線電力伝送技術は、タブレット PC, 携帯電話, 電気自動車などの電力を必要とする機器への、ケーブルレスな充電・給電技術として注目を集めている[1]-[3]. 無線電力伝送システムは大きくふたつに分類可能である。ひとつは遠方界放射を用いるもので[4]-[6], もうひとつは近傍界結合を用いるものである[7]-[10]. 近年、後者を用いた無線電力伝送システムの研究が盛んである[11]-[13]. 近傍界結合を用いることで、遠方界放射

を用いる場合と比較して、極めて高効率な電力伝送が可能であるためであり、これは実用面からも望ましい。

先行研究によって、近傍界無線電力伝送システムにおいて電力伝送効率を高めるためには、送受信アンテナのインピーダンス整合が重要であることが示されている[11]. しかしながら、インピーダンス整合は送受信アンテナの位置ずれや姿勢変化によって、容易に変化してしまうことも報告されている[14]. そのため、送受信アンテナが動いても高効率な無線電力伝送効率

を維持できるシステムが必要とされていた。

本報告では、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する。リコンフィギュラブルアンテナは、主に多周波共用や指向性制御のため、通信技術として提案されてきた[15]-[17]。提案システムでは、電力伝送効率維持を目的としたインピーダンス整合を行うために、本技術を活用する。送受信アンテナが位置ずれしたとき、インピーダンスを変化させることで、インピーダンス整合を取り、不整合損失を抑制する。

2. 電力伝送効率の定義

図1で示すように、無線電力伝送システムは二端子回路網で表現することができる。図1で使用されている Γ_s , Γ_l , Γ_{in} , そして Γ_{out} は以下の式で定義される。

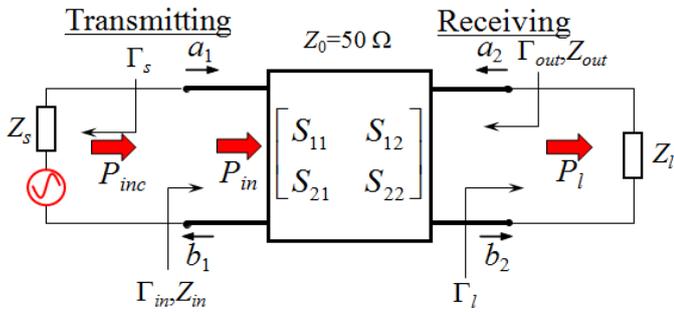


図1：無線電力伝送システムの等価回路

$$\Gamma_s = \frac{a_1}{b_1} = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (1)$$

$$\Gamma_l = \frac{a_2}{b_2} = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad (2)$$

$$\Gamma_{in} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3)$$

$$= S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (4)$$

$$\Gamma_{out} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{Z_{out} - Z_0}{Z_{out} + Z_0} \quad (5)$$

$$= S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s} \quad (6)$$

ここで、 $Z_0 = 50 \Omega$ は特性インピーダンス、 Z_{in} は入力インピーダンス、 Z_{out} は出力インピーダンスを示している。なお、最大の電力伝送効率を実現するためには、以下の式のとおり電源の内部インピーダンス Z_s が Z_{in} の複素共役に、負荷インピーダンス Z_l が Z_{out} の複素共役になっていればよい。

$$Z_s = Z_{in}^* \quad (7)$$

$$Z_l = Z_{out}^* \quad (8)$$

本報告で用いた電力伝送効率 η は以下の式で表現することができる。

$$\eta = \frac{P_l}{P_{inc}} \quad (9)$$

ここで、 P_{inc} は入射電力、 P_l は負荷における受信電力を示している。

Sパラメータの関係式は

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (10)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (11)$$

と表すことができるため、入射電力基準の電力伝送効率の算出式は、

$$\eta = \frac{P_l}{P_{inc}} = \frac{-a_2^* a_2 + b_2^* b_2}{a_1^* a_1} \quad (12)$$

$$= \frac{|S_{21}|^2 (1 - \Gamma_s^2)(1 - \Gamma_l^2)}{|1 - \Gamma_s \Gamma_{in}|^2 |1 - \Gamma_l S_{22}|^2} \quad (13)$$

と表現することができる。

3. 提案システムの構造

図2に提案する無線電力伝送システムを示す。送受信アンテナには、メアンダラインアンテナを用いた。また送信アンテナの近傍には、リコンフィギュラブルアンテナを設置した。リコンフィギュラブルアンテナは、スイッチが装荷された無給電素子アレー#1～#9で構成されている。

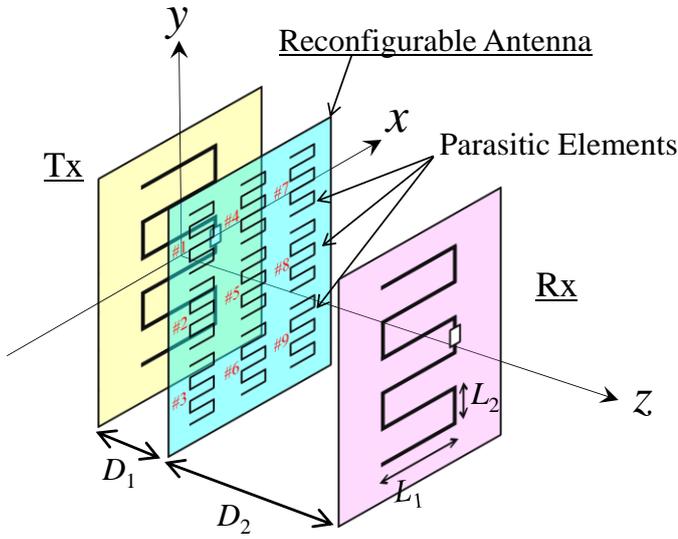
無給電素子の形状は、送受信アンテナと同様にメアンダラインアンテナであり、大きさは送受信アンテナの3分の1程度の大きさとした。

各無給電素子には、スイッチ機構を装荷した。スイッチング素子にはNXPセミコンダクターズ社のシリコンピンダイオードBAP64-03を使用した。ピンダイオードは、図3に示す回路を用いてバイアス電圧を印加することで、電子スイッチとして機能するように設計した。さらに、バイアス電圧源としてNational Instruments社のNIUSB-6216を使用し、ピンダイオードの状態を「短絡」もしくは「開放」に高速切替することを可能とした。

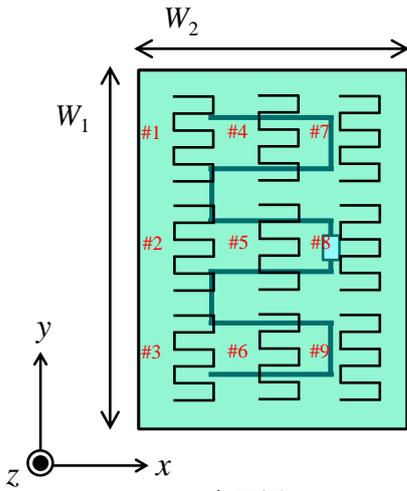
提案システムでは、9個の無給電素子を使用しているため、無給電素子の終端条件の組合せは $2^9 = 512$ 通り考えることができる。受信アンテナが位置ずれしたとき、スイッチングによって終端条件を適応的に切換えることで、リコンフィギュラブルアンテナの電氣的形状を変化させ、インピーダンスを整合し、その結果電力伝送効率を改善する。

実験においては、受信アンテナを動かす度に512パターン全てのSパラメータを測定し、その上で電力伝送効率を計算する。最適な終端条件の組合せは、最大

の電力伝送効率を与えるものを探索する方法によって、
 選択している。



(a) 概観図



(b) 上面図

図 2 : 無線電力伝送システムの等価回路

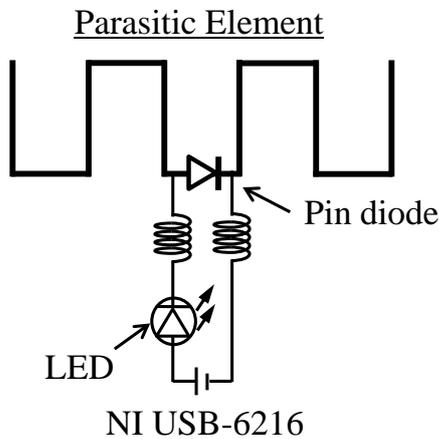


図 3 : 無給電素子に接続したバイアス回路

4. 実験結果

第 3 節の提案システムについて、実験的検討を行った。実験風景を図 4 に、スイッチ機構を装荷した無給電素子を図 5 に示す。電力伝送効率を測定するにあたっては、S パラメータ法[18]を使用し、取得した S パラメータを(12)式に代入することで求めた。また使用周波数は 58 MHz とした。

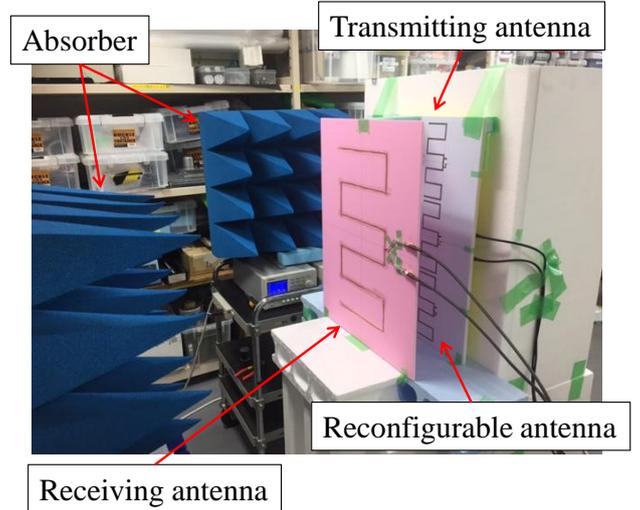


図 4 : 実験風景

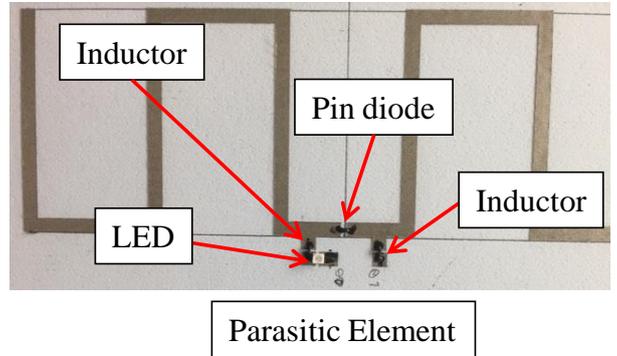


図 5 : スイッチ機構を装荷した無給電素子

提案システムは次の 3 つの異なる条件によって評価した。

i) w/ Optimum loads

各 $\Delta x(y)$ に対して送受信アンテナには常に最適負荷が装荷されており、無給電素子の終端条件も常に最適である。つまり理想的な電力伝送効率である。

ii) w/ Switching

送受信アンテナには常に固定負荷 Z_s^0, Z_l^0 が装荷されている。 Z_s^0, Z_l^0 とは $\Delta x(y) = 0$ かつ最大効率を与える無給電素子の終端条件に設定したときの最適負荷である。各 $\Delta x(y)$ に対して、スイッチングにより無給電素子の終端条件は常に最適である。

iii) w/o Switching

送受信アンテナには常に固定負荷 Z_s^0 , Z_l^0 が装荷されている。また無給電素子の終端条件は常に固定負荷を決定時のものである。

図 6 に実験結果を示す。図 6 は受信アンテナが x 軸方向にずれる場合、図 7 は y 軸方向にずれる場合の各条件における電力伝送効率の変化を示している。

本システムにおいては、 $\Delta x(y) = 0$ のとき、無給電素子 #5 を短絡とし、それ以外を開放とする場合の電力伝送効率が最大であったため、この終端条件のときの最適負荷を固定負荷 Z_s^0 , Z_l^0 とした。

$\Delta x(y)$ が増加するにつれ、電力伝送効率 iii) (青線) は急激に低下し、電力伝送効率 i) (黒線) との乖離が拡大していく。一方、表 1, 2 に示す終端条件になるようスイッチングすると、電力伝送効率 ii) (赤線) を実現した。これは全ての点で電力伝送効率 iii) を上回る結果となり、図 6 では最大約 17%、図 7 では最大約 12% の改善効果を確認することができた。

以上より、リコンフィギュラブルアンテナを使用し、電力伝送効率を改善できることを明らかにした。

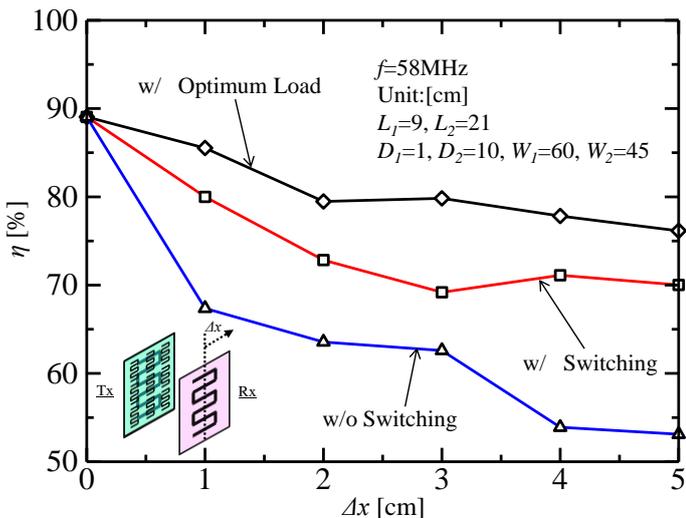


図 6：受信アンテナが x 軸方向に位置ずれしたときの電力伝送効率

表 1：各 Δx における終端条件の組合せ

Δx	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
0	O	O	O	O	S	O	O	O	O
1	O	O	O	O	O	S	O	O	O
2	S	S	O	S	S	S	S	S	O
3	O	S	S	S	O	O	O	S	O
4	O	S	S	O	O	O	O	S	S
5	S	O	S	O	S	S	S	S	O

O = Open, S = Short

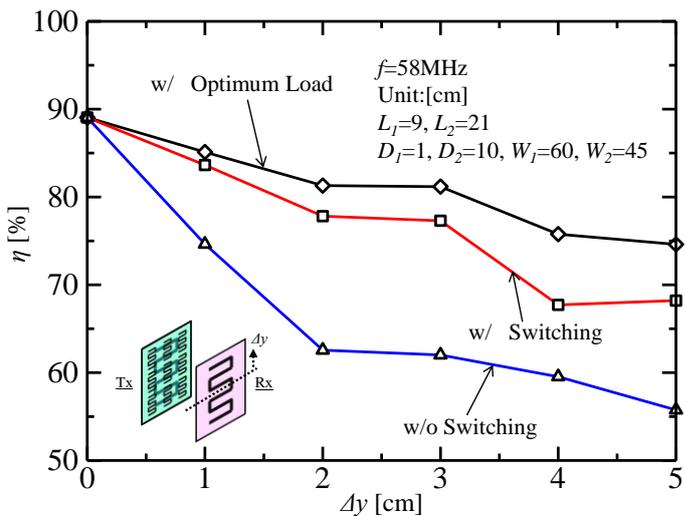


図 7：受信アンテナが y 軸方向に位置ずれしたときの電力伝送効率

表 2：各 Δy における終端条件の組合せ

Δy	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
0	O	O	O	O	S	O	O	O	O
1	S	S	O	S	S	O	O	S	S
2	S	O	O	S	S	O	O	O	O
3	S	S	O	S	S	O	O	S	S
4	S	S	S	S	S	O	O	S	O
5	O	O	S	S	S	O	O	S	S

O = Open, S = Short

5. むすび

本報告では、リコンフィギュラブルアンテナを用いた新しい近傍無線電力伝送システムを提案し、送受信アンテナ及び、リコンフィギュラブルアンテナを試作した。リコンフィギュラブルアンテナは、複数個の無給電素子から構成され、スイッチを切り替えることでアンテナのインピーダンスを適応的に変化させることを可能とした。本システムによって送受信アンテナが位置ずれしたとき不整合損失を抑制できることを確認し、電力伝送効率を向上できることを実験的に明らかにした。

6. 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] J. Murakami, F. Sato, T. Watanabe, H. Matsuki, S. Kikuchi, K. Harakawa, and T. Satoh, "Consideration on Cordless Power Station -Contactless Power Transmission System," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 5, pp.5017-5019, Sept. 1996.

- [2] G. Buja, M. Bertoluzzo, and K. N. Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7436-7447, Jul. 2015.
- [3] J. C. Lin, "Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 250-253, Apr. 2013.
- [4] Y. Suh, and K. Chang, "A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 7, pp.1784-1789, Jul. 2002.
- [5] W. C. Brown, "The history of power transmission by radiowaves," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp.1230-1242, Sep. 1984.
- [6] P. Jaffe, and J. McSpadden, "Energy Conversion and Transmission Modules for Space Solar Power," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1424-1437, Jun. 2013.
- [7] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Magazine*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [8] K. Hatanaka, F. Sato, H. Matsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase, and T. Satoh, "Power transmission of a desk with a cord-free power supply," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3329-3331, Sept. 2002.
- [9] J. Garnica, R. A. Chinga, and J. Lin, "Wireless Power Transmission From Far Field to Near Field," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1321-1331, Apr. 2013.
- [10] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, pp. 34-48, 2008.
- [11] 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.
- [12] Q. Yuan, Q. Chen, L. Li, and K. Sawaya, "Numerical Analysis on Transmission Efficiency of Evanescent Resonant Coupling Wireless Power Transfer System," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 5, Mar. 2010.
- [13] Y. Tak, J. Park, and S. Nam, "Mode-Based Analysis of Resonant Characteristics for Near-Field Coupled Small Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, vol. 8, pp. 1238-1241, Nov. 2009.
- [14] J. Oasa, D. Iwahori, and Y. Kuwahara, "Fractal antenna for wireless power transmission," *2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 443-446, Nov. 2012.
- [15] Y. Li, Z. Zhang, J. Zhang, and Z. Feng, "Compact Heptaband Reconfigurable Loop Antenna for Mobile Handset," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, vol. 10, pp. 1162-1165, Oct. 2011.
- [16] C. Christodoulou, Y. Tawk, S. Lane, and S. Erwin, "Reconfigurable Antennas for Wireless and Space Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2250-2261, Jul. 2012.
- [17] H. Gu, J. Wang, L. Ge, and C. Sim, "A New Quadri-Polarization Reconfigurable Circular Patch Antenna," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 4646-4651, Aug. 2016.
- [18] R. Meys, and F. Janssens, "Measuring the Impedance of Balanced Antennas by an S-Parameter Method," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 6, pp. 62-65, Dec. 1998.