

Study for Harmonics Degradation of a Random Rectenna Array using Circular Microstrip Antenna

Taishi KOBAYASHI , Yuusuke YOSHIOKA and Yoshiyuki FUJINO

Faculty of Science and Engineering, Toyo University 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama, 350-8585

Abstract

Space Solar Power System (SSPS) is a system that generation of electrical energy by huge solar panel in the space, and its energy is transmitted by the wireless technologies utilizing microwave to the ground sites. In the ground sites, there are huge number of rectenna elements (rectenna array) that is a device which was equipped with rectifying circuits and receiving antennas.

A diode is used in a rectenna, which is nonlinear element, higher harmonic components are generated. Once these higher harmonic waves are reradiate to free space, the electromagnetic interference problems may occur to existing communication system. One method to decrease the higher harmonics, random rectenna array, which is a method to change the harmonics phase from rectenna elements randomly, is proposed. This composes a rectenna array which does not have strong directivity on specific direction.

Also, we used Circular Microstrip Antenna (CMSA) for receiving antennas. In CMSA, there is characteristic that it hardly excites the higher harmonics.

Now we will report of the random rectenna array that can suppress both of 2nd and 3rd higher harmonic simultaneously using CMSA.

CMSA を用いたランダムレクテナアレーの 高調波再放射抑制に関する研究

小林泰士 吉岡佑介 藤野義之

東洋大学理工学部 〒350-8585 川崎市鯨井 2100

1. 研究背景と目的

現在、化石燃料資源の枯渇や地球温暖化といった環境問題の解決策の1つとして宇宙太陽発電システム(Space Solar Power System: SSPS)が注目されている。SSPSとは、宇宙空間で巨大な太陽電池を搭載した衛星によって発電し、その電力をマイクロ波を用いて地上に送電するシステムである[1]。地上側では衛星からの電波を受信し、直流電力を取り出すために、レクテナ(rectenna)という整流回路(rectifier)とアンテナ(antenna)を組み合わせたデバイスが用いられる。SSPSではレクテナを複数個並べたレクテナアレーを用いることが検討されている。

レクテナは受信した電波を直流電力に変換するために非線形素子であるダイオードを使用する。そのため基本波 f_0 の整数倍の周波数を持つ高次高調波 nf_0 が生成される。この高調波は通常レクテナに設けられているフィルタで取り除かれるが、残留成分はアンテナから再放射される。SSPSでは数十億素子のレクテナアレーを用いるため、個々のレクテナの再放射は非常に小さくても、アレー全体の再放射は大きくなることが考えられる。

高次高調波の再放射は、他の無線システムに関する障害を引き起こすことが懸念されている[2]。先行研究では再放射の位相をランダムにランダムレクテナアレーを用いて再放射を抑制できることを示した[3]。また、ランダムレクテナアレーを用いた2次高調波電力の抑制が50素子リニアアレーで約13dB程度可能であることを示されている[4,5]。

しかしながら、レクテナで発生する高調波は2次高調波ばかりではなく、3次以降の高調波も同時に生成する。また、具体的なアンテナの放射指向性を用いて検討を行ったという報告はされていない。そこで本研究では、円形マイクロストリップアンテナを用いたランダムレクテナアレーによる2次3次高調波再放射の抑制を目的とした。

2. ランダムレクテナアレー

通常のレクテナアレーの図1の左側に示す。このアレーのアレーファクタは、各素子で生成される高調波の位相が等しいため、高調波に対してグレーティングローブが生成され、特定の方向に強い指向性を持つようになる。このため、ランダムレクテナアレーでは、図1右に示すように、アンテナから整流

回路までの電気長をランダムに変化させ再放射の位相をランダムにすることで、特定の方向に強い指向性を持たない平均化された指向性もつアレーアンテナとすることができる。

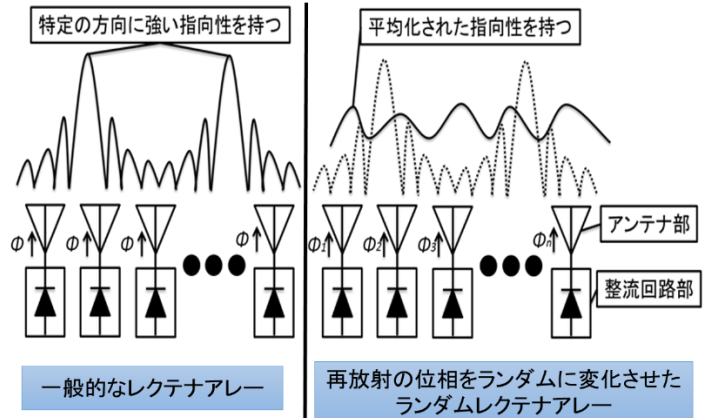


図1 ランダムレクテナアレーの概略図

2.1. レクテナアレーの放射指向性

アレーアンテナでは個々のアンテナの放射指向性に関わらず、アレーの配置間隔や、放射の振幅・位相によって決定されるアレーファクタが生じる。

2次元直方配列アレーアンテナの座標系を図2に示す。

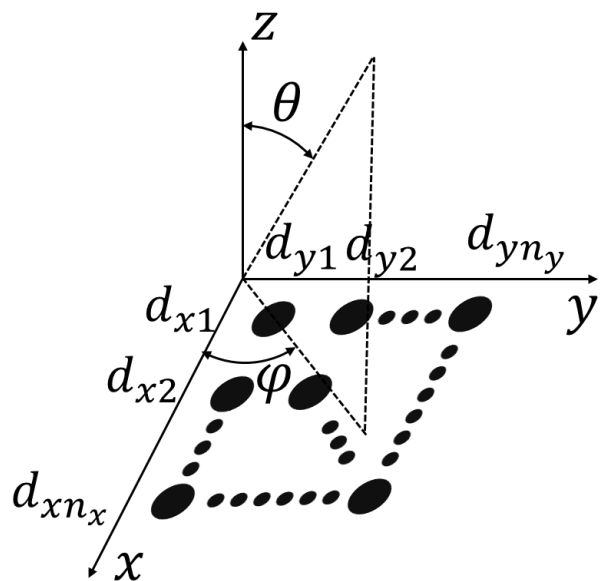


図2 直方配列アレーの配置と座標系

x 軸方向の素子番号を n_x 、 y 軸方向の素子番号を n_y とし、個々の素子番号は (n_x, n_y) と表す。

m 次高調波におけるレクテナアレーのアレーファ

クタ $f_m(\theta, \varphi)$ は以下の式で算出できる。

$$f_m(\theta, \varphi) = \sum_{n_y=0}^{N-1} \sum_{n_x=0}^{N-1} a_{m,n_x,n_y} \cdot e^{jm\delta_{n_x,n_y}} \cdot e^{jmk_0\{(d_{xn_x} \cos \varphi + d_{yn_y} \sin \varphi) \sin \theta\}} \quad (1)$$

ここで a_{m,n_x,n_y} は (n_x, n_y) 番素子における m 次高調波の振幅、 δ_{n_x,n_y} は (n_x, n_y) 番素子における m 次高調波の位相である。また、 d_{xn_x}, d_{yn_y} はそれぞれ (n_x, n_y) 番素子における x, y 軸方向の原点からの距離である。

レクテナアレーの放射指向性 $E_{am}(\theta, \varphi)$ は、アンテナ素子の放射指向性を $g_m(\theta, \varphi)$ とすると以下の式で算出できる。

$$E_{am}(\theta, \varphi) = g_m(\theta, \varphi) \cdot f_m(\theta, \varphi) \quad (2)$$

2.2. 位相値の検討

本研究では、レクテナアレーの個々の素子に位相を与えるために給電点から整流回路までの線路長を変えることで位相を変化させる方法を採用した。そのため、理論的には任意の位相値することが可能だが、実際に製作する際の設計が非常に困難である。そこで、本研究では数通りの位相値を選択し、その中からランダムに位相値を与える方式を採用した。以下、位相値とは基本波の位相値を示す。

2次高調波のみの場合、2種の位相値[0,90]で再放射の抑制が可能であるが、3次高調波と同時に抑制する場合には、この2値では困難であることを確認した。そこで、4種の位相値での抑制を検討した。筆者らは、2次3次高調波でのそれぞれの位相差が180度のペアを作ることによって、同時抑制が可能であることを示した[6]。この制約を満たす位相値の中で最大給電線路長が短い位相値[0,60,90,150]を選択した。図3に2次3次高調波の時のそれぞれの位相値の関係を示す。

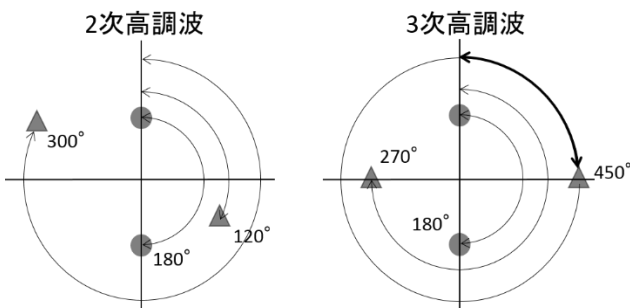


図3 位相4値[0,60,90,150]での2次3次高調波における位相値の関係

3. 円形マイクロストリップアンテナ概要

現実的なランダムレクテナアレーの効果を検証するため、アンテナ素子として円形マイクロストリップアンテナ(Circular Microstrip Antenna : CMSA)を用いた。CMSAは高次高調波の共振周波数が整数

倍にならないという特徴があるため、高調波再放射の抑制に有効である[7]。CMSAの座標系を以下に示す。

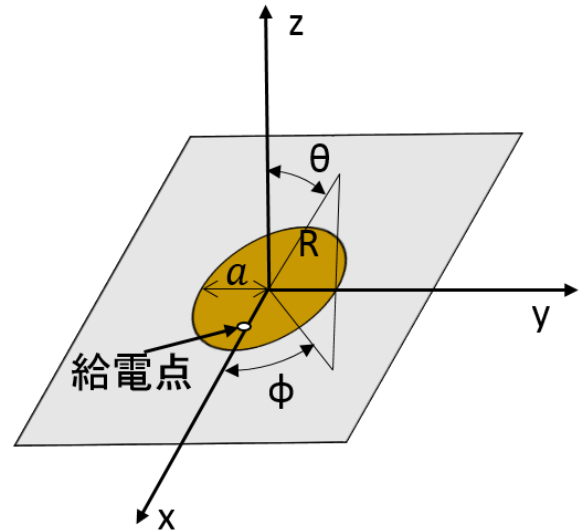


図4 CMSAの座標系

CMSAの θ, φ 方向の放射電界は、パッチで励振している電流分布(TM_{mn0}モード)から、次式で求められる[8]。

$$E_\theta = j^m B_c \left\{ \frac{\exp(-jk_0 R)}{R} \right\} \cos(m\varphi_0) \times \{J_{m+1}(k_0 a \sin \theta) + J_{m-1}(k_0 a \sin \theta)\} \quad (3)$$

$$E_\varphi = j^m B_c \left\{ \frac{\exp(-jk_0 R)}{R} \right\} \cos \theta \sin(m\varphi) \times \{J_{m+1}(k_0 a \sin \theta) + J_{m-1}(k_0 a \sin \theta)\}$$

ここで $B_c = \frac{V_0 a k_0}{2}$ である。 V_0 はCMSAの開放境界における電圧の最大値であり、 $V_0 = t E_0 J_m(X_{mn})$ で表示される。 X_{mn} は $J'_m(ka)$ の n 番目の根 a, t はそれぞれパッチの半径、厚さである。また、2次高調波の放射指向性はTM₀₁₀モードが近接しており、3次高調波についてはTM₁₂₀モードが近いため、これらのモードで放射しているとして指向性を計算した。

4. 計算手法

レクテナアレーの各素子にランダムに位相を与えて繰り返し計算を行うため、Excelに付属しているVisual Basicを用いた。

4.1. 計算の流れ

ランダムレクテナアレーによる高調波抑制最適化プログラムの簡易フローチャートを図5に示す。

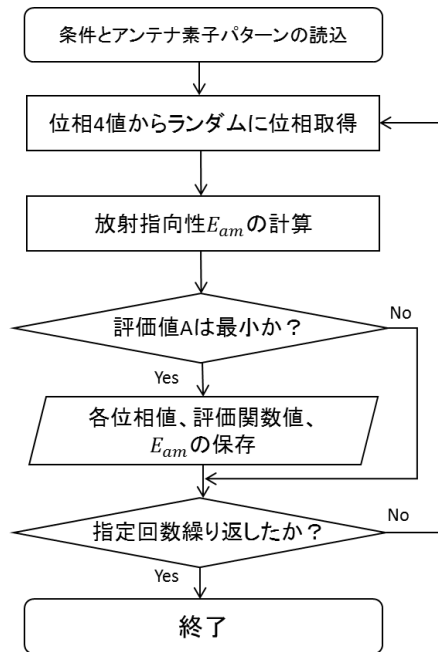


図5 最適化プログラムの簡易フローチャート

まず、素子数や間隔などの条件とアンテナの放射指向性を読み込み、計算を開始する。繰り返し計算内では、最初に4種の位相値からそれぞれの素子にランダムに位相を与える。その位相で式(2)の放射指向性 E_{am} を計算し、ピーク値を検出する。この値は同位相時の最大放射量を基準とした抑制量を意味しており、これまでに計算した抑制量と比較して大きいときには再度位相をランダムに与えて、同様の手順で計算する。小さいときには、その時の位相値、抑制量を保存し、再度位相をランダムに与え、同様の手順で計算する。

これを指定回数行うことで、最終的に最も抑制されているときの抑制量が保存されていることになる。

4.2. 評価関数

2次3次高調波を同時に抑制するため、2次3次高調波抑制量の評価が必要になる。そこで、評価関数として式(4)を用いて抑制量を評価した。

$$A = \sqrt{w_2 \cdot E_{a2}(\theta_2, \varphi_2)^2 + w_3 \cdot E_{a3}(\theta_3, \varphi_3)^2} \quad (4)$$

この評価関数は、2次3次高調波の放射指向性のピーク値をどの割合で比較するかを決定するものである。割合を決めるための重みはそれぞれ w_2, w_3 であり、本研究ではダイオードの高調波生成量を基準にした。

5. 計算条件と結果

5.1. 1次元配列アレーでの計算

まず、 x 軸方向にCMSAを配列させた場合の1次元配列アレーで計算を行った。条件は基本周波数5.8GHz、計算素子数は5~50素子、繰り返し計算回数は各素子100万回、パッチの半径 $a=9.96\text{mm}$ 、厚さ $t=0.762\text{mm}$ とした。また、素子間隔を $0.6\lambda, 0.7\lambda, 0.8\lambda$ の3種類、評価の重み比率は文献[9]で

示された、ダイオードの高調波生成量の代表的なものとして2次:3次を3:2と1:1の場合で計算した。計算結果を図6に示す。

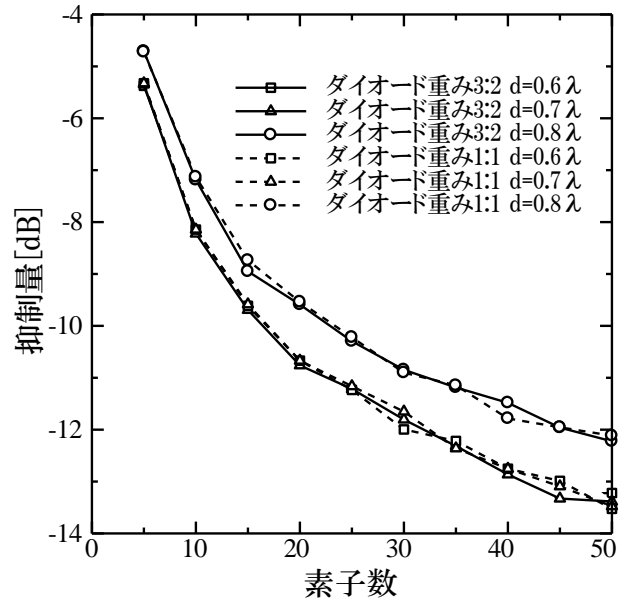


図6 1次元配列アレーの素子数—抑制量

結果から、ダイオードの重みに関係なく抑制が可能であることが確認できる。素子間隔が 0.8λ のとき、抑制量が少なくなっていることが確認できるが、これはCMSAの放射指向性のピークとアレーファクタのグレーティングローブが重なってしまったことに起因する。このことから、素子の放射指向性のヌル点にグレーティングローブを重ねることができればより大きい抑制量を得られると考えられる。

5.2. 2次元配列アレーでの計算

次に2次元直方配列アレーでの計算を行った。2次元での計算は1次元のときと比べて非常に時間がかかる。そのため、計算条件として、計算素子数は1軸方向に5素子、合計25素子、繰り返し計算回数は10万回、素子間隔は 0.7λ 、重みは3:2とした。

2次3次高調波の放射指向性をそれぞれ図7、図8に示す。両図とも左が同相時、右が抑制時の放射指向性である。25素子2次元配列アレーの抑制量の評価値は-7dBとなり、1軸方向の配列素子数での1次元配列アレーの抑制量以上の抑制が見込めることが確認できた。

6. まとめ

本研究では、CMSAを用いたランダムレクテナアレーによる2次3次高調波の同時抑制を検討した。

素子の放射指向性を導入した場合でも、4種の位相値を用いることで、2次3次高調波の同時抑制が可能となることを示した。また、素子の放射指向性と素子間隔によるグレーティングローブの兼ね合いで抑制量が変わることを確認した。

2次元配列時には、1軸方向配列素子数の1次元

配列アレーの抑制量以上の抑制量を得られることを示し、より現実的なレクテナアレーを用いた場合も、高調波の抑制が可能であることを示した。

今後は、計算プログラムの改善・高速化や、さらに将来的に起こりうる電波障害などの現実的な条件を考慮した検討、また、実際にレクテナアレーを製作し、性能の評価を行う。

7. 参考文献

- [1] P.E.Glaser, "Power from the Sun: Its Future," Science, Vol.162, no.3856, pp.857-861, Nov. 1968
- [2] 杉浦行, "II. SPS に関連する環境問題, 1, 地上の電磁環境に及ぼす SPS の影響", 電波研究所季報, Vol.28, No.148, pp.669-687, (1982 年 12 月)
- [3] V. Radchenko, and M. Fujita, "Rectenna Array Synthesis for Electromagnetic Compatibility Improvement," Space Energy and Transportation, Vol.1, No.4, p p.443-457, 1996
- [4] 藤野, 鈴木, "レクテナの不要波再放射特性に関する検討", 信学技報, SPS2005-04, pp.19-22, (2005 年 4 月)
- [5] 鈴木, 藤野, 古川, 藤原, 高橋, "宇宙太陽発電衛星システム用高調波抑制型レクテナアレーの基礎研究", 信学技報, SPS2006-04, (2006 年 5 月)
- [6] 藤野, 吉岡, 小林, "ランダムレクテナアレーによる高調波再放射抑制に関する研究", 信学技報, WPT2014-78, (2014 年 1 月)
- [7] シャリアル, 田村, 山田, 大宮, "レクテナ素子として使用するスリット入り円形マイクロストリップアンテナに関する考察" 電子情報通信学会論文誌 B, VolJ84-B, No.2, pp.244-253, Feb, 2001
- [8] 羽石, 平沢, 鈴木, 小形・平面アンテナ, pp.112-116, (社) 電子情報通信学会, 東京, 1996
- [9] 藤野, 藤田, "レクテナからの高調波再放射の測定", 通信総合研究所季報, Vol.44, No.3, pp.161-174, (1998 年 9 月)

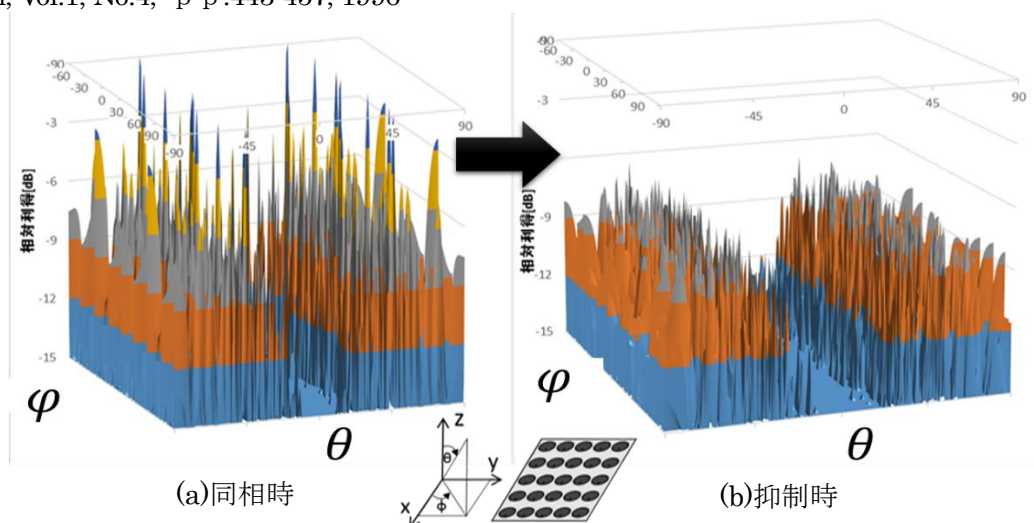


図 7 2次元配列レクテナアレーの2次高調波放射指向性

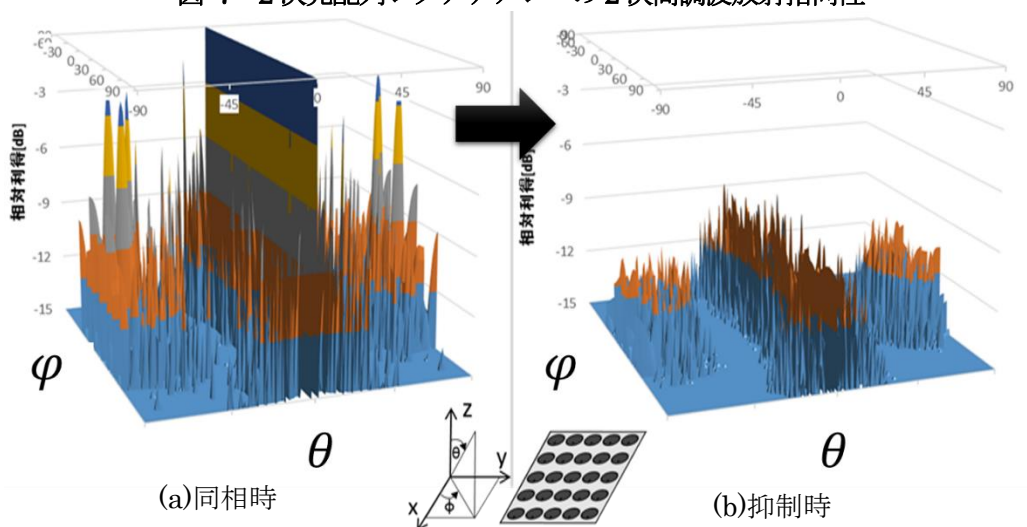


図 8 2次元配列レクテナアレーの3次高調波放射指向性