

Beam Design Method of Phased Array Antenna with the Synthesized Field of Spherical Wave

Takayuki MATSUMURO Yohei ISHIKAWA Takaki ISHIKAWA Naoki SHINOHARA

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

Abstract

Beam forming of the phased array antenna is one of the most important technology in microwave power transmission. Well-confined beam is required both for the compatibility with other wireless devices and for human safety. Especially in the case of a large-scaled power transmission of long distance, simple beam forming method is required in order to design the outline of the system. In this study, we propose a beam forming method by using synthesized spherical wave. We reveal that a propagation field with beam waist is obtained by combining the radiating and absorbing spherical waves at the same origin. This propagation field can be used for an efficient power transmission design by arranging the beam waist at the center of the antennas. In this design method, an ideal beam shape is determined first. The phased array antenna is designed in order to reproduction the ideal beam. The transmission distance with keeping high efficiency can be estimated from the size of the antennas and the beam waist. Because of this simple estimation, we can design the transmission system with good perspective.

*Presented at the 17th SPS Symposium, 21-22 October, 2014

球面波の合成電磁界を用いた フェーズドアレーアンテナのビーム設計手法¹

松室堯之 石川容平 石川峻樹 篠原真毅

京都大学 生存圏研究所
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

1. はじめに

マイクロ波を用いた無線電力伝送には、大きく分けてビーム型とユビキタス型の2種類が存在する[1]。図1に、各方式の宇宙太陽発電システムの概要図を示す。ビーム型宇宙太陽発電システムは、衛星から地上に送電されたマイクロ波エネルギーを、系統に接続して利用する。このとき、電力は海洋インバースダムなどの蓄電池により平滑化される。一方のユビキタス型宇宙太陽発電システム[2, 3]においては、マイクロ波エネルギーを小型高利得アンテナによって受電し、分散的に利用する。ユビキタス型宇宙太陽発電システムは地上のインフラを持たないため、災害時や発展途上国などの電力システムとしての応用が期待される。

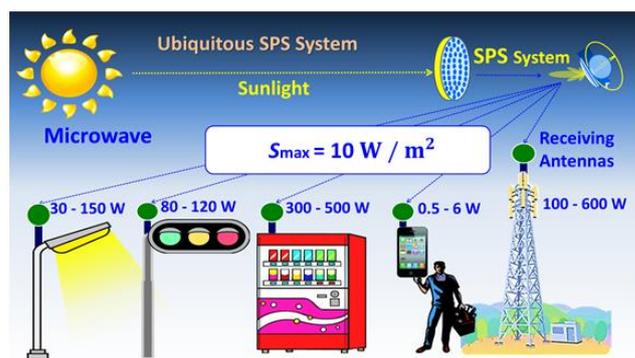
ビーム型電力伝送においては、通信機器との干渉や人体の安全性の観点から、閉じ込め性の良いマイクロ波ビームの設計が重要となる。様々な制約条件の下で、送電用フェーズドアレーアンテナの振幅と位相を最適化する研究が進められている[4, 5]。しかし、長距離の無線電力伝送に用いる大型のフェーズドアレーの場合、アンテナ素子数が膨大となるため、より見通しの良いビーム設計手法が求められる。そこで本研究は、合成球面波を用いたビーム設計手法を提案する。

(a) ビーム型電力伝送



(海洋インバースダムに蓄電後)
系統に接続して利用

(b) ユビキタス型電力伝送



(小型高利得アンテナを用いて)
地上のインフラに依らず無線でユビキタス利用

図1: 2種類のマイクロ波無線電力伝送の特徴を活かした宇宙太陽発電システム

*第17回 SPS シンポジウム、東洋大学にて2014年10月21日、22日開催

2. 平面波の展開係数を用いた球面波の合成

本研究ではこれまで、高い指向性利得を持った小型アンテナの開発を目的として、平面波の展開係数を用いて球面波を合成した電磁界について詳細な検討を行ってきた[6, 7]。その結果新たに、放射波と吸収波を合成することにより、ビーム伝搬電磁界が得られることが明らかとなった。

球面波とは、マクスウェル方程式の球座標系における直交基底関数であり、その電界および磁界は、球ベッセル関数、球面調和関数を用いて解析的に表される。電気多重極輻射に対応する TM モードと、磁気多重極輻射に対応する TE モードの 2 種類が存在し、次数 ℓ, m ($1 \leq \ell \leq \infty, -\ell \leq m \leq \ell$) で表される無数のモードを持つ。一方、平面波はマクスウェル方程式の直交座標系における基底関数であり、その電界および磁界は指数関数を用いて表される。このような球面波と平面波をつなぐ手法として、平面波の球面波展開がある。このことは、球面波を合成することにより、平面波が得られることを意味している。本研究ではまず、平面波を球面波によって展開することにより得られる係数を用いて、最大次数 $\ell = \ell_{\max}$ までの球面波を合成した電磁界 (合成球面波) について解析を行った。

図 1 に示したのは、球面波および合成球面波の $t = 0$ における瞬時電力密度分布の xz 断面である。瞬時電力密度分布は、瞬時ポインティングベクトルの絶対値で与えられる。図 1a は、外向きに進行する $\ell = 10$ の TM モード球面放射波を表している。原点から外向きに全方向的に放射していることが分かる。このように、単一モードの球面波は特定の方向に対して指向性を持たない。さらに、原点近傍には、遮断導波管のような非伝搬の波が存在する。単一モードの球面波は、次数 ℓ の大きさに比例した遮断領域を持つ。図 1b は、 $\ell = 1$ から $\ell = 10$ までの外向き球面波を平面波の展開係数を用いて合成した電磁界である。各次数の球面波の合成により、一方向に強い指向性を示していることが分かる。さらに図 1c に示したのは、 $\ell = 1$ から $\ell = 10$ までの外向き球面波および内向き球面波を合成した電磁界である。放射波と吸収波の合成によって、原点の多重極及び遮断領域の強い共振電磁界は完全に消滅し、エネルギービームが現れる。ビームウェストの大きさは、合成する球面波の最大次数に比例し、極限において平面波となる。

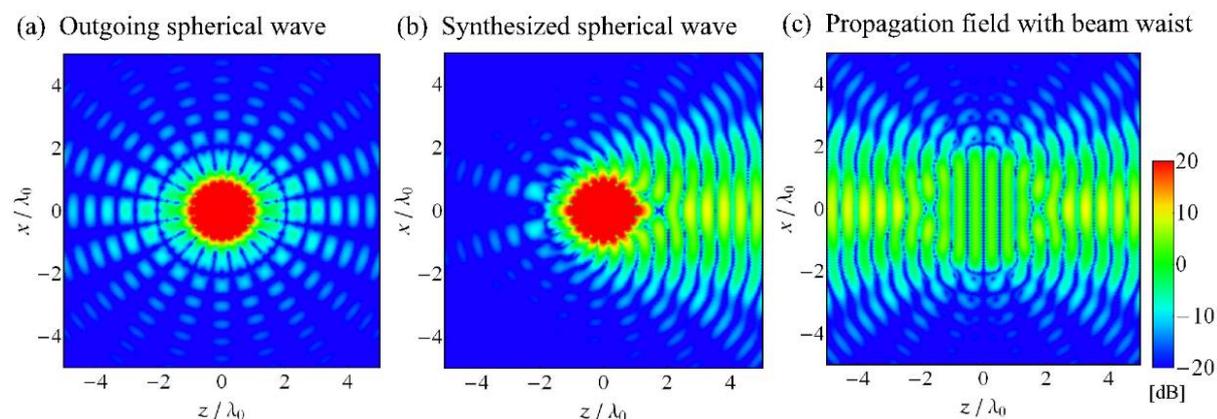


図 2: 球面波および合成球面波の $t = 0$ における瞬時電力密度分布

3. 球面波の合成電磁界を用いたビーム設計手法

前章では、平面波の球面波展開により得られた係数を用いて、球面放射波および球面吸収波を有限個合成することにより、ビーム電磁界が合成されることを示した。そこで本研究は、このような球面波の合成電磁界を用いたビーム設計手法を提案する。

図3に球面波の合成電磁界を用いたビーム設計手法の概要を示す。球面波の合成により得られるビーム電磁界のビームウエストの直径 D_w は球面波の最大次数 l_{\max} に比例する。

$$D_w = \frac{\lambda_0}{\pi} l_{\max} \quad (1)$$

また、ビームの開き角 θ は球面波の最大次数 l_{\max} に反比例して鋭くなる。

$$\theta = \frac{\pi}{l_{\max}} \quad (2)$$

このような特徴を持つビーム電磁界を用いてマイクロ波電力伝送路を設計するために、ビーム断面の振幅・位相を抽出し、フェーズドアレーアンテナの入力として用いる。今回は、対称性の良い伝送系として、送受電アンテナの大きさが同じであり、ビームウエストが送受電アンテナの中心にあることを仮定して、設計を行った。このとき、送受電アンテナの直径を D_a として、送電距離を L_T とすると、ビームの広がり角と伝送システムのパラメータは以下の式で表される。

$$\frac{D_a}{L_T} = \tan \theta \quad (3)$$

このように、球面波の合成電磁界を用いたビーム設計手法においては、送電アンテナの入力振幅・位相分布に先立ってビーム電磁界が設計可能であるという特徴を持つ。このような設計を用いることにより、大規模な送受電システムを見通し良く設計可能となる。

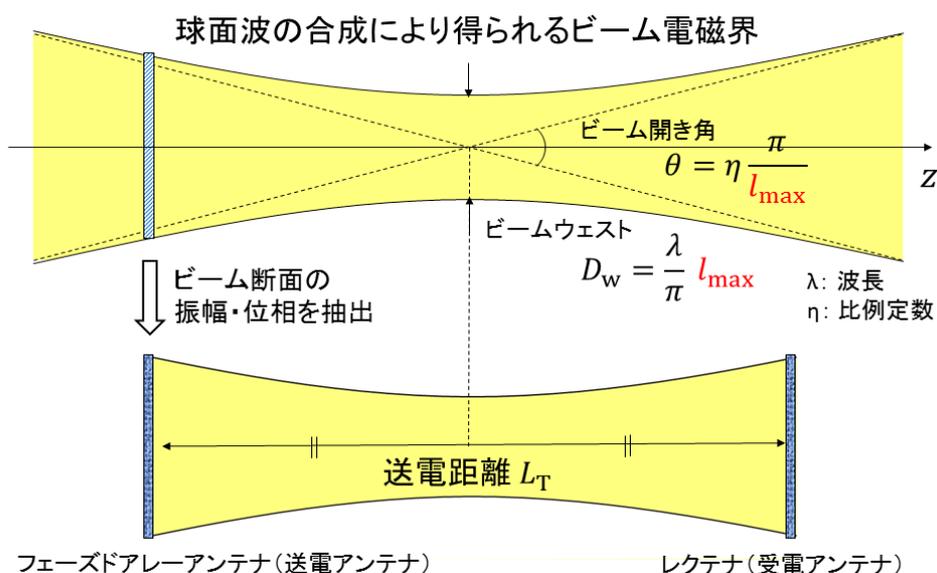


図3: 球面波の合成電磁界を用いたビーム設計手法の概要

4. フェーズドアレイアンテナによるビーム形成のシミュレーション

現在、一般社団法人海洋インバースダム協会において、スマートアイランドと本島との電力融通を目的とした島嶼間マイクロ波送電システム（図4）が提案されている。直径50mの送電アンテナを用いて10kmの電力伝送が想定されている。そこで本研究では、前章で述べた提案手法を用いて、島嶼間マイクロ波送電システムのビームフォーミングの設計を行った。

まず、球面波の合成電磁界を用いて、10kmを伝搬するビーム電磁界の設計を行った。図5に示したのは、 $l_{\max} = 1508$ の球面波合成ビームの電力密度分布である。このときビームウェストの直径 D_w は24.81mである。このようなビーム電磁界の $z = -5,000\text{m}$ における断面の電界分布を抽出し、フェーズドアレイアンテナの入力として用いる。

次に、実際のフェーズドアレイアンテナが作り出すビームについてシミュレーションを行った。フェーズドアレイアンテナには、円形パッチアンテナを半端長ピッチで並べたものを用いた。図6に、フェーズドアレイアンテナが作り出すビーム電磁界の計算結果を示す。 $z=0$ に送電アンテナが配置され、 $+z$ 方向に10kmを伝搬するビームの xz 断面を示している。フェーズドアレイアンテナの総入力電力は100kWとした。 $z=10,000\text{m}$ の受電面に到達した電力を計算すると99.8kWとなり、ビーム収集効率率は99.8%と求まる。閉じ込め性の良いビーム電磁界が設計出来ていることが確かめられた。



図4: 海洋インバースダムを用いた島嶼間マイクロ波送電システムの概要

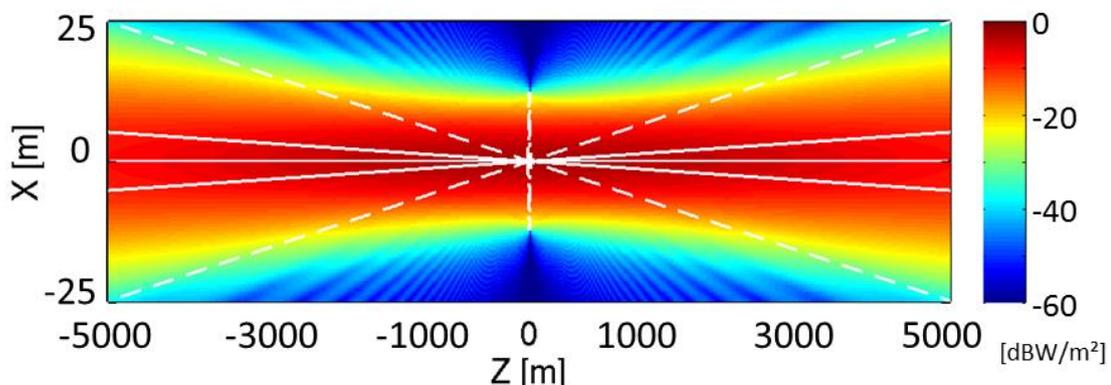


図5: 10kmを伝搬するビームの設計電磁界（周波数5.8GHz）

[シミュレーションパラメータ]

- ・計算手法: 電界合成法
- ・アンテナ素子: 円形パッチアンテナ
- ・アンテナピッチ: 0.5λ
- ・アンテナ数: $3,736,489 = 1933 \times 1933$

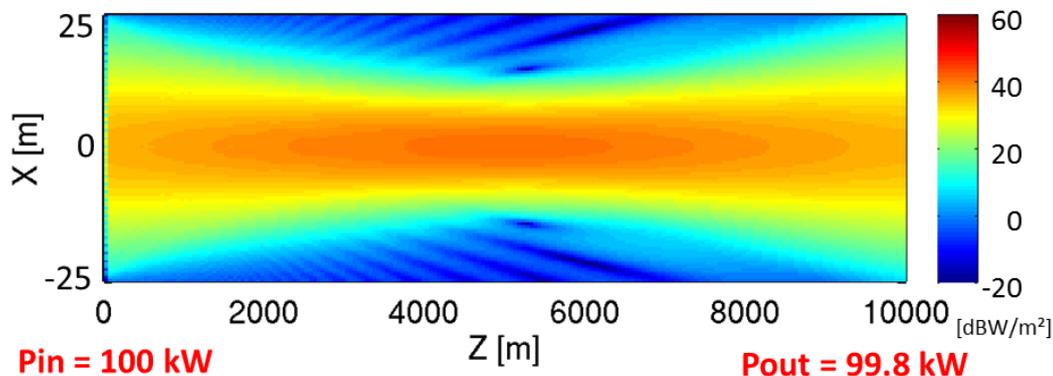


図 6: 10km を伝搬するマイクロ波ビームのシミュレーション結果

5. まとめ

本稿ではまず、球面波を平面波の展開係数を用いて合成することにより、任意のビーム電磁界が得られることを示した。さらに、ビーム電磁界断面の位相振幅分布をフェーズドアレーアンテナの入力に用いるビーム設計手法を提案した。この設計手法では、送電アンテナの入力振幅分布に先立ってビーム全体の分布が決定するため、システム全体を見通し良く設計可能である。50 m 直径のフェーズドアレーアンテナを用いた 10 km のビーム伝送電磁界の設計・シミュレーションを行い、ビーム収集効率 99.8% を得た。合成球面波は、球面波の次数に応じた自由度を持つため、ガウスビームと比較して、より柔軟性の高い設計が可能であると言える。今後は、最適なビーム電磁界を定義し、閉じ込め性の良いマイクロ波電力伝送の設計指針を明確にする予定である。

参 考 文 献

- [1] N. Shinohara, "Power without wires," IEEE Microwave Magazine, vol.12, no.7, pp.564-573, Dec. 2011.
- [2] 石川容平, "宇宙太陽発電衛星の実現に向けて～衛星の軽量化とユビキタスサービス～," SPS ニュースレター 第 23 号, April, 2012.
- [3] 松室堯之, 石川容平, 篠原真毅, "ユビキタス型宇宙太陽発電システムのための地上用小型受電アンテナの基礎研究," SPS シンポジウム, Sept. 2012.
- [4] Y. Kubo, N. Shinohara, and T. Mitani, "Development of a kW class microwave wireless power supply system to a vehicle roof," Proc. of IMWS-IWPT2012, pp.205-208, 2012.
- [5] 橋本弘蔵, 新島壮平, 江口将史, 松本紘, "マイクロ波送電用均一励振フェーズドアレーのビーム最適化," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1-28, 2005.
- [6] T. Matsumuro, Y. Ishikawa, and N. Shinohara, "Small-size Large-aperture Antenna Using Multilayered Spherical Dielectric Resonators," 7th European conference on Antennas and Propagation, pp.3068-3072, Gothenburg, Sweden, April, 2013.
- [7] T. Matsumuro, Y. Ishikawa, and N. Shinohara, "Spherical Dielectric Resonator as an Accurate Source of High-order Mode Spherical Wave," Thailand-Japan MicroWave 2013, TU2-11, Bangkok, Thailand, Dec. 2-4, 2013.