

ウェーブガイドを用いた無線電力伝送の検討

中道 大輔, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)

概要: ウェーブガイドを用いた無線電力伝送手法を提案し, それを用いたシステムの特性の数値解析結果および実験結果について述べている. ホーンアンテナやウェーブガイドは, カットオフ周波数以下の周波数において電波を伝搬させない特性を持つ. 更に, ホーンアンテナ等に誘電体を挿入することで, 波長短縮によりカットオフ周波数より低い周波数の電波を伝搬することが可能である. 本報告では, 受信アンテナであるホーンアンテナに挿入している誘電体の有無による誘電率の変化に伴う電力伝送効率の変化について述べる.

キーワード: 無線電力伝送, ウェーブガイド, ホーンアンテナ

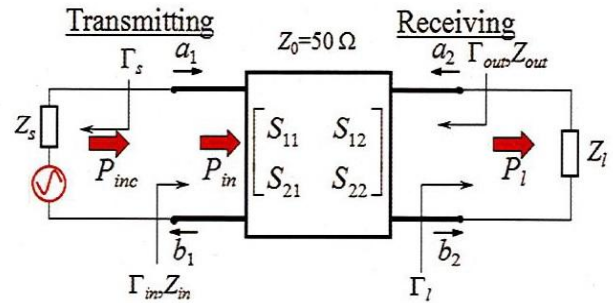


図 1. 無線電力伝送システム等価回路.

1. まえがき

近年, 無線電力伝送技術は, 電気機器などの電気製品に対する給電技術として期待されている. 無線電力伝送技術は, 遠方界放射を利用するもの[1]-[2]と近傍電磁界を利用するもの[3]-[4]に大別することが可能である. また, 後者は前者に比べて, 極めて高効率な電力伝送が可能であるため, 研究が盛んに行われている[5]-[7].

しかし, スマートフォン等の非接触充電器等の小電力の無線電力伝送技術を用いた製品が登場する一方で, 大電力の無線電力伝送の実用化には様々な課題がある. その一つとして, 漏洩電磁波が挙げられる. 大電力の電波漏れが生じた場合, 電磁干渉による他の電子機器への悪影響が考えられる. よって, 電波が漏れずに, 給電対象に対して正確に給電が可能な無線電力伝送システムが求められている.

本報告では, このウェーブガイドを用いた無線電力伝送について検討を行い, モーメント法による数値解析および実験にてシステムの評価を行った. このシステムの特徴は, 送信アンテナにウェーブガイドを用いることで, カットオフ周波数より低い周波数の電波漏れを抑制していることである. また, ウェーブガイド内では, 送受信の位置ずれによる電力伝送効率の低下を抑制することが可能である.

第 2 節では, 評価に用いた電力伝送効率の算出式について説明する. 第 3 節では提案システムを説明し, 続く第 4 節, 第 5 節では数値解析および実験結果を示し, 評価を行う. 第 6 節で本報告をまとめる.

2. 電力伝送効率の定義

今回用いる界無線電力システムを二端子回路網として図 1 に示す. 図 1 で用いる各反射係数 Γ_s , Γ_l , Γ_{in} , Γ_{out} は以下の式で定義される.

$$\Gamma_s = \frac{a_1}{b_1} = \frac{z_s - z_0}{z_s + z_0}$$

$$\Gamma_l = \frac{a_2}{b_2} = \frac{z_l - z_0}{z_l + z_0} \quad (1)$$

$$\Gamma_{in} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{z_{in} - z_0}{z_{in} + z_0}$$

$$= S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1 - S_{22}\Gamma_l} \quad (2)$$

$$\Gamma_{out} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{z_{out} - z_0}{z_{out} + z_0}$$

$$= S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s} \quad (3)$$

ここで, Z_0 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. 本報告で用いた電力伝送効率 η は入射電力で基準化した

$$\eta = \frac{P_l}{P_{inc}} \quad (4)$$

と表すことができる. ここで, P_{inc} は入射電力, P_l は受信電力を示している.

S パラメータの関係式は

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (5)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (6)$$

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,

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

$$= \frac{|S_{21}|(1 - \Gamma_s^2)(1 - \Gamma_l^2)}{|1 - \Gamma_s \Gamma_{in}|^2 |1 - \Gamma_l S_{22}|^2} \quad (7)$$

と表現することができる.

3. 提案システムの構造

検討を行った無線電力伝送システムの構造を図2に示す。送電アンテナに逆Lアンテナ，受電アンテナにホーンアンテナ(WR-187)，挿入する誘電体にはMCナイロン ($\epsilon_r = 3.7$) を用いた。逆Lアンテナの設計周波数を 2.45GHz ($\lambda_0 = 122$ mm) とした。また，送電アンテナのグランド面である銅板を折り曲げ，ウェーブガイドのような構造とすることによって，カットオフ周波数より低い周波数の x 方向の偏波を抑制した。ウェーブガイド幅 a とカットオフ周波数の波長 λ_c の関係式は，

$$\lambda_c = 2a \quad (8)$$

と表現することができる。本報告ではウェーブガイド幅 a を 5.1cm で設計した。すなわち，ウェーブガイドのカットオフ周波数は 2.94GHz ($\lambda_c = 10.2$ cm) となる。ホーンアンテナのカットオフ周波数に関しては，開口幅は 4.755cm より，カットオフ周波数は 3.16GHz となる。また，MC ナイロンを挿入した場合，波長短縮効果により，カットオフ周波数は 1.64GHz となる。カットオフ周波数を低下させることで，電力伝送効率の改善を図った。このウェーブガイド内にホーンアンテナを挿入し，無線電力伝送を行い，ホーンアンテナに取り付けられた誘電体の有無による電力伝送効率の比較を行った。

4. 数値解析結果

第3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。なお誘電体を除く各素子の素材は全て銅であり，銅損を考慮している。数値解析によって得たSパラメータの値を(8)式に代入し，電力伝送効率を求めている。提案システムは次の2つの異なる条件によって評価する。

i) w/ Dielectric

ホーンアンテナに誘電体が挿入されており， Δx 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いる。つまり，理想的な電力伝送効率である。

ii) w/o Dielectric

ホーンアンテナに誘電体が挿入されておらず， Δx 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いる。

解析結果を図3, 4に示す。図3は位置ずれ時の電力伝送効率を示している。 Δx の全ての点において，電力伝送効率ii)は0.1%程度であった。一方で，電力伝送効率i)は受電アンテナが逆Lアンテナに近づくにつれ，効率が増加した。さらに，全ての点で電力伝送効率ii)が電力伝送効率i)を上回っており，最大約70%の改善効果を確認できた。

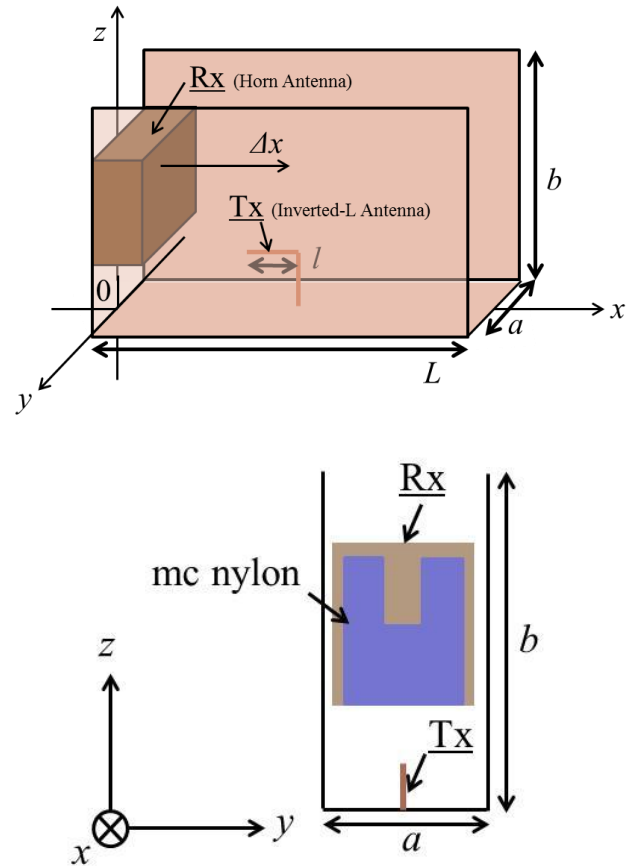


図2. 提案システムの構造.

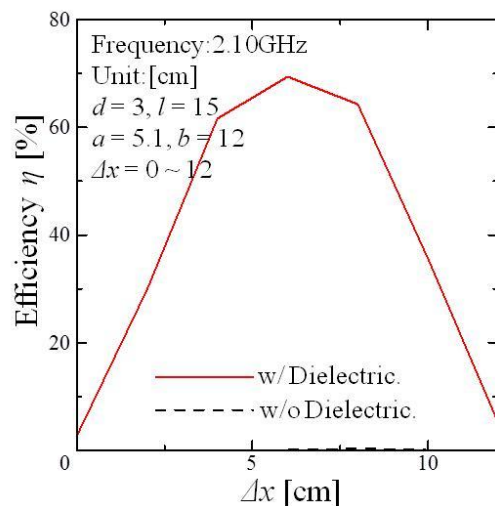


図3. 受信アンテナが位置ずれした時の電力伝送効率.

図4は $\Delta x = 6$ の電力伝送効率の周波数特性を示している。カットオフ周波数より低い周波数において電力伝送効率*i*)が無線電力伝送*ii*)を上回っていることが確認できた。また、電力伝送効率*i*)がカットオフ周波数より高い周波数では効率は低下していることも確認できた。

一方で、カットオフ周波数より高い周波数において、電力伝送効率*ii*)が電力伝送効率*i*)を上回っている周波数帯があることが図4より確認できた。この原因として、使用したホーンアンテナのカットオフ周波数である3.16GHzより高い周波数の電波がウェーブガイド外へ放射するだけでなく、ホーンアンテナに入射していったためであると推測される。

5. 測定結果

提案システムを実際に製作し、測定を行った。測定結果については、第4節で用いた条件と同様の条件で評価を行った。

測定結果を図5, 6に示す。図5は位置ずれ時の電力伝送効率を示している。解析結果と同様に、全ての点で電力伝送効率*i*)が電力伝送効率*ii*)を上回っており、最大約60%の改善効果を確認できた。また、ウェーブガイドの両端部における電力伝送効率が解析結果よりも増加する結果が得られた。一方で、解析結果と測定結果で用いた周波数が変化している原因としては、送信アンテナである逆Lアンテナの制作をした際の僅かな寸法の誤差によると推測される。

図6は $\Delta x = 6$ の電力伝送効率の周波数特性を示している。解析結果と同様に、誘電体の有無に関わらずカットオフ周波数より高い周波数において効率が低下していることが確認できた。また、カットオフ周波数より高い周波数にて、電力伝送効率*i*)が電力伝送効率*ii*)を上回ることも確認できた。

しかし、解析結果では電力伝送効率*i*)が低下するカットオフ周波数が2.9GHz付近であったが、測定結果では2.75GHz付近に変化していた。そこで、ウェーブガイド上部の幅を測定したところ、制作工程で生じた歪みによりウェーブガイド幅*a*が最大で約5.5cmとなっており、カットオフ周波数が2.72GHzであることが確認できた。よって、このウェーブガイド幅の変化がカットオフ周波数の変化の原因であると推測される。

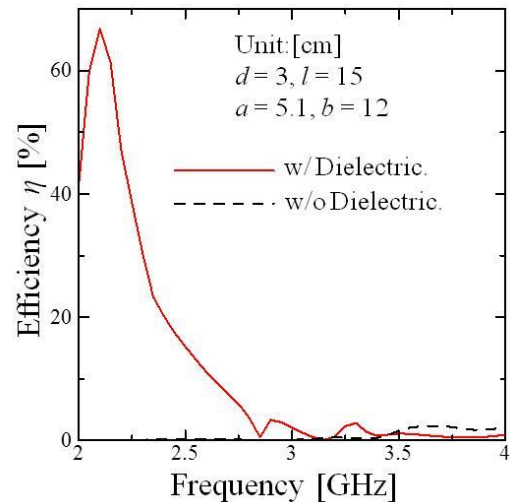


図4. 電力伝送効率の周波数特性($\Delta x = 6$).

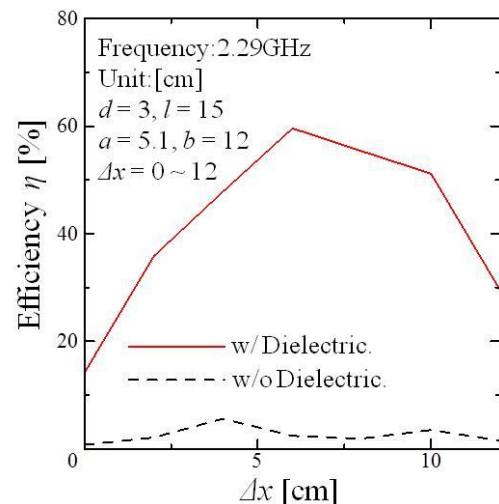


図5. 受信アンテナが位置ずれした時の電力伝送効率.

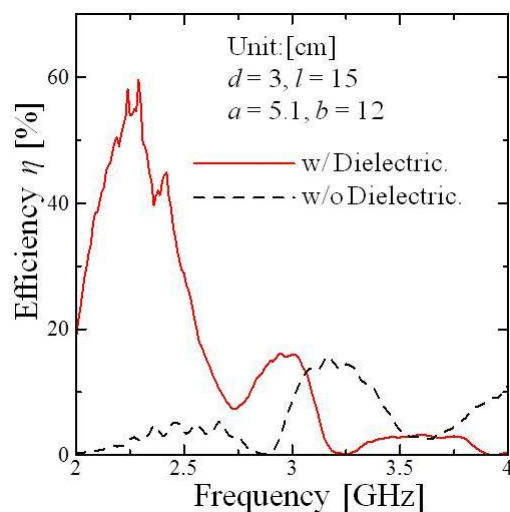


図6. 電力伝送効率の周波数特性($\Delta x = 6$).

6. むすび

本報告では、ウェーブガイドを用いた新しい無線電力伝送システムを検討した。受信アンテナであるホーンアンテナに誘電体を挿入し開口幅を電气的に変化させ、ホーンアンテナのカットオフ周波数下げることによって、電力伝送効率を変化させた。数値解析と測定によって、提案システムを評価し、電力伝送効率が大幅に改善されることを明らかにした。

参考文献

- [1] Christopher R. Valenta, Gregory D. Durgin, "Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems," IEEE Microwave Magazine, vol.15, no.4, pp. 108-120, 2014.
- [2] 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, Jul.2002.
- [3] 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 Trans. Magn., vol. 38, no. 5, pp. 3329-3331, Sep. 2002.
- [4] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, John Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Magazine, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007.
- [5] Q. Yuan, Q. Chen, 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
- [6] Q. Yuan, Q. Chen, 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.
- [7] Y. Tak, J. Park, and S. Nam, "Mode-Based Analysis of Resonant Characteristics for Near-Field Coupled Small Antenna," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, vol. 8, pp. 1238-1241, Nov. 2009.