

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560358

研究課題名(和文) 遠隔操作する対象物にワイヤレス給電できるミリ波送電システムの開発

研究課題名(英文) Study on Wireless Power Transmission for Remote Controlled Objects

研究代表者

安藤 浩哉 (Hiroya, Andoh)

豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授

研究者番号：30212674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波の直進性を利用して、パラボラアンテナ等の指向性の良いアンテナを用いて離れた場所の移動物体に給電することを目的として、ホーンアンテナを一次放射器とする直径約40cmのパラボラアンテナを1500mmを隔てて配置した電力伝送系を、準光学的な手法で設計し、製作した電力伝送系で伝送効率の測定を行った。その結果、17.5GHz～19GHzの帯域で、約40%～45%の電力伝送効率を達成でき、伝送距離が1500mm±10%変化しても、ほぼ同じ電力伝送効率を達成できることが分かった。また、マイクロ波が伝わる平面の周囲の境界条件を変化させることで信号の流れを変えるデバイスの設計・製作・評価を行った。

研究成果の概要(英文)：A wireless power transmission system, which works in the range of frequencies of 17.5GHz to 19.0GHz, is designed by using methods of quasi-optics and which characteristics are experimentally measured. The system consists of two parabolic antennae of 400mm in diameter and the distance between two parabolic antennae is 1500mm. The power transmission efficiency of the system is 40% to 45%. Small distance changes do not influence the power transmission efficiency. A passive device made of two-dimensional transmission plane, which characteristics is depend on the boundary condition of the two-dimensional transmission plane, is proposed, designed and evaluated experimentally.

研究分野：マイクロ波、信号処理

キーワード：ワイヤレス給電 マイクロ波送電 準光学回路

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波送電技術は、エネルギー問題や地球環境問題を解決し得る宇宙太陽発電システム（1968年、米国のDr.P.E.Glaserが提唱）の基幹技術であるだけでなく、離島等への電力伝送や、電気自動車へのワイヤレス給電などに用いることのできる技術である。2006年に提案された磁界共鳴方式のワイヤレス電力伝送は、コイルとコンデンサを共振器として用いるために、数cm～数mの範囲の離れた位置での送受電が可能である。また、複数の機器に対しても同時に給電できることから、公共の場でのモバイル機器や自動車やロボットへの給電システムへの応用が期待できる。しかしながら、これまでの研究では、給電側と受電側の位置関係が大きく制限されており、数10m四方の範囲で動き回る対象物に給電することは実現できていない。

2. 研究の目的

マイクロ波領域の電磁波には直進性があるために、パラボラアンテナ等の指向性の良いアンテナを用いれば、移動体を追尾することにより、受電者の限定ができ、数10m四方の範囲で移動する対象物に給電すること可能になる。さらに、送電信号にデジタル信号処理で暗号化した情報を重畳させれば、受電側の対象物をセキュリティを保ちながら制御することが可能になる。そこで、本研究では、給電側と受電側にパラボラアンテナ等の指向性のあるアンテナを用い、距離がある程度変化しても効率よく給電ができる暗号化情報が重畳可能なミリ波電力送電システムの開発を主たる目的とする。

3. 研究の方法

(1) 1次元の伝送線路と同じように、シートインダクタンスが L 、単位面積当たりのキャパシタンス C である平行平板の平面構造（2次元伝送平面）にも、電圧：電流の比率が、 $Z = \sqrt{L/C}$ であるような電圧の平面波と電流の平面波が存在する。このことを利用して、2次元伝送平面の解析を行なうことができる。受電側には軽量のパッチアンテナ等の平行平板の平面構造（2次元伝送平面）を有するアンテナが適当であると考え、2次元伝送平面の境界条件が2次元伝送平面の周波数特性におよぼす影響を調べ、指向性を切り替えるために必要な平行平板の平面構造に関する考察・製作・測定・評価を行なう。図1に本研究が指向性などを切り替えるために計画したパッチアンテナなどへの給電方法の概要図を示す。図1の下側の伝送平面は周囲にオープンとショートとを切り替えることができる高周波スイッチを複数個取り付けた構造を持っている。つまり、伝送平面の周囲の境界条件を変えるために、伝送平面の周囲のある点をショートの状態にして、その点で伝送平面を伝搬する波を固定端反射させることで、伝送平面内部にある出力ポートに

出力できるような制御技術を開発することを目指す。

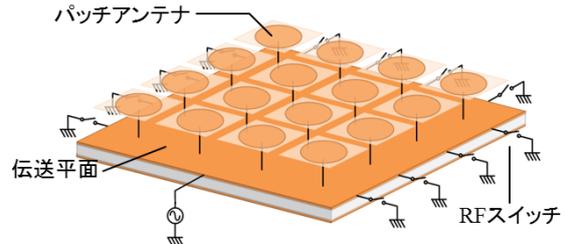


図1. 伝送平面ポート切替器の概要図

(2) ミリ波やサブミリ波等の直進性に優れた周波数領域の電磁波は、ガウシアンビームを用いて準光学的に設計を行なうことができる。ガウシアンビームのビーム幅が最も小さい値 w_0 となる場所から z 離れた位置でのビーム幅 $w(z)$ 、同位相面の曲率半径 $R(z)$ は、

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_0)^2} \quad (1)$$

$$R(z) = z + z_0^2/z \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ は共焦点距離、 λ は電磁波の波長である。これらの関係式を用いることで、ミリ波の伝送路を準光学的に設計することができる。送電側には受電側と比べて大きなアンテナが利用できるため、パラボラアンテナを準光学的な手法を用いて設計・製作し、ミリ波伝送効率の評価を行なう。

4. 研究成果

(1) 伝送平面内にあるポートの切替

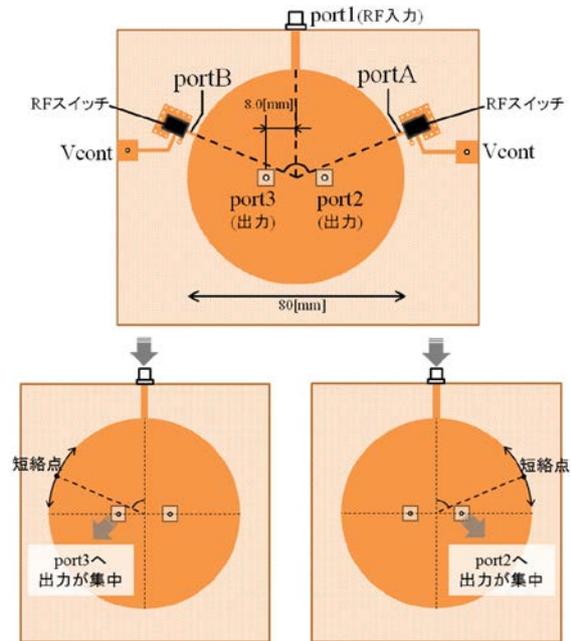


図2. 伝送平面内にあるポートの切替

図2（上側の図）に示すような構造を想定して、伝送平面の周囲の点（円周上2時方向の位置にあるportAと円周上10時方向にあるportB）の境界条件を変化させることで、伝送平面内の異なるポート（伝送平面中心から右寄りの位置にあるport2と伝送平面中心から

ら左寄りの位置にある port3)へ選択的に信号を出力できることを見出した。図 2 (下側の図) に示すように、portB を短絡すると port1 から入った信号は主に port3 へ出力され、portA を短絡すると port1 から入った信号は主に port2 へ出力される。

図 3 および図 4 に、伝送平面内にあるポートの切替に関する周波数特性を示す。これらの図から分かるように、1.37GHz の周波数において、伝送平面の周囲の 2 点の境界条件(オープン or ショート) を変えることで、伝送平面内の異なる 2 つの出力ポートに 70%以上の電力を振り分けることができることが分かる。ただし、2 つの出力ポート間のアイソレーションは確保できていない。

実装例を図 5 に示す。

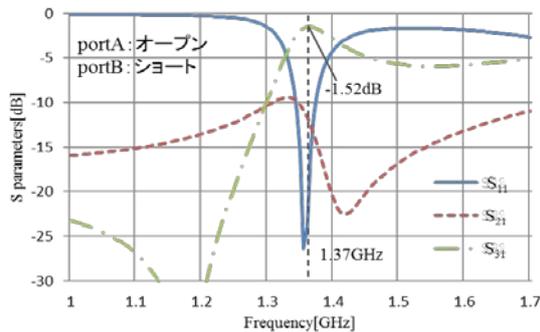


図 3. portB 短絡時の伝送平面の周波数特性

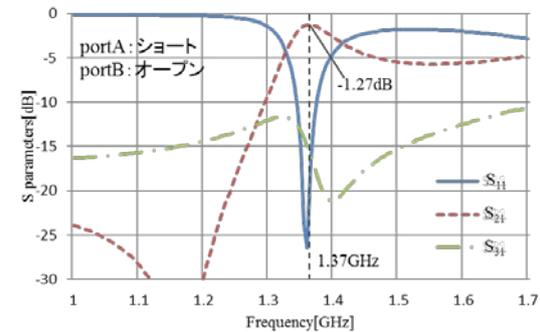


図 4. portA 短絡時の伝送平面の周波数特性

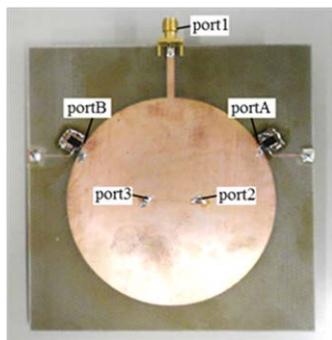


図 5. 伝送平面内ポート切替器

(2) 電力伝送系の準光学的設計

電力伝送系を準光学的に設計するためには、伝送系においてガウシアンビームのビーム幅 w や同位相面の曲率半径 R が連続になるように設計する必要がある。前述の式(1)と式(2)から、 w , w_0 , R , z の 4 つの変数のうち 2 つを決めると残りの 2 つも決まること

が分かる。本研究では、式(1)と式(2)以外に、式(1)と式(2)から、 w と R から w_0 を求める式、 w と R から z を求める式、 w と z から w_0 を求める式、の 3 つの次の関係式を導出して、準光学系の設計に利用した。

$$w_0 = w / \sqrt{\pi^2 w^4 / R^2 + 1} \quad (3)$$

$$z = R / (\pi^2 R^2 / w^4 + 1) \quad (4)$$

$$w_0 = \sqrt{w^2 / 2 + \sqrt{w^4 - 4\pi^2 z^2 / R^2}} / 2 \quad (5)$$

一次放射器として用いる既製品のコンカルホーンアンテナの開口部でのビーム幅が 22.4mm、ビームの同位相面の曲率半径が 112.9mm であることから、これらの値を式(3)と式(4)に代入すると、一次放射器から放射されるガウシアンビームのビームウエストの位置は開口部よりも 52.6mm 奥にあり、そこでのビーム幅は 16.4mm であることが分かる。さらに、一次放射器から放射されるビームのビームウエストの位置から 400mm の離れた所にパラボラ面を設置することを考えると、式(1)と式(2)から、パラボラ面でのビーム幅が 117.6mm、ビームの同位相面の曲率半径が 407.9mm であることが分かる。そして、同じ構造を有するパラボラ面を 1500mm 隔てて対向させることを考えると、パラボラ面間のビームは、各パラボラ面から 750mm の位置にビームウエストを持つはずであるから、式(5)を用いて、パラボラ面間のビームのビームウエストの幅が 113.3mm と求められる。この値を式(2)へ代入することで、パラボラ面でのビームの同位相面の曲率半径が 10.39m であり、パラボラ面には 785mm の曲率半径を持たせなくてはならないことが分かる。

設計された伝送系でビーム幅がどのように変化するかを図 6 に示す。横軸 0.35m の位置に一次放射器から放射されるビームのビームウエストがあり、左に向かって放射されている。横軸 0.75m の位置にパラボラ面があり、右側に反射され、横軸 0m の位置にパラボラ面に反射して伝搬するビームのビームウエストがある。前述のように、パラボラ面でのビーム幅が 117.6mm、ビームウエストでのビーム幅が 113.3mm であるから、パラボラ面の間でビーム幅は大きく変化せず、パラボラ面の間の距離に影響を受けにくい伝送系であることが分かる。

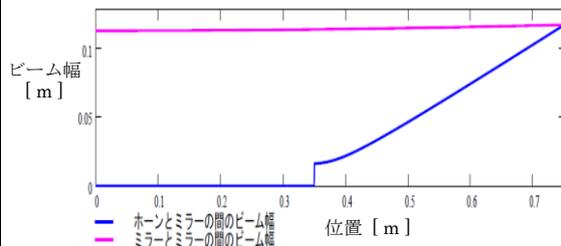


図 6. 伝送系内のビーム幅の変化

ビームパターンを図 7 に示す。焦点面での電力分布を図 8 に示す。電磁界解析の結果から、この光学系を用いると、ホーンアンテナのブロッキングも考慮(ホーンアンテナの開口部面積のみを考慮)して、最大約 78.6% ×

78.6%=61.8%の電力伝送が可能となると計算される。(ただし、設置誤差や鏡面粗さ等を考慮すると、さらに低下すると考えられる。パラボラ面を軸外しにして、ホーンアンテナをビーム伝送路上から排除すると、89.3%の電力伝送が期待できる。) コニカルホーンを使用しているため、ビームは非対称である。

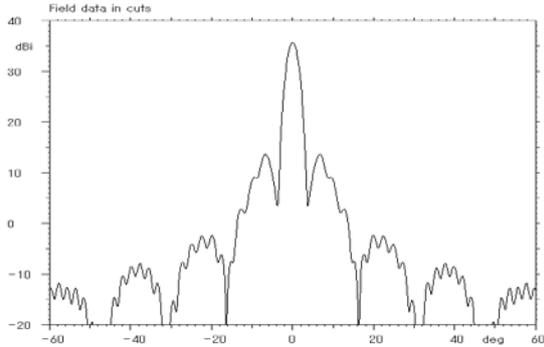


図 7. パラボラアンテナのビームパターン

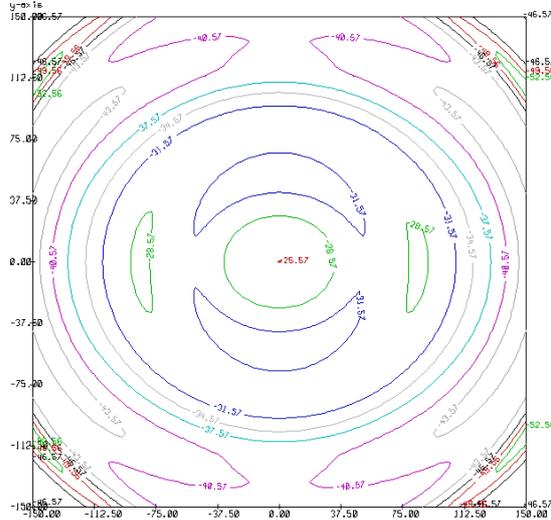


図 8. 位置 0 m での電力分布

(3) 電力伝送系の製作

伝送系の評価を行うために、アルミ材を NC 旋盤を用いた加工をおこない、図 9 に示すようなパラボラアンテナを 2 組製作した。パラボラ面の中央から 0.4m の位置に既製品のコニカルホーンアンテナが配置される。パラボラ面の中央部には、光軸の調整をおこなうためのレーザーコリメーター用を挿入できる穴が配置されている。この図面には無いが、四隅にも同様の穴が配置されている。

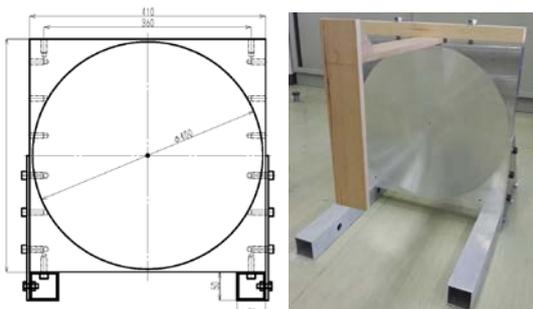


図 9. 製作したパラボラアンテナ

(3) 電力伝送系の評価

ホーンアンテナを一次放射器とする前述のパラボラアンテナ 2 台を距離 1500mm を隔てて配置した電力伝送系で測定を行い、17.5GHz~19GHz の帯域で、約 40%~45% の電力伝送効率を達成できることを確認した。ビーム幅も 110mm~120mm 程度であることも確認した。また、伝送距離が 1500mm±10% 変化しても、概ね同じ伝送効率を達成できることが分かった。

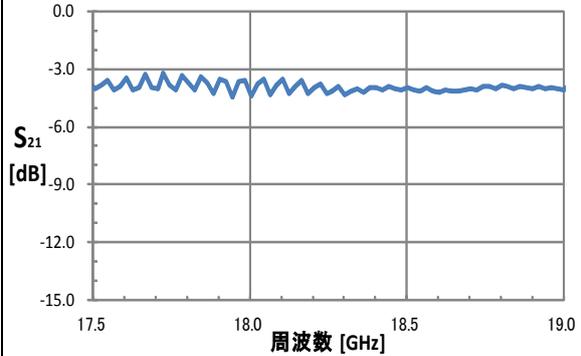


図 10. 伝送系の周波数特性 (測定結果)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 鈴木潤一、神戸大亮、安藤浩哉、平面回路型平衡不平衡変換器に関する研究、電気関係学会東海支部連合大会、2012 年 9 月 25 日、豊橋技術科学大学
- ② 神戸大亮、安藤浩哉、伝送平面内のポートの制御に関する研究、電気関係学会東海支部連合大会、2013 年 9 月 24 日、静岡大学
- ③ 中野大輔、森雅之、前澤宏一、石井仁、安藤浩哉、THz 帯域を目指した新構造可変位相シフタの提案、電子情報通信学会総合大会、2015 年 3 月 11 日、立命館大学

[図書] (計 0 件)

無し

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

無し

○取得状況 (計 0 件)

無し

[その他]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 浩哉 (ANDOH, Hiroya)
豊田工業高等専門学校・情報工学科・教授
研究者番号：30212674

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

前澤 宏一 (MAEZAWA, Koichi)
富山大学・工学部・教授
研究者番号：90301217

小川 英夫 (OGAWA, Hideo)
大阪府立大学・理学研究科・教授
研究者番号：20022717

木村 公洋 (KIMURA, Kimihiro)
大阪府立大学・理学研究科・非常勤研究員
研究者番号：10565328

(4) 研究協力者

後野 昭二 (ATONO, Shoji)
豊田工業高等専門学校・技術部
・技術専門職員

鈴木 潤一 (SUZUKI, Junichi)
豊田工業高等専門学校・専攻科生

神戸 大亮 (KANBE, Daisuke)
豊田工業高等専門学校・専攻科生

梶田 翔太 (KAJITA, Shota)
豊田工業高等専門学校・専攻科生