

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：11201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23506

研究課題名(和文) マイクロ波無線電力伝送に向けた受電機消費電力ゼロの完全受動的な伝搬路推定法の確立

研究課題名(英文) Establishment of a completely passive channel estimation method with zero power consumption at receivers for microwave wireless power transmission

研究代表者

村田 健太郎 (Murata, Kentaro)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：20848030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波無線電力伝送では、受電機が電池切れの場合、送電機が受電機までの電波の伝搬経路を把握できず、給電不能となるジレンマに陥る。

そこで本研究では、受電機が電波を直流電力に変換するために搭載する整流器の特性を利用した新たな伝搬路推定法を提案する。例えば、送電機が発する電波の強弱を変化させると、整流器は強電波のみ導通させ、弱電波は導通させず反射する。このとき受電機は、信号源が無いにもかかわらずオン・オフの変調信号を送信しているように振る舞い、送電機はこの疑似的な変調信号を検出することで伝搬路を推定できる。

実験では、提案法により3m内の受電機の伝搬路を8割以上の高精度で推定可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線電力伝送システムの運用上、電池切れや通信機能を持たない受電機は不可避免的に存在し得る。しかし、このような受電機の位置をカメラ等の光学的な手段を用いずに探知することは極めて困難であり、特に受電機までの電波の伝搬経路を推定する技術はこれまでに世界的にも報告されていない。

したがって、受電機側に伝搬路推定のための特別なハードウェアや能動的な処理を必要とせず、メートルオーダーで伝搬路を高精度に推定可能とする提案技術は、電池切れ端末への高効率給電を実現するものであり、マイクロ波無線電力伝送の実用化の上で有用な技術である。

研究成果の概要(英文)：In microwave power transfer, if a power receiver runs out of battery, a power transmitter cannot grasp the microwave propagation channel to the power receiver, and thus fails to power the receiver.

Therefore, we propose a novel channel estimation technique utilizing the characteristics of the rectifier integrated in the power receiver to convert the microwave into direct current. For example, when the intensity of the microwave emitted from the power transmitter is varied, only the stronger incident wave can pass through the rectifier, but the weaker one cannot pass and is reflected. As a result, the power receiver behaves as if it transmits an ON/OFF modulated signal in spite of no signal source, and the power transmitter can estimate the channel by detecting this pseudo modulated signal.

The experiment result shows that the channel to the power receiver within 3 m can be estimated with high accuracy of more than 80% by the proposed method.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線電力伝送 レーアンテナ マイクロ波 レクテナ 整流器 伝搬路推定 負荷変調 自己干渉除去 フェーズドア

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、スマートファクトリーやスマート農業等の分野の発展により IoT センサ等の低消費電力デバイスが急速に普及している。しかし、既存デバイスの多くはケーブルまたはバッテリーを用いて電力が供給されており、配線や電池交換にかかるメンテナンスコストや設置場所の自由度が制約されることが課題となっている。そのため、ケーブル・バッテリーレスで、遠距離にあるデバイスに電力供給可能なマイクロ波電力伝送技術に対する期待が高まっている。マイクロ波電力伝送では、空間中の電波の伝搬損がシステム全体の給電効率における支配的な要因となる。そのため高効率給電を行うためには、送電側にフェーズドアレーを用い、送受電機間の電波伝搬路情報に基づき電波ビーム形成を行うことが有効である。

(2) 所望のデバイスにビーム形成を行う手法の一つとして、レトロディレクティブ方式が挙げられる（文献①）。この手法では、予め受電機が能動的にパイロット信号を送信し、これを送電機が受信することで伝搬路推定を行う。しかし、パイロット信号の送信には電力消費を伴うため、エネルギー収支の観点から、電力制約のある受電側での電力消費は最小限に抑えるべきであり、受電機側での能動的な信号の送信は避けるべきである。

(3) そこで受電機に信号源が不要な手法として、受電アンテナの後方散乱信号を利用する手法が提案されている（文献②）。この手法では、受電アンテナに接続された負荷のインピーダンスを変化させることで、送電側が送信した信号が受電アンテナにて負荷変調・再放射され、この変調信号に基づき送電側で伝搬路推定を行うことができる。ただし、負荷変調を行うためには受電機が起動状態になっている必要がある。そのため、受電機が完全に電池切れの場合、負荷変調を用いた手法であっても適用不可となる。

(4) 一方、受電機がコールド状態であっても適用可能な方法として、受電アンテナでの受電電力に応じ変調周波数が変化するリング型電圧制御発振器を利用した手法を報告されている（文献③）。この手法では、送電側でビーム走査しながら電力信号と同時にパイロット信号も送信し、受電電力に応じ負荷変調されたパイロット信号の変調周波数の高低を観測することで、受電機のトラッキングを可能としている。しかし、受電側に整流部の他、周波数変調機能を備えた負荷変調部が追加で必要となることから、受電機構成の複雑化が課題となる。

(5) 以上の理由から、受電側で能動的な処理および特別なシステムを必要としない、簡易な伝搬路推定技術が必要である。

2. 研究の目的

(1) そこで本研究では、入射電力に対するレクテナ（受電アンテナ+整流器）の反射係数の非線形特性を利用した完全受動伝搬路推定法を提案する。この手法では、送信電力を切り替えたときレクテナからの後方散乱信号が疑似的に負荷変調される現象を利用し、これを送電側で受信することで伝搬路推定を行う。これにより、受電機側に能動的な処理および整流器以外の回路を必要としない伝搬路推定が可能となる。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に提案法の概念図を示す。提案システムは、信号源と送電用アレーアンテナ、受電用レクテナから構成される。簡単化のため、信号源には単素子のアンテナ、アレーアンテナには N 素子のアンテナを仮定する。また、受電側には単素子のアンテナを仮定し、レクテナのアンテナ部は電力信号の周波数において十分に整合が取れているものとする。送電用アレーアンテナは、電力信号送電機能と伝搬路推定機能の双方を有し、伝搬路推定情報に基づくビーム形成ができるよう送電 (Tx) / 伝搬路推定 (Rx) モードを切り替えて動作することができるものとする。

(2) 以下に提案伝搬路推定法の原理および制御フローを示す。まず、信号源が 2 値の電力レベル P_H および P_L の連続波を交互に送信する（図 1(a)）。このとき送電用アレーアンテナは伝搬路推定モードで動作するものとする。ここでレクテナの反射係数が入射電力に対して非線形に変化するため、疑似的に 2 値で変調された散乱波を生じる。これら 2 値の送信電力に対するレクテナの反射係数を Γ_H および Γ_L とすると、アレーアンテナにおける受信信号は、

$$\mathbf{y}_H = (\mathbf{h}_D \Gamma_H \mathbf{h} + \mathbf{h}_U) \sqrt{P_H} e^{j\theta_H} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\mathbf{y}_L = (\mathbf{h}_D \Gamma_L \mathbf{h} + \mathbf{h}_U) \sqrt{P_L} e^{j\theta_L} \quad \dots \text{式(2)}$$

と表せる。なお、 \mathbf{h}_D 、 \mathbf{h} および \mathbf{h}_U はそれぞれ、レクテナ/アレーアンテナ間、信号源/レクテナ

間、信号源／アレーアンテナ間の伝搬路係数を表している．また θ_H および θ_L は送信電力制御時に信号源で生じる位相回転を表しており、これら情報は事前測定またはオンライン測定可能であるものとし、既知とする．

(3) ここで、式(1)および式(2)の括弧内の第1項はレクテナからの後方散乱信号成分、第2項は信号源からの自己干渉信号成分を表している．このとき、自己干渉信号は送信電力に対して線形に変化するのに対して、後方散乱信号は非線形に変化する (図 1(b))．そのため、送信電力比および送信電力切り替え時の位相回転情報を考慮の上、受信信号をスケーリングし、デジタル領域において減算することで、

$$\hat{h}_D = \mathbf{y}_H - \mathbf{y}_L \sqrt{\frac{P_H}{P_L}} e^{j(\theta_H - \theta_L)} = \left[(\Gamma_H - \Gamma_L) h \sqrt{P_H} e^{j\theta_H} \right] \mathbf{h}_D \quad \dots \text{式(3)}$$

が得られる．ここで式(3)の角括弧内の係数は複素数のスカラーであることから、アレーアンテナ間の伝搬路係数の相対的な位相および振幅に影響しない．このようにして、自己干渉信号を除去し、レクテナからの後方散乱信号を抽出することができ、受電機からの能動的なフィードバック不要で伝搬路の推定が可能となる．そして送電用アレーアンテナはこれに基づきビーム形成を行うことで、レクテナへの高効率給電が可能となる (図 1(c))．

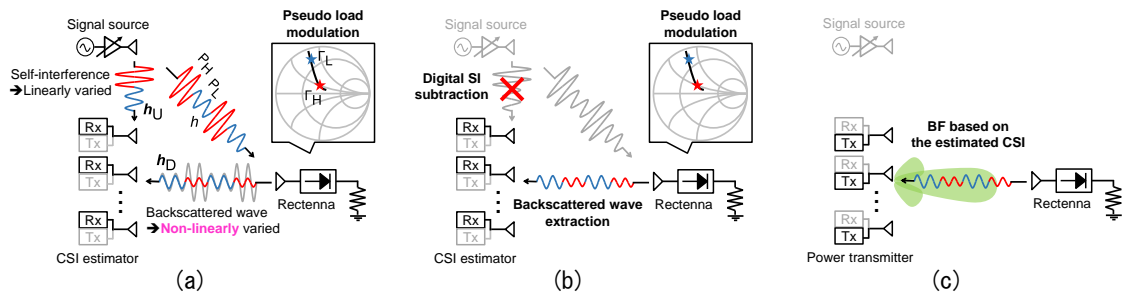


図 1 提案法の概念図

4. 研究成果

(1) 本実験ではマイクロ波電力伝送で想定されるレクテナ整流部の一例として、図 2 に示す倍電圧整流回路を使用し、提案法に基づき伝搬路推定を行う．試作整流器のダイオード D_1 および D_2 には、Skyworks 社製ショットキーダイオード SMS7630-006LF を使い、キャパシタンス C_1 および C_2 はともに 68 pF、抵抗 R は 1.6 k Ω とした．なお、本実験での基本周波数を 2.4 GHz とする．図 3 に入射電力に対する反射係数の変化を示す．このとき、整流器への入射電力を -30 dBm から 9 dBm まで変化させた．図 3 から、入射電力に対して整流器の反射係数が非線形に変化していることが確かめられた．また参考までに図 4 に試作整流器の整流効率を示しており、最大で 61.2% の整流効率を得られることが分かった．

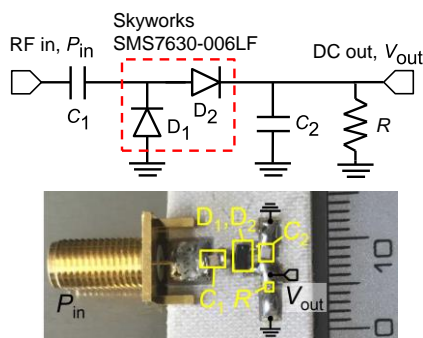


図 2 試作整流器

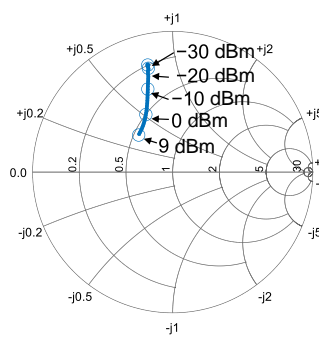


図 3 反射係数

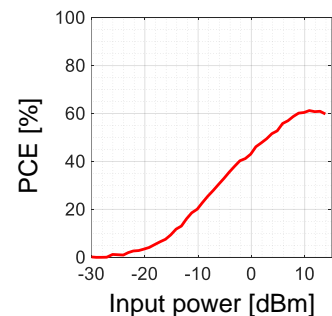


図 4 整流効率

(2) 図 5 および図 6 に本実験系の概要および実験風景を示す．本実験はシールドルーム内のマルチパス環境下で実施した．図 5 に示すように、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) のポート#1 後段にアンプおよび可変減衰器を接続し、減衰量を制御することで送信電力の切り替えを行う．このとき 2 値の送信電力が $P_H = 30$ dBm、 $P_L = 20$ dBm となるように減衰量を制御した．また、ポート#2 には SP16T を介してアレーアンテナを、ポート#3 には SPDT を介してレクテナを接続している．信号源とレクテナには単素子パッチアンテナを、アレーアンテナには素子間

隔を 0.5 波長とした 16 素子のパッチアンテナを用いた。ここで図 6 のように直交座標を定義し、アレーアンテナの位置座標を(0, 0, 1) m, 信号源の位置座標を(1, 0, 1) m となるように配置した。さらに、レクテナの位置座標を(X, Y, 1) とし、 $X=0\sim 1$ m, $Y=1\sim 3$ m (0.1 m 間隔) の計 231 点で測定を行い、位置毎に推定精度評価を行う。

(3) 以下に本実験の手順を示す。まず、受電アンテナを SPDT スイッチを介して整流器に接続する。そして、減衰器を上述の値で制御することで送信電力を切り替え、このときの受信信号の変化を測定する。次に SPDT を切り替え、受電アンテナを VNA のポート#3 に接続し、レクテナ／アレーアンテナ間の真の伝搬路 h_D を測定する。このとき同時に、信号源／レクテナ間の伝搬路 h および信号源／アレーアンテナ間の自己干渉伝搬路 h_U を取得する。ただし、これらは推定精度評価および考察に用いるものとし、提案法適用時は未知であるものとして扱う。さらに、本実験では常開型の SPDT を使用しており、参考までにレクテナの負荷を開放状態としたときの受信信号も測定する。以上の測定を上述のレクテナ位置毎に行い、提案法を適用し伝搬路推定を行う。そして、推定伝搬路と、測定した真の伝搬路との相関係数

$$\rho = \frac{|\hat{h}_D^H h_D|}{\|\hat{h}_D\|_2 \|h_D\|_2} \quad \dots \text{式(4)}$$

を推定精度と定義し評価する。ここで H , $|\cdot|$, $\|\cdot\|_2$ はそれぞれ複素共役転置, 絶対値, ユークリッドノルムを表している。

(4) 伝搬路推定精度の評価にあたり、以下に示す 2 つの手法と比較することで提案法の有効性を評価する。

第 1 に、伝搬路情報が完全に未知である場合を仮定して、ランダムに伝搬路を決定したものを比較対象とする。これは文献②において比較対象に用いられた手法と同様のものである。本検討では、レクテナ位置毎に 1000 個のランダムな伝搬路候補を生成し、これらの推定精度の平均値を評価する。

第 2 に、自己干渉除去を行わず後方散乱信号に基づき伝搬路を推定する手法を比較対象とする。具体的に、受電アンテナ負荷を入射電力に依存しない開放負荷としたときの受信信号を伝搬路情報として扱う。この受信信号には、受電アンテナで損失なく反射した後方散乱信号成分に加え、不要な自己干渉信号成分が含まれる。ただし提案法とは異なり、開放負荷の場合、いずれの信号成分も線形に変化してしまうため、減算処理による信号の分離は不可能である。したがって、この受信信号を推定伝搬路とみなして評価することで、提案法による自己干渉除去が伝搬路推定精度へ与える効果を評価することができる。

(5) 図 7 にレクテナ位置毎の伝搬路推定精度を示す。図 7(a), (b)および(c)はそれぞれ、前述の第 1, 第 2 の比較対象および提案法適用時の伝搬路推定精度を示している。

まず、図 7(a)では、レクテナ位置に依らず平均推定精度が一律に低いことが分かる。この結果は、伝搬路情報が未知の場合、ランダムなビーム形成では高効率給電は期待できないことを示唆している。また、図 7(b)では、全点にわたり伝搬路推定精度が 0.6 以下であり正しく推定できないことが確認できる。つまり、レクテナで損失なく後方散乱した場合（言い換えれば後方散乱信号の電力が最大となるときの）でも、所望後方散乱信号成分が自己干渉信号に埋没するため、推定精度が劣化したものと考えられる。したがって、単一送信電力値のみを用いた場合では自己干渉の影響により高精度の伝搬路推定が不可能であることが示された。

一方で、図 7(c)に示すように、提案法を適用した場合、全測定点 231 点中 221 点で 0.8 以上の伝搬路推定精度を達成し、距離 3m 内の広範囲で高精度な伝搬路推定が可能であることが示された。これは前述の通り、提案法では 2 値の送信電力制御によってレクテナ反射係数の非線形変化が得られたことで、線形的に変化する自己干渉を減算しつつ所望後方散乱信号成分の抽出に成

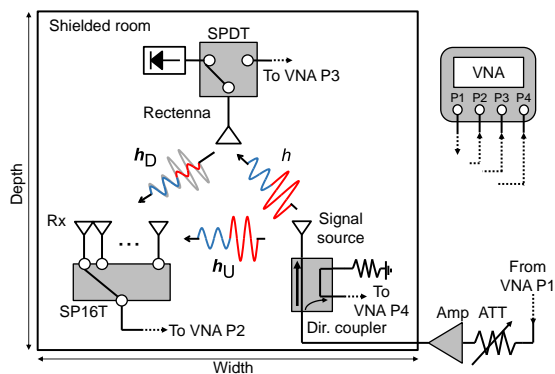


図 5 本実験系の概要

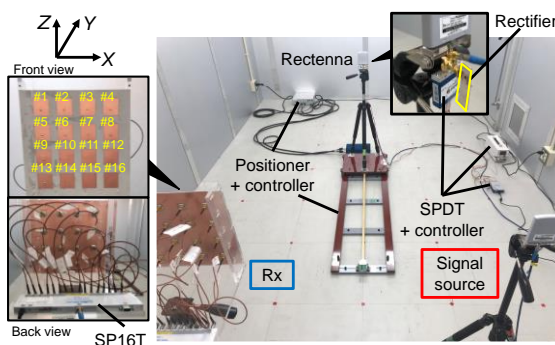


図 6 実験風景

功したためである。

(6) 最後に図 8 にレクテナ位置毎の伝搬路推定精度の累積分布関数 (cumulative distribution function, CDF) を示す。図から、例えば推定精度の中央値を比較すると、第 1 の比較対象では推定精度 $\rho=0.224$ 、第 2 の比較対象では推定精度 $\rho=0.263$ であるのに対して、提案法適用時は推定精度 $\rho=0.961$ と、推定精度の大幅な向上が確認でき、提案法の有効性を実証することができた。

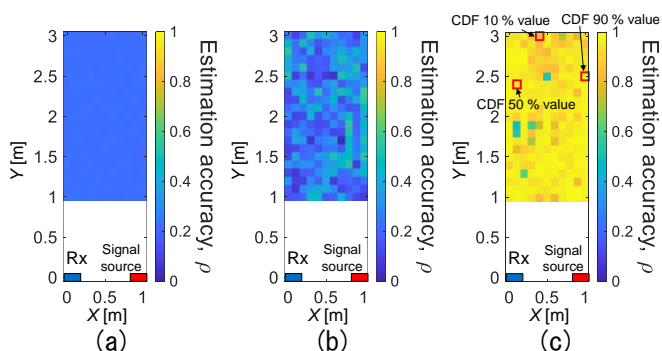


図 7 レクテナ位置毎の伝搬路推定精度

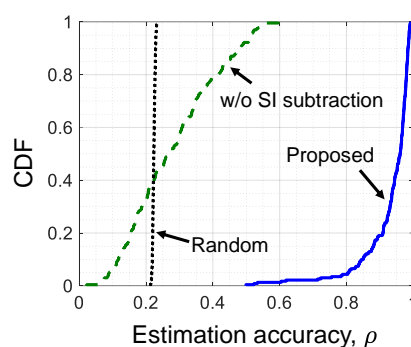


図 8 伝搬路推定精度の CDF

<引用文献>

- ① G. Pabbisetty, K. Murata, K. Taniguchi, T. Mitomo, and H. Mori, Evaluation of space time beamforming algorithm to realize maintenance-free IoT sensors with wireless power transfer system in 5.7-GHz band, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 67(12), 2019, 5228-5234
- ② D. Arnitz and M. S. Reynolds, MIMO wireless power transfer for mobile devices, IEEE Pervasive Computing, 15(4), 2016, 36-44
- ③ D. Belo, D. C. Ribeiro, P. Pinho, and N. Borges Carvalho, A selective, tracking, and power adaptive far-field wireless power transfer system, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 67(9), 2019, 3856-3866

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 近藤慎之介, 小田島祥太, 及川航世, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波電力伝送に向けた完全受動伝搬路推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤慎之介, 小田島祥太, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波電力伝送に向けた受動伝搬路推定法の有線接続評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤慎之介, 小田島祥太, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波電力伝送に向けた受動伝搬路推定法の有線試験系評価
3. 学会等名 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤慎之介, 小田島祥太, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波電力伝送に向けたブラインド受動伝搬路推定法～レクテナの後方散乱波を含む信号相関行列に対する電力軸平均の適用～
3. 学会等名 アンテナ・伝播研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinnosuke Kondo, Shota Odajima, Kentaro Murata, Naoki Honma
2. 発表標題 Passive Channel Estimation Technique for Microwave Wireless Power Transfer
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【受賞】</p> <p>(1) 2020年度 電子情報通信学会東北支部 優秀学生表彰, 受賞者: 近藤 慎之介, 所属: 岩手大学</p> <p>(2) 2020年度下半年 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員会学生奨励賞, 受賞者: 近藤 慎之介, 所属: 岩手大学</p>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------