

氏 名 Raza Mudassir

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2264 号

学位授与の日付 2021年9月 28日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Precise Beam Control System for Solar Power Satellite

論文審査委員 主 査 佐々木 進
総合研究大学院大学 名誉教授
水野 貴秀
宇宙科学専攻 教授
岩田 隆浩
宇宙科学専攻 准教授
田中 孝治
宇宙科学専攻 准教授
藤野 義之
東洋大学 理工学部 教授

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Raza Mudassir

Title Precise Beam Control System for Solar Power Satellite

Solar Power Satellite (SPS) has been proposed to provide continuous renewable energy from solar power. SPS will receive power from sun and transmit to rectenna on ground in form of microwaves. Challenges for SPS are efficient microwave power transmission, construction and control of large structure in space, large scale power generation, space transportation, etc. My study is focused to solve issues regarding efficient microwave power transmission. Many designs of SPS have been studied, and one of them is Tethered SPS. Its size is 2.375 km x 2.5 km, and rectenna of 3.5 km diameter will provide 1 GW power. Tethered SPS will use power generation and transmission modules with size of 0.5 m x 0.5 m, and 23,750,000 modules will be required. SPS will be installed in geostationary equatorial orbit (GEO) to transmit power continuously. For Tethered SPS, required accuracy of beam forming is $.0005^\circ$. Flexible structures will be used for large array antenna system and space environment conditions will deform the antenna system. It is required to compensate effect of deformation for achieving the required accuracy.

Hardware retrodirective method and software retrodirective method have been studied previously to fulfill the requirements of power transmission, but both have some limitations. Hardware retrodirective method uses phase conjugate signals generated by a hardware microwave circuit, so it is not flexible regarding frequency. Refinements for amplitude tapering are difficult to apply, and filtering of unwanted signals is also not possible. Software retrodirective method consists of a direction finding system and a beam forming system. It needs high uplink power of pilot signal for direction finding in order to achieve required high beam control accuracy. The software retrodirective system also requires phase synchronization among huge number of power emitting devices installed on 23,750,000 modules. REV method that can correct phase error caused by an antenna deformation or temperature changes takes long processing time. Objectives of my study are improvement of software retrodirective method regarding direction finding and proposal of digital retrodirective method.

To solve issue of high uplink power for software retrodirective method, i proposed to increase SNR of pilot signal with high gain pilot signal receiving antennas and to use long baseline. Dipole array antennas were used to receive pilot signal and they were installed on power transmitting antennas. Phase comparison monopulse method was used to measure phase difference for 2x2 and 4x4 dipole array antennas. Error of angle of arrival was determined by using the measured values of phase difference. 1m, 2.5m and 5m baselines were used to compare effect of different baselines on the accuracy of direction finding. Results indicated that for 60 dB SNR with using 4x4 array and 5m baseline, required accuracy of $.0005^\circ$ was achieved.

Estimation was performed to determine uplink power for SPS and It was resulted that 6 kW uplink power is required with 54.4 dB gain of pilot signal transmitting parabolic antenna. Number of pilot signal receiving antennas was also decreased with using long baseline.

However, with larger receiving antenna by using an antenna array and with the longer baseline, deformation of the antenna is more susceptible. I evaluated effect of antenna deformation experimentally. Antenna deformation experiments were performed with dipole array antennas to estimate effect of antenna deformation on direction finding. Cases of partial antenna array deformation and whole antenna array deformation were considered. Phase error was minimum for one element deformation and was maximum for whole array deformation.

I proposed digital retrodirective method that generates phase conjugate signals by the software methods, as alternative to hardware and software retrodirective methods. Digital signal processing was used to detect phase of pilot signal and to generate conjugate phase for power signal by a new algorithm. Each set of pilot signal and power signal antenna worked independently to perform precise beam forming. A reference signal was used to provide standard frequency, phase and timing among retrodirective array antennas. For antenna deformation compensation, change of pilot signal phase was determined and power signal was generated accordingly.

Experimental evaluation for the digital retrodirective system and the algorithm was performed with using one dimensional retrodirective array. Patch subarray was used as power signal transmitting antenna and dipole antenna was used as pilot signal receiving antenna. Frequencies of power signal and pilot signal were 5.8 GHz and 2.45 GHz respectively. No deformation, forward deformation and backward deformation cases were considered for the evaluation. Results showed that digital retrodirective method performed well for all the cases. Regarding compensation for deformation cases, beam pointing error was $.21^\circ$ rms. Comparison was carried out between REV method and digital retrodirective method for compensation of antenna deformation. Antenna Radiation patterns for both methods were in good agreement, but long processing time was required for REV method.

Regarding application for SPS, estimation was performed for digital retrodirective method with two dimensional retrodirective array. 8×8 subarray was used and appropriate results for beam forming were obtained. Configuration to provide reference signal for large scale antenna system of SPS was also presented. GPS antennas were used to supply reference signal for a group of retrodirective array antennas and synchronization was not required among the groups of antennas.

Hence, the digital retrodirective method used digital processing circuit, which solved issues of hardware retrodirective method as flexibility regarding frequency, amplitude tapering modifications, etc. Issues of synchronization among antenna modules and processing time of antenna deformation compensation for software retrodirective method were also solved by digital retrodirective method. Number of pilot signal receiving antennas is increased with digital retrodirective method and it can increase cost. So, there is a trade-off between efficiency of beam forming and cost.

Conclusively, studies were performed to resolve issues of previously studied methods to do efficient microwave power transmission for SPS. Direction finding experiments were performed with high gain antennas and long baseline to decrease uplink power of pilot signal. Required uplink power for SPS was decreased with using the proposed methodology. Evaluation was also done for effect of antenna deformation on direction finding. Digital retrodirective method was proposed as alternative to the conventional methods and experiments were conducted to verify the algorithm. Results indicated that proposed method was able to solve issues of conventional methods to do precise beam forming for SPS.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 Raza Mudassir

Title
論文題目 Precise Beam Control System for Solar Power Satellite

本論文は、太陽発電衛星（SPS）における衛星軌道上から地上へ無線でエネルギーを送るシステムに関する研究成果の報告である。SPS では、衛星軌道上に無数の送電素子から構成される km クラスの巨大なアンテナを建設し、精度の高いマイクロ波ビームの方向及び形状制御が要求される。アンテナのサイズは、送電に用いるマイクロ波周波数と送電距離で決まる。また、軽量化を実現するために、軌道上での変形を許容しなければならない。上記の要求を満たすために、本論文では、デジタルレトロディレクティブ方式という新しいマイクロ波ビーム制御方式の提案とその原理検証が示されるとともに、従来手法における要求ビーム制御精度達成のためのシステム構成の提案と影響評価、それに基づく設計が述べられている。これらに関して、全 6 章構成で、英文で記述されている。

第一章では、本研究の目的が示されている。出願者は、SPS における無線送電技術に対する要求とそれに関する従来研究を精査し、従来システムで要求される、巨大なアンテナを構成する無数の素子の同期を無くし、小規模で独立したモジュールで大型アンテナを構成するシステムが必要であることを述べるとともに、従来のシステム検討で要求される方向制御のためのパイロット信号のアップリンクパワーを現実的な規模にする必要があることを述べている。

第二章では、50 年以上に渡る SPS の研究に関して、無線送電技術を中心に整理し、当該分野の技術レベルを示し、本研究の位置づけを示している。

第三章では、従来研究開発がなされてきたソフトウェアレトロディレクティブ方式に関して、要求されるマイクロ波ビーム制御精度を達成するために、送電アンテナ上への高利得アンテナの実装により、従来システムと比較して、送電アンテナ面に開口面が広いアンテナ搭載されるため、宇宙環境における変形の影響、送電アンテナへの影響に関する実験的評価が示されている。

第四章では、デジタルレトロディレクティブ方式と命名した新しいマイクロ波送電システムに関するアルゴリズム考案と実験によるその原理検証が示されている。地上局からのパイロット信号を SPS 側で受信し、デジタル処理を行い位相共役信号を生成する。この信号の周波数変換を行い、電力増幅後フェーズドアレーアンテナから放射する。この無線送電システムに関して、新しいアルゴリズムが提示された。独立した小規模モジュールで大規模送電アンテナを構築することが可能であり、また、アレーアンテナを構成する素子間

の同期が不要である。実験により、原理検証とソフトウェアレトロディレクティブと同等のマイクロ波ビーム制御が可能であることが示された。

第五章では、第三章及び第四章で示された研究成果を用いた SPS の無線送電システムのシステム設計に関して記載されている。出願者は、システム設計により、高利得アンテナの採用により、マイクロ波ビームの方向探知に使われるパイロット信号の送信電力を大幅に削減したシステムを提案している。また、デジタルレトロディレクティブ方式の SPS への応用に関して述べている。

第 6 章では、結論が述べられている。出願者が考案したデジタルレトロディレクティブ方式は、周波数選択性やビーム形状制御、セキュリティ機能の付加を可能にし、かつ、従来手法における大きな課題であった巨大なフェーズドアレーアンテナにおける位相同期を解決する画期的方式である。また、従来手法における、ビーム方向探知に関して、高利得アンテナ搭載時の送電アンテナとの干渉やアンテナの変形の影響を実験的に評価し、具体的システムが検討示された。

このように、本論文は、衛星軌道上に建設されるエネルギーシステムである SPS への応用を目指す高精度長距離無線送電システムに関して、基礎的研究と先端的マイクロ波工学技術を用いた応用の両方に貢献しており、宇宙工学分野での成果は顕著なものである。本論文の内容は、1 件審査制度の確立された学術雑誌へ掲載され、1 件は投稿準備の段階である。

審査員は全員一致で、博士論文として十分な学術水準に達していると判断した。