

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006-2008

課題番号：18360171

研究課題名 (和文) 宇宙太陽発電所のマイクロ波送電ビーム制御の高精度化に関する研究

研究課題名 (英文) Research on high precision beam control of microwave power transmission system for solar power satellite

研究代表者

橋本 弘藏 (HASHIMOTO KOZO)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：80026369

研究成果の概要：

自動較正機能を有するレトロディレクティブシステムの実験を行い、誤差は 0.25 度以内の測定範囲以下となった。屋外実験用のレトロディレクティブシステムを完成し、実験局の免許を取得して、暗室にとらわれない長距離の実験を行い、性能を評価するとともに、雑音に強い方式の実験の確認にも成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2007 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	12,300,000	3,690,000	15,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・マイクロ波・ミリ波

キーワード：新エネルギー、宇宙太陽発電所、到来方向測定、ビーム制御、レトロディレクティブシステム

1. 研究開始当初の背景

アンテナ(系)の自動較正に関しては数多くの論文があるが、殆どがシミュレーションのみであり、実験を伴ったものは稀である。シミュレーションではうまく行っても、実験では予期せぬ要因が混じり、正常に動作するとは限らない。実験も行っておくことは非常に重要である。また、位相誤差については、

その平均値をゼロと仮定することが通常行われている。簡単にはなるがこれも常に正しいとは限らない。

暗室内では、当研究所が有している SPORTS5.8 ビーム形成サブシステムと名付けられた、レトロディレクティブ実験システムを用いる。暗室内の実験では伝搬距離に限りがある。そこで、屋外で使用可能なシステム

を開発し、総務省の免許を得て、長距離の実験を行う。研究組織の構成員は、無線従事者の資格を有している。

SSPS のような大規模システムを視野においた自動校正や位相同期方式は、あるいは、長距離伝搬下でのレトロディレクティブシステムは国内外で提案されたことも、実験された例もなく、世界初であり、本研究によりその実用への道が大きく開かれる。成果は宇宙空間での実証実験の設計等に生かすことができる。

2. 研究の目的

SPS 構想では、静止軌道から安全に効率よく正確に送電するため、非常な高精度でマイクロ波ビームを目標に向ける必要がある。これには地上の目標からパイロット信号を送り、その到来方向に送電するレトロディレクティブ方式が用いられる。レトロディレクティブシステムを作成し、実証実験として、長距離間でのパイロット信号到来方向に電波を送り返す高精度システムの実験を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 帰還方式による超大型システムのユニット間の位相同期方式の実証と評価

通常のアレイアンテナでは基準発信源からの信号を分配し、ケーブル長を調整することなどによって各素子の位相を設定している。しかし SPS のような巨大なシステムでは、このような方法は不可能である。複数のアンテナ素子から構成されるユニット内においては各素子間の位相差を制御することは可能であるが、そのユニット間の位相に関して同期を取る必要がある。

現有の 4.8GHz 帯でパイロット信号を送信し、5.8GHz 帯の 12x12 素子のアレイアンテナで送電ビームを形成する SPORTS5.8 で、アレイの各素子をユニットと見立て、それらの位相同期をとることにより評価する。より高速化した方式も我々が考案しており、位相差情報を得るために、ある変調を施された信号を受電点で受信し、それから得られた情報をフィードバックすることにより送電アレイの各素子の位相を最適化する。

(2) ソフトウェアレトロディレクティブ方式の実験と評価

SPORTS5.8 を用いて暗室内において、ソフトウェア方式によるレトロディレクティブシステムを構成し、超高精度化されたパイロット信号の到来方向測定システムとビーム形成に関するこれまでの成果を組み合わせた総合的な性能を評価を行う。

(3) 受信素子の多素子化による到来角測定

の高精度化

信号の到来角測定は 2 つの受信アンテナ間の相対位相差から求められる。素子間隔は広いほど精度が上がるが、方向の変化にともなう、位相が何周期も変化するためにあいまいさが生じる。そのため複数の間隔のアンテナで測定し、精度の比較、評価を行う。また、MUSIC 法などによる高精度計測も行う。4 素子までのパイロット信号受信に対応できるので、到来角測定の高精度化の評価実験を行う。

(4) 長距離レトロディレクティブシステムの製作と実験

長距離レトロディレクティブ実験システムを試作し、実験局免許を取得する。第 3 年度に実験を行なう。レトロディレクティブ制御システムは本実験システムを制御する装置で、パーソナルコンピュータを基本とし、インターフェース基板や大学側で開発するソフトウェアレトロディレクティブシステムのプログラムからなる。最初はキャンパス内で行い、できる限り遠距離で実験も試みる。外来雑音も存在する条件下での貴重なデータが期待される。

(5) SPS 用送電ビーム形成

SPS 用アレイアンテナにおいては、メインビームにエネルギーを集中し、サイドローブを抑えたビームを作る必要がある。そのため新しい送電ビームの形成方式を開発する。

4. 研究成果

(1) SPS 用アレイアンテナにおける送電ビームの形成に関して、電力分布を台形にする新しい方式を提案した。この方式は、従来のアレイ全体に電力分布を与える方法に比して、中心の大半の部分を一定電力にできるため、電力を変化させる部分が少なくなり、システムを簡略化でき、かつ、最大以外のサイドローブレベルが低く、ビーム収集効率も高いことを示した。従来は放熱が困難であった中心部の電力も低くなる等の優位性がある。また 12 素子のアレイで実験的にも実証している。

(2) さらに、周辺部のアレイの配置を不等間隔にする方式を提案し、評価している。配置法はランダムではなく、数式で示せる、外に行くほど間隔を広く取る決定論的な方法であるので、配置が容易である。今までより少ない素子数で最大サイドローブも含めて従来よりも抑制でき、収集効率も高い、より優れた方式であることを示した。

(3) 宇宙太陽発電所 (SPS) では、高精度で

受電点の方向にマイクロ波で送電する必要がある。受電点からパイロット信号を送り、到来方向の推定と送電ビーム形成のための各送電アンテナに与える位相を計算機上で行う、ソフトウェアレトロディレクティブ方式に着目し、SPORTS5.8を用いてビーム方向精度を測定した。パイロット信号にはスペクトル拡散変調をかけ、0.5波長間隔の4つの4.8GHzアンテナを用いて受信、さらに逆拡散し到来方向を計算し、5.8GHzの12×12の素子を持つ送電アレイアンテナに、到来推定方向に1次元でメインビームが向く位相を与えた。この場合、方向の誤差が±2度以内であった。そのため受電側中心から等距離離れた2つのアンテナで等電力にするように、ビーム形成位相を変化させる方法を新たに開発し、誤差は0.25度以内の測定範囲以下となった。

(4) さらにアレーアンテナの歪みや通過位相誤差を較正する、REV法(素子電界ベクトル回転法)と新開発の逐次補正を行うBeam-tagging法の2つについて、受電点が移動している場合を含めてシミュレーション、実測実験にて比較を行った。Beam-tagging法の方が受電点の電力を高く維持できることがわかり、上記システムにBeam-tagging法を追加した総合実験を行った。送電アレイアンテナに位相誤差を与え、システム動作前後のビームパターンを測定した。実測実験の結果、方向誤差は0.25度以内の高精度化ができることを実証した。

(5) 宇宙太陽発電所(SPS)のアンテナは大型となるため、多数のユニットで構成される。複数の送信アンテナ素子から構成されるユニット内においては各素子間の位相差を制御することは可能であるが、ユニット間の位相に関して同期を取る必要がある。そのため、ユニット数の増加に対応可能な、各ユニットの信号に変調をかける新方式によるハードウェアを製作し、有線ならびに無線による動作確認を行った。

(6) 現有のシステム(SPORTS5.8)は大型で重いため、パイロット信号に5.8GHz帯、送電側に2.45GHz帯を用いる小型化したソフトウェア方式レトロディレクティブシステム自作した。このシステムで、パイロット信号の到来方向測定システムとビーム形成に関するこれまでの成果を組み合わせた総合的な実験を実施し、評価した。

(7) ソフトウェアレトロディレクティブ方式の実験と評価

屋外実験用の装置を用いて暗室内において、パイロット信号の到来方向測定システム

とビーム形成に関する成果を組み合わせた、ソフトウェアレトロディレクティブシステムを構成し、実験を実施した。パイロット信号に5.8GHz、送電側に2.46GHzで総務省から実験試験局の免許を受け、屋外での実験も行った。

伝搬距離は暗室内では5.4mしかとれなかったが、屋外では25mで実験することができた。到来方向の測定結果をもとに、可変移相器を制御し、レトロディレクティブシステムを構成している。送信には、別途免許を取得した8素子の10mW送信機によるアクティブフェーズドアレイを用いて、特性を評価した。送電方向および到来方向の誤差のために、受信電力は理想よりは減ったものの、比較的高精度の実験が出来た。屋外では、暗室内のように設備が整っていないために、誤差が少し増加したが、長距離の実験に成功した。Time-frequency MUSIC法の実験も行い、雑音に強い方式であることを確認した。

(8) 災害時、飛行船等の移動体に無線送電機能を付加し、屋外実験を行うため、送電には位相制御マグネトロンで行い、本研究のパイロット信号の送受信と到来方向測定技術を応用したシステムを製作した。飛行船を用いた高度約30mからの実験も行い、到来方向も測定できたが、少しの風で飛行体が揺れるために定性的な評価にとどまった。ビーム特性などの測定には至らなかったが、貴重な経験であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8件)

1. 橋本弘藏, 山川宏, 篠原真毅, 三谷友彦, 高橋文人, 米倉秀明, 平野敬寛, 藤原暉雄, 長野賢司, 川崎繁男. 飛行船からのマイクロ波送電実験, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2009-03, 2009 査読無
2. A.K.M. Baki, Kozo Hashimoto, Naoki Shinohara, Tomohiko Mitani, Hiroshi Matsumoto, Isosceles-trapezoidal-distribution edge tapered array antenna with unequal element spacing for Solar Power Satellite, IEICE Trans. Communications, E91-B, 527-535, 2008 査読有
3. Naoki Shinohara, Blagovest Shishkov, Hiroshi Matsumoto, Kozo Hashimoto, and A.K.M. Baki, New stochastic algorithm for optimization of both side lobes and grating lobes in large antenna arrays for MPT, IEICE Trans. Communications, E91-B, 286-296, 2008 査読有

4. 平野敬寛, 前健一, 橋本弘藏, ソフトウェアレトロディレクティブ方式マイクロ波送電屋外実験系の開発, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2007-18, 2008 査読無
5. 高橋文人, 橋本弘藏, マイクロ波送電用レトロディレクティブシステムの開発及び屋外実験, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2008-15, 2009 査読無
6. Kozo Hashimoto, Sohei Nijima, Masafumi Eguchi, and Hiroshi Matsumoto, Optimization of uniformly excited phased array for microwave power transmission, Proceedings of the 2007 International Symposium on Antennas and Propagation, 3, 3B1-2, 2007 査読有
7. A. K. M. Baki, Naoki Shinohara, Hiroshi Matsumoto, Kozo Hashimoto, and Tomohiko Mitani, Study of Isosceles Trapezoidal edge tapered phased array antenna for Solar Power Station / Satellite, IEICE Trans. Communications, E90-B-4, 968-977, 2007. 査読有
8. 米倉秀明, 藤原暉雄, 長野賢司, 三谷友彦, 平野敬寛, 篠原真毅, 橋本弘藏, 山川宏. 上田英樹, 安藤真, ソフトウェアレトロディレクティブ方式マイクロ波送電屋外実験系の開発, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2007-23, 2008 査読無

[学会発表] (計 8 件)

1. 高橋文人他, マイクロ波送電屋外実験系の開発及び屋外送電実験, 電子情報通信学会 2009 年総合大会, B-1-132, 2009 年 3 月 18 日, 松山市
2. 橋本弘藏他, 京都大学における太陽発電衛星の研究, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 2008 年 10 月 29 日, 札幌市
3. 山川宏他, マイクロ波無線電力伝送技術の飛行実証とアプリケーションの開拓, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 2008 年 10 月 29 日, 札幌市
4. 前健一他, レトロディレクティブシステム用 16 素子アクティブフェイズドアレイの開発, C-2-125, 電子情報通信学会 2008 年総合大会, 2008 年 3 月 18 日, 北九州市
5. 平野敬寛他, ソフトウェアレトロディレクティブ方式マイクロ波送電屋外実験系の開発, C-2-124, 電子情報通信学会 2008 年総合大会, 2008 年 3 月 18 日, 北九州市
6. 山川宏他, マイクロ波無線電力伝送技術の飛行船による飛行実証構想, C-2-126, 電子情報通信学会 2008 年総合大会, 2008 年 3 月 18 日, 北九州市
7. Kozo Hashimoto and Hiroshi Matsumoto, URSI white paper on solar power satellite systems and ICWG report (Plenary "SPS"), International Symposium on Radio Systems

- and Space Plasma, 2007 年 9 月 2 日, Sofia, Bulgaria
8. 大畑 良行他, マイクロ波電力伝送のためのソフトウェアレトロディレクティブシステムの研究, B-1-176, 情報通信学会 2007 年総合大会, 2007 年 3 月, 名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 弘藏 (KOZO HASHIMOTO)
 京都大学・生存圏研究所・教授
 研究者番号: 80026369

(2) 研究分担者

篠原 真毅 (NAOKI SHINOHARA)
 京都大学・生存圏研究所・准教授
 研究者番号: 10283657
 三谷 友彦 (TOMOHIKO MITANI)
 京都大学・生存圏研究所・助教
 研究者番号: 60362422

(3) 連携研究者

なし