

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18051

研究課題名(和文) マイクロ波無線電力伝送による遭難者探索システムの研究開発

研究課題名(英文) Study on a Victim Detection System by Microwave Power Transfer

研究代表者

三谷 友彦 (Mitani, Tomohiko)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：60362422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はマイクロ波無線電力伝送による遭難者探索システムの確立であり、送電システムとしてのマスタースレーブ型位相制御マグネトロン、および受電システムとしてのバッテリーレス受電端末の研究開発に取り組んだ。研究成果として、位相安定度 $\pm 1^\circ$ 以下の電力可変型位相制御マグネトロンの構築に成功した。また、受信端末用の倍電圧型レクテナ(アンテナ+整流回路)を開発し、1cm角あたり1mWのマイクロ波電力密度条件下で最大効率47.4%を達成した。倍電圧型レクテナから再放射される高調波に着目したレクテナの位置推定手法も検討し、高調波再放射パターンが電磁界シミュレーションと実測でよく一致することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present study is establishment of a victim searching system by using microwave power transfer. Studies on a master-slave-type phase controlled magnetron as a transmitting system and a battery-less power receiver as a receiving system were conducted. As study outcomes, a power-variable phase-controlled magnetron was developed within 1 degree of the output phase stability. A voltage-doubler type rectenna (antenna and rectifier) for the receiver was also developed. Its maximum rf-dc conversion efficiency was 47.4% under the microwave power density condition of 1mW per square centimeter. Utilizing re-radiation of harmonics from the rectenna, a method of rectenna position estimation was also investigated. The measured re-radiation patterns of harmonics were almost consistent with electromagnetic simulations.

研究分野：マイクロ波応用工学

キーワード：無線電力伝送 マイクロ波 レクテナ マグネトロン

1. 研究開始当初の背景

2 地点間の電力伝送を無線で行う「無線電力伝送」は、近年非常に注目されている技術であり、電気自動車への無線給電や小型機器への電力供給等の様々な応用が期待されている。本研究は、無線電力伝送の方式であるマイクロ波帯の電波方式を用いた無線電力伝送の研究である。電波方式の場合、他の方式（電磁誘導、電磁界結合）と比較して、送受電間距離数十 m 以上の遠方への無線電力伝送が可能である。例えば我々の研究グループでは、2007 年から 2009 年にかけて「飛行船からのマイクロ波無線電力伝送デモ実験」を実施し、30m 上空の飛行船に搭載されたマイクロ波送電器から 220W 程度のマイクロ波を出力し、地上でマイクロ波を受電して LED を点灯させる等のデモ実験を行った。

本研究では、電波方式無線電力伝送の利点を活かし、緊急用の電力供給手段としての「マイクロ波無線電力伝送による遭難者探索システム」を着想した。本システムの概念図を図 1 に示す。本システムの概要は以下の通りである。(I)「バッテリーレス受電端末」を登山時あるいは普段から身に着ける所有物に携帯する。(II)遭難や災害が発生した際、ヘリコプター等の上空あるいは緊急車両等の地上から「マイクロ波送電器」を操作し、マイクロ波電力を当該区域に放射する。(III)ワイヤレス受電端末はマイクロ波送電器からのマイクロ波電力を受電することにより起動し、その電力を利用して応答信号を発生する。(IV)探索者は、その応答信号を受信することで端末位置を認識することができる。

本システムの重要な特徴として、遭難者は被災時において何も操作する必要がないため、ケガや意識不明時にも端末探索が可能となる点が挙げられる。また、バッテリーレス受電端末にはそもそも電池が存在しないため、電池切れや電池交換の心配がない。更に、バッテリーレス受電端末の存在範囲はマイクロ波電力ビーム範囲内に限定できるため、より迅速な遭難者の発見が期待される。

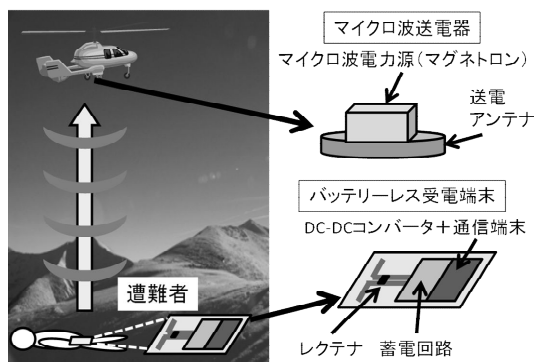


図 1 マイクロ波無線電力伝送による遭難者探索システムの概念図

2. 研究の目的

本研究の目的は、マイクロ波無線電力伝送

による遭難者探索システムの確立である。本研究では、マイクロ波無線電力伝送により起動・応答するバッテリーレス受電端末を開発し、遭難者側が何ら操作をしなくても位置信号を発信することが可能な遭難者探索システムの基礎技術実証を行う。研究開発要素として、「マスタースレーブ型位相制御マグネトロンの研究開発」および「バッテリーレス受電端末の研究開発」を実施する。

マスタースレーブ型位相制御マグネトロンは、マイクロ波送信器に搭載されるマイクロ波電力源として使用される。ヘリコプター等の上空からマイクロ波を照射する場合、半導体増幅器では出力不足が予想されるため、電子レンジのマイクロ波源として広く利用されているマグネトロンを複数台用いて送電器を構築する。ただし、マグネトロンの発振周波数には個体差が存在するため、複数台のマグネトロンから出力されるマイクロ波電力を合成するには、マグネトロンの発振周波数を統一させる必要がある。そこで、本研究ではマグネトロンの周波数および位相を統一させる仕組みとして、我々の研究グループで過去に開発した位相制御マグネトロンを適用する。位相制御マグネトロンとは、基準信号の周波数・位相にマグネトロンのそれらを同期させる方法である。本研究では基準信号に対して周波数同期・位相同期が実現した位相制御マグネトロンをマスター送電器として使用し、結合回路を通じてマスター送電器と複数台のスレーブ送電器を結合することで、マイクロ波電力源の周波数の統一を目指す。

バッテリーレス受電端末の研究開発は、図 1 に示すように、マイクロ波電力を直流電力に整流するレクテナ、直流電力の蓄電回路、電圧変換する DC-DC コンバータおよび通信端末により構成される。このバッテリーレス受電端末にマイクロ波が照射されると、通信端末が起動し、受電端末の位置が特定される仕組みである。研究開始当初は、この受電端末構成で検討を始めたが、研究を進めたところ、レクテナから再放射される高調波を到来方向推定用のパイロット信号としてそのまま利用すれば受電端末の位置が特定できる可能性があることを発見し、本研究ではレクテナからの高調波再放射を利用した到来方向推定の研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) マスタースレーブ型位相制御マグネトロンの研究開発

マスタースレーブ型位相制御マグネトロンを実現するにあたり、個々のマグネトロンのマイクロ波出力が可変で調整できるように、電力可変型位相制御マグネトロンの構築を行った。この際、送電器にとっては周波数安定度および位相安定度が重要である。よって、電力可変型位相制御マグネトロンの安定度向上を目指した実験的研究を行った。

(2) バッテリーレス受電端末の研究開発

レクテナからの高調波再放射を利用するには、基本波を受信でき、かつ高調波が放射されるアンテナが必須となる。そこで、本研究では半波長ダイポールアンテナをレクテナに用いることにし、レクテナからの再放射パターンを実験により測定し、電磁界シミュレーションにより確認を行った。

また、レクテナ整流回路に倍電圧型構成のダイオードを採用した。この倍電圧型レクテナの回路動作検証を回路シミュレーションにより実施するとともに、実測による評価を行った。

4. 研究成果

(1) マスタースレーブ型位相制御マグネトロンの研究開発

図2に電力可変型位相制御マグネトロンの実験結果の一つであるマグネトロンの出力位相および出力電力の時間変化を示す。図2では、マグネトロン出力を10s毎に変化させている。一方、マグネトロンの出力位相は 0° に固定されたままである。よって実験結果から、マグネトロンの出力が変化してもマグネトロンの周波数や位相は固定されたままで推移していることが分かる。

また、構築した電力可変型位相制御マグネトロンの位相安定度は $\pm 1^\circ$ 以下であり、マグネトロン出力が変化してから周波数同期および位相同期が固定されるまでの時間は $50\mu\text{s}$ 以下であった。

この電力可変型位相制御マグネトロンをマスター送電器とし、マスタースレーブ型位相制御マグネトロンを実現することが今後の研究課題である。

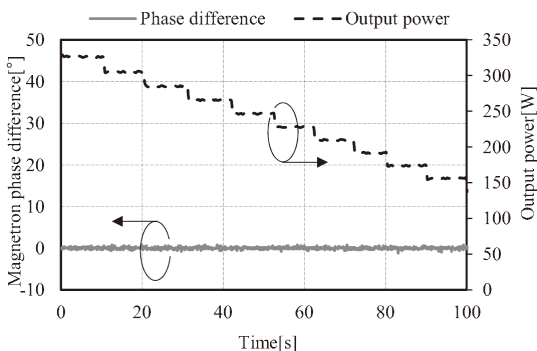


図2 電力可変型位相制御マグネトロンの出力および位相の時間変化

(2) バッテリーレス受電端末の研究開発

本研究で開発した倍電圧型レクテナの写真を図3に示す。レクテナの回路基板として、比誘電率3、誘電正接0.0008、厚さ $50\mu\text{m}$ の誘電体基板を用いた。半波長ダイポールアンテナの給電点に整流用ショットキーダイオード(Avago HSMS-286C)を接続し、平滑用コンデンサを経て直流電圧が出力される。

このレクテナの負荷に対する出力電圧およびマイクロ波-直流(rf-dc)変換効率の回路シミュレーション結果および測定結果を

図4および図5に示す。測定結果より、倍電圧型レクテナは負荷 $1.5\text{k}\Omega$ の時に最大変換効率 47.4% となった。

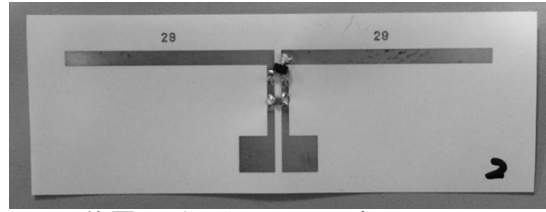


図3 倍電圧型レクテナの写真

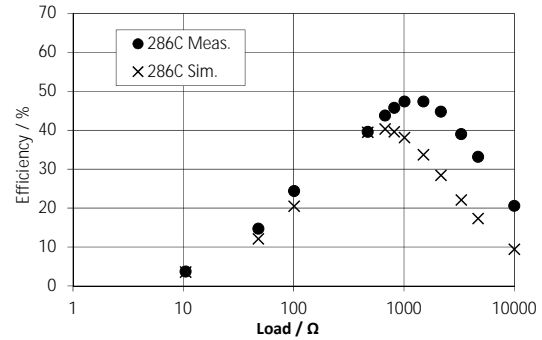


図4 倍電圧型レクテナのrf-dc変換効率 (Meas.: 実験結果、Sim.: シミュレーション結果)

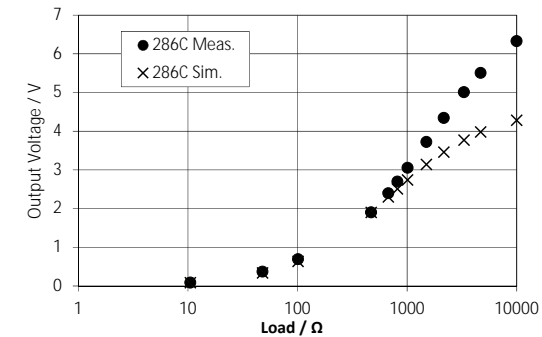


図5 倍電圧型レクテナの出力電圧 (Meas.: 実験結果、Sim.: シミュレーション結果)

実験結果およびシミュレーション結果のいずれも、倍電圧型レクテナは高抵抗負荷時に倍電圧動作をしていることが判明した。ただし、このレクテナは従来の倍電圧型整流回路とは大きく異なり、入力側(アンテナ側)に電荷蓄積用コンデンサを搭載していない。それにも関わらず倍電圧動作が実現されていることから、回路シミュレーションによるレクテナ動作の詳細な解析を行った。その結果、整流用ショットキーダイオードの接合容量およびダイオードのパッケージ容量が電荷蓄積用コンデンサと同等の役割を果たしていることが明らかとなった。本研究成果は雑誌論文で報告した。

次に、倍電圧型レクテナからの高調波再放射パターンの電磁界シミュレーションおよび実測を行った。2次高調波再放射パターンの電磁界シミュレーション結果および実測結果を図6および図7に示す。図中の l は半波長

ダイポールアンテナの片側のアンテナ長を表す。シミュレーション結果および実測結果のパターンはほぼ一致しており、想定通りの再放射パターンが得られていることが分かる。

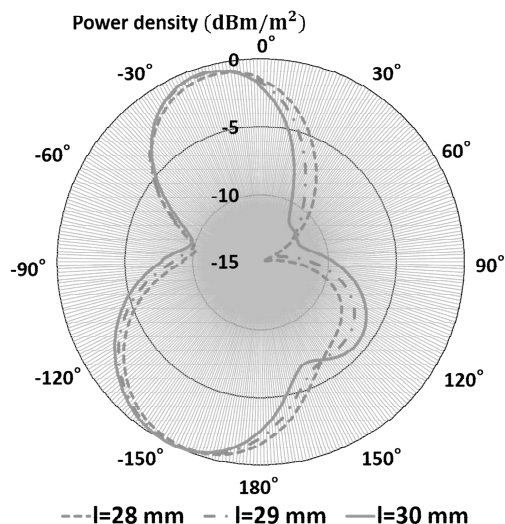


図 6 倍電圧型レクテナの 2 次高調波再放射パターンの電磁界シミュレーション結果

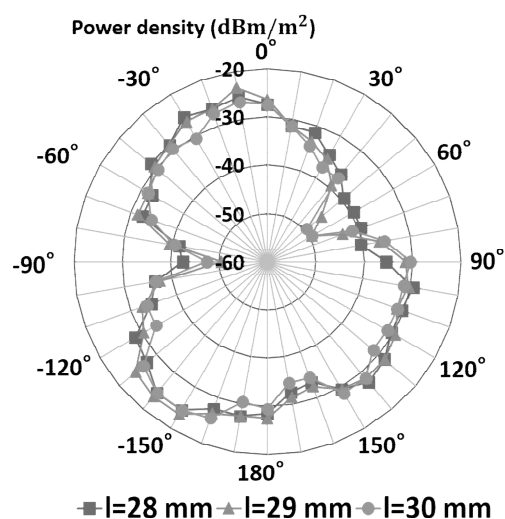


図 7 倍電圧型レクテナの 2 次高調波再放射パターンの実測結果

さらに、2 次高調波再放射をパイロット信号として扱うことでレクテナ位置の推定が可能かどうかを実験的に検証した。その結果、高調波到来角度 $\pm 30^\circ$ の範囲において角度推定誤差 $\pm 4.1^\circ$ 以内に収まることが明らかとなった。

以上より、角度推定誤差は今後改善する必要があるものの、2 次高調波再放射による到来方向推定の原理検証実験には成功した。これは、当初予期していなかった研究成果であり、本研究を通じてマイクロ波無線電力伝送の方向推定手法の新たな知見が得られた。

今後は、角度推定誤差を小さくするための手法を検討するとともに、高調波到来方向に送電マイクロ波を送り返すためのシステム構築を検討する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Tomohiko Mitani, Shogo Kawashima, and Taiga Nishimura, Analysis of Voltage Doubler Behavior of 2.45-GHz Voltage Doubler-Type Rectenna, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 査読有, vol.65, 2017, 1051-1057
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2668413>

〔学会発表〕(計 7 件)

川島祥吾、篠原真毅、三谷友彦、半波長ダイポール型レクテナからの高調波再放射特性の研究、電子情報通信学会総合大会、CK-2-5、名古屋、2017 年 3 月 24 日

川島祥吾、篠原真毅、三谷友彦、高調波利用型レトロディレクティブのための高調波到来方向推定システムの研究、電子情報通信学会無線電力伝送研究会、WPT2016-79、京都、2017 年 3 月 7 日

Shogo Kawashima, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mitani, Study on Rectenna Harmonics Reradiation for Microwave Power Transfer with a Harmonics-Based Retrodirective System, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, Okinawa, Japan, 2016 年 10 月 26 日

Shogo Kawashima, Naoki Shinohara, and Tomohiko Mitani, Study on Re-radiation Characteristics of Rectenna Harmonics for a Harmonic-Based Retrodirective System, 2016 IThailand-Japan Microwave, Bangkok, Thailand, 2016 年 6 月 10 日

川島祥吾、篠原真毅、三谷友彦、高調波再放射利用型レトロディレクティブのためのレクテナからの高調波再放射特性の研究、電子情報通信学会マイクロ波研究会、MW2016-26、京都、2016 年 5 月 20 日

Tomohiko Mitani, Shogo Kawashima, and Taiga Nishimura, A Feasibility Study on a Voltage-Doubler-Type Rectenna, IEEE MTT-S Wireless Power Transfer Conference, Aveiro, Portugal, 2016 年 5 月 5 日

三谷友彦、川島祥吾、西村泰河、レクテナの倍電圧回路動作に関する基礎検討、電子情報通信学会無線電力伝送研究会、WPT2015-86、京都、2016 年 3 月 8 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：無線電力供給システム
発明者：三谷友彦、玉置賀浩、小野晃義、岸本篤始、藤原暉雄、小川重行、野波健蔵
権利者：国立大学法人京都大学、玉置電子工業株式会社、株式会社オリエントマイクロウェーブ、日本軽金属株式会社、株式会社翔エンジニアリング、株式会社菊池製作所、株式会社自律制御システム研究所
種類：特許
番号：特願 2015-140999
出願年月日：2015 年 7 月 15 日
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

学会発表 において、TJMW2016 Best Presentation Award を受賞した。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

三谷 友彦 (MITANI, Tomohiko)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号： 6 0 3 6 2 4 2 2