

氏 名 片野 将太郎

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2225 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 大規模マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーアンテナの段階的サブアレー構成素子数変化による電力分布構成法

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
堂谷 忠靖
宇宙科学専攻 教授
村田 泰宏
宇宙科学専攻 准教授
牧 謙一郎
宇宙科学専攻 助教
水野 貴秀
宇宙科学専攻 准教授
藤野 義之
東洋大学 理工学部 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 片野 将太郎

論文題目 大規模マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーアンテナの
段階的サブアレー構成素子数変化による電力分布構成法

I have proposed and demonstrated a new array antenna configuration to increase the transmission efficiency with a simple configuration in the field of microwave power transmission, which is expected to be used in Space Solar Power Systems (SSPS). Using the proposed method, a large-scale array antenna with power distribution for SSPS can be designed in a low-cost, mass-production configuration.

SSPS is a concept of a power plant that generates solar power in space, converts the power obtained into microwave power and transmits it wirelessly to the ground for use on the ground. In this SSPS, it is necessary to construct a large-scale array antenna in space to transmit power with a diameter of more than 1 km. Therefore, the SSPS wireless power transmission (WPT) subsystem must have not only “high power transmission efficiency”, but also a “uniform structure for mass production” and “electrical beam control” to cope with attitude variation.

As one of the means to obtain high power transmission efficiency, power distribution in array antennas for power transmission has been studied and various methods of implementation have been proposed. They can be roughly divided into a method of outputting different power from each antenna element of the array antenna (method 1) and a method of adjusting the position of each antenna element (method 2). Method 1 requires multiple types of power synthesis circuits or power amplifiers, which results in lower efficiency and higher design and development costs for high frequency circuits. In method 2, the spacing between the antenna elements is changed gradually or the antenna elements are thinned out, which makes the array configuration more complicated.

In contrast, this study proposes a method that uses a single type of power amplifier with uniform spacing between antenna elements to facilitate mass production and to provide power distribution. Specifically, it is a method of approximating the overall power density to a desired power distribution by increasing the number of antenna elements in a sub-array — a group of antenna elements connected by the same power distribution circuit — from the center to the edge of the array antenna in a stepwise manner. By making the input power to each sub-array uniform, a single type of power amplifier can be used to connect to the sub-array, thereby reducing design and development costs. On the other hand, since the power distribution is stepped in the entire array, the power distribution can be set up with a simple configuration, and a high power transmission efficiency comparable to that of other methods can be achieved. In theory, the construction method proposed in this study can be applied to various power distributions to design arrays. In this paper, a 10-dB edge truncated Gaussian distribution

(hereinafter referred to as "Gaussian distribution"), which is often used in SSPS studies, is assumed for the evaluation of the proposed method.

In this section, we briefly explain the procedure of the proposed array design. First, we consider a circular array antenna with a diameter of D , and create a region A in the center of the entire array, which is a concentric circle with the array. In addition, a concentric donut-shaped region B, C, ... is provided. The number of sub-array components is set to $k \times k$ devices in region A. In regions B, C, ... the number of sub-array components is increased to $(k + 1)^2$, $(k + 2)^2$, ..., and $(k + m)^2$. The ratio $RE_m = k^2 / (k + m)^2$, which is the ratio of the number of sub-array elements in region A divided by the number of sub-array elements in each region, is defined as the number of elements ratio. The element number ratio RE_m is substituted into the inverse of a Gaussian distribution $RE_m = \exp(-r_m^2 / 2\sigma^2)$; however, $\sigma = (D/2) / \sqrt{2 \ln(10)}$ is used to determine the range of a region so that the value r_m is the center of the radial direction of each region. In this configuration, by keeping the power supplied to each sub-array constant, the ratio of power densities output from each region becomes equal to RE_m , resulting in a power distribution close to a Gaussian distribution as a whole.

The characteristics of the designed array antenna were analyzed numerically using array factors, and it was found that the antenna satisfied the three requirements for WPT ("high power transmission efficiency", "uniform structure for mass production", and "electrical beam control"). Specifically, it is found that the main lobe power content is more than 5 % higher than that in the absence of the power distribution, it is effective for large array antennas with a diameter of more than 1 km, and it is possible to control the beam direction in the range of several degrees. In addition, I applied the proposed method to the DOE/NASA Reference Systems and found that $k = 3$ is suitable. The power transmission efficiency is 98.5 %, which is 0.2 % lower than the ideal distribution. It is also found that the first side-lobe can be reduced by about 0.01 mW/cm² or more than the conventional Gaussian distribution.

In this study, not only the theoretical analysis, but also the demonstration experiment was carried out using linear array antenna of about 2 meters in length. As a result of demonstration experiment, the actual measured amplitude and phase distribution are in good agreement with the theoretical values. And the radiation pattern in the experiment is also in good agreement with the theoretical prediction. Furthermore, it was confirmed that the power transmission efficiency calculated from the experimental results also meets the achievement criteria set in advance. Therefore, we have demonstrated that the proposed method can be applied to an actual array antenna.

In conclusion, the array configuration method proposed in this study can design a single type of power amplifier and an array antenna with power distribution configured with uniform antenna element spacing. The designed array antennas meet the requirements of the WPT subsystem of SSPS and are capable of mass production, thus contributing to the realization of SSPS. In addition, this construction method has various design parameters such as the number (k-value) of sub-array elements at the center of the array, power distribution function, frequency, device spacing, array diameter, and can be applied to various fields.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 片野 将太郎

論文題目 大規模マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーアンテナの段階的サブアレー構成素子数変化による電力分布構成法

本論文では、宇宙太陽光発電システム(SSPS)への応用が期待されているマイクロ波電力伝送分野において、簡単な構成で伝送効率を向上させるための新しいアレーアンテナ構成が提案され、実験的に実証されている。提案手法は、SSPS 用の配電機能を備えた大規模アレーアンテナを低コストで量産可能な構成で設計とする有用な手法である。

SSPS は、宇宙空間で太陽光発電を行い、得られた電力をマイクロ波電力に変換し、無線で地上に送信して地上で利用する発電所の構想である。SSPS では、直径 1 km 以上の電力を伝送するために、宇宙空間に大規模なアレーアンテナを構築する必要がある。そのため、SSPS の無線電力伝送サブシステムには、「高い電力伝送効率」だけでなく、「量産のための均一な構造」と「姿勢変化に対応するための電気ビーム制御」が求められる。

本論文は、同じ配電回路で接続されたアンテナ素子群であるサブアレーのアンテナ素子の数を、アレーアンテナの中心から端に向かって段階的に増やしていくことで、全体の電力密度を所望の電力分布に近似させる方法を提案している。各サブアレーへの入力電力を均一にすることで、サブアレーに接続する電力増幅器を 1 種類にすることができ、設計・開発コストを低減することができる。一方、アレー全体で電力配分を段階的に行うため、簡単な構成で電力配分を設定することができ、高い電力伝送効率を実現することができる。SSPS への応用を考えた高い送電効率を得るための手段として、送電用アレーアンテナにおける電力配分が研究され、様々な実装方法が先行提案されている。それらは、アレーアンテナの各アンテナ素子から異なる電力を出力する方法(方法 1)と、各アンテナ素子の位置を調整する方法(方法 2)に大別される。方法 1 では、複数種類の電力合成回路や電力増幅器を必要とするため、効率が低下し、高周波回路の設計・開発コストが高くなる。また、方法 2 では、アンテナ素子間の間隔を徐々に変えたり、アンテナ素子を間引きしたりするため、アレー構成が複雑になる。このような先行研究に対して、本研究の提案では、アンテナ素子間の間隔を均一にした 1 種類の電力増幅器を用いた電力分配を行い、かつ、他の提案と遜色のない高い電力伝送効率を実現することができる。

上記の提案について、本論文では、SSPS 研究でよく用いられる 10dB のエッジ切り捨てガウス分布と比較して提案手法の評価を詳細に行い、電力伝送効率 98.5% を達成可能であることが示されている。これは理想的なガウス分布から 0.2% の劣化にとどまる値で、加えて従来のガウス分布よりも第一サイドローブを 10% 以上低減できることを明らかにしている。

本論文では、理論解析だけにとどまらず、長さ約 2m のリニアアレーアンテナを用いて実証実験を行っている。実験では、提案した給電回路によって振幅・位相分布が実現でき、

近傍界測定装置によって測定された放射パターンも理論値とよく一致し、提案手法が実際のアレーアンテナに適用できることを実証されている。

結論として、本論文で提案したアレー構成法は、1種類の電力増幅器と、アンテナ素子間隔が均一な電力分布を持つアレーアンテナを設計することができる。設計したアレーアンテナは、SSPSの無線電力伝送サブシステムの要件を満たしており、SSPSの実現に貢献できる提案と考えられる。

上述の論文内容から本論文は、学術的新規性と実用的有用性とをいずれも高いレベルで有しており、宇宙工学、アンテナ工学、電波応用工学の進展に貢献し、また将来の宇宙科学ミッションの発展およびエネルギー問題の解決に大きく寄与しうるものである。

本審査では、審査員6名出席のもと、論文内容に関するプレゼンテーションと質疑応答が実施され、本論文は上記内容に新規性を有し、質疑応答も適切であり、博士論文として十分な学術水準に達している事を確認した。また、本論文で行われた研究について、審査制度の確立した学術雑誌に投稿されており、これに掲載される学術的価値を有するものと確認された。

よって本論文が博士（工学）の学位請求論文として合格であると認められる。