

Study on effects of mutual coupling on planar array with rectangular patch antennas

Fumito Takahashi and Kozo Hashimoto
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Abstract

A recent transmitting system of a Solar Power Satellite (SPS) has been studied on the assumption that there are no mutual coupling effects when the spacing between elements is more than 0.6 wavelength. We however have to know the behavior of the mutual coupling. The objective of the present study is to evaluate effects of the mutual coupling with changing the spacing, the phase difference between adjacent elements and the number of antennas.

We calculated the electromagnetic field of circularly polarized rectangular patch antennas. We studied linear array antennas of uniform spacing and amplitude. When we changed the spacing, we evaluated the effects of the mutual coupling with S-parameters. As we increased the numbers of elements, the minimum spacing became smaller. When we changed the phase difference, we evaluated the effects of the mutual coupling with radiation efficiency

Although we could evaluate the effects of the mutual coupling with S-parameters in a few elements, it's difficult in much more elements. We compared the sidelobe levels between the simulation results and the ideal value. We evaluated planar array antennas, and the results were similar to those of the linear array antennas. We performed experiments with SPORTS 5.8 (Space POver Radio Transmission System with 5.8GHz). We changed the spacing and the phase difference. The experimental results of the SPORTS 5.8 beam pattern in a planar array case were nearly equal to those in a linear array case.

In conclusion, we found out that the mutual coupling is negligible on SPS.

方形パッチアンテナを用いた平面アレイにおける 相互結合の影響に関する研究

高橋文人(たかはしふみと)
橋本弘藏(はしもとこうぞう)
京都大学 生存圏研究所

1 背景と目的

相互結合とはアンテナの素子間隔が小さい場合やメインビームを大きく傾けた場合に、隣り合ったアンテナ間に不必要なエネルギーのやり取りが生じる現象である。相互結合が生じるとエネルギーの損失が生じて所望の電力を送電できなかつたり、アンテナパターンが変化して予想外の方向に電力が送電される恐れがある。

SPS(宇宙太陽発電所)においては、アンテナの素子間隔が 0.6 波長以上であれば相互結合による影響は無視できるという前提の下で研究が行われているが、SPS に用いられる大規模アレイアンテナにおいて実際にアンテナの素子間隔が 0.6 波長以上であれば相互結合による影響を無視できるのかどうかは不明である。本研究の目的はアンテナの素子間隔や素子間位相差、素子数を変化させてシミュレーションや実験を行い、相互結合による影響の有無を調べることである。

2 シミュレーションによる相互結合の評価

2.1 シミュレーション環境

Agilent 社の電磁界解析ソフトウェア Momentum を使用してシミュレーションを行った。

実験で用いた SPORTS5.8 に使用されているパッチアンテナを参考に図 1 のような方形パッチアンテナを設計した。アンテナの誘電体基板の厚さや比誘電率などは参考にしたパッチアンテナと等しい。この方形パッチアンテナの偏波は右旋円偏波であり、反射特性を図 2 に示す。この方形パッチアンテナを用いた等間隔、等振幅のリニアアレイ、平面アレイにおいてシミュレーションを行った。

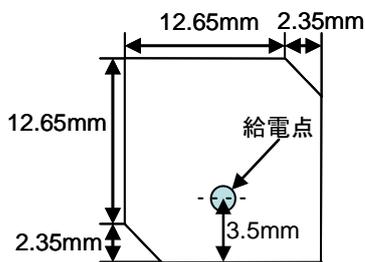


図 1 設計した方形パッチアンテナ

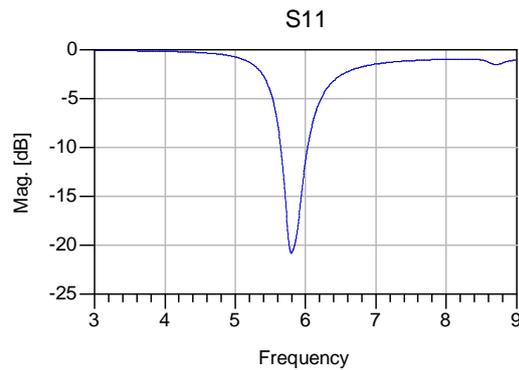


図 2 設計したパッチアンテナの反射特性

2.2 素子間隔を変化させた場合(リニアアレイ)

リニアアレイにおいて素子間隔を変化させてシミュレーションを行った。4素子の場合のSパラメータのグラフを図3に示す。

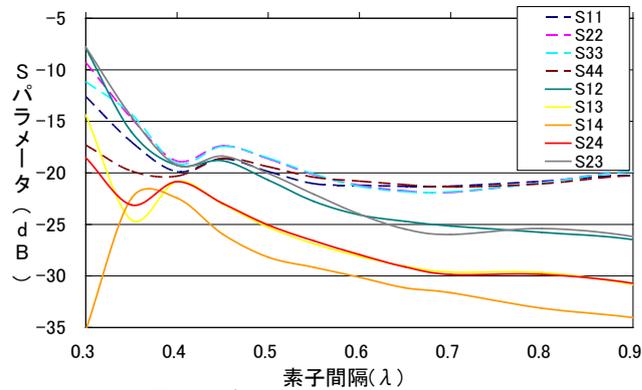


図3 4素子リニアアレイのSパラメータ

Sパラメータを用いて相互結合による影響を評価すると、反射を表すSパラメータ $|S_{ij}(i \neq j)|$ が -20dB 以下であれば相互結合による影響を無視できる。図3では反射を表すSパラメータを実線で表しており、図3より素子数が4の場合には素子間隔が0.5波長以上であれば相互結合による影響を無視できるといえる。

素子数が8、12、20の場合についても同様なシミュレーションを行い、各素子において相互結合による影響を無視できる最小の素子間隔を表1に示す。素子数を変化させてもSパラメータのグラフには大きな違いが見られなかった。また表1より素子数が大きくなるにつれて、相互結合による影響を無視できる最小の素子間隔は小さくなる傾向が見られた。これらより素子数に関係なく素子間隔が0.5波長以上であれば相互結合による影響を無視できるといえる。

表1 影響を無視できる最小素子間隔

素子数	最小素子間隔(λ)
4	0.500
8	0.498
12	0.492
20	0.487

2.3 素子間位相差を変化させた場合(リニアアレイ)

リニアアレイにおいて素子間隔を変化させてメインビームのシミュレーションを行った。素子間の位相差を変化させることでメインビームの方向を変えることができる。ただし本研究ではスキャンブラインドネスは考慮していない。

素子間隔を変化させた場合にはSパラメータを用いて相互結合による影響を評価したが、シミュレーションに用いたMomentumでは素子間位相差を変化させてもSパラメータは変化しないので、Sパラメータの代わりに次のように放射効率を用いて相互結合による影響の評価を行った。放射効率による相互結合の影響の評価では、リニアアレイの放射効率が1素子の放射効率よりも大きい場合には相互結合による影響を無視できるとおいた。

図4に8素子の場合の放射効率のグラフを示す。ただし素子間隔を0.6波長に固定し、このときグレーティングローブはメインビームを 41.8° 以上傾けた場合に生じる。図4よりメインビームを 34.6° 以内に傾ければ相互結合による影響を無視できるといえる。

素子数が8、12の場合についても同様なシミュレーションを行い、各素子において相互結合による影響を無視できる最大のメインビーム方向を表2に示す。素子数が大きくなるにつれて、相互結合による影響を無視できる最大のメインビーム方向は大きくなる傾向が見られた。これらより素子数に関係なくメインビーム方向が約 30° 内であれば相互結合による影響を無視できるといえる。

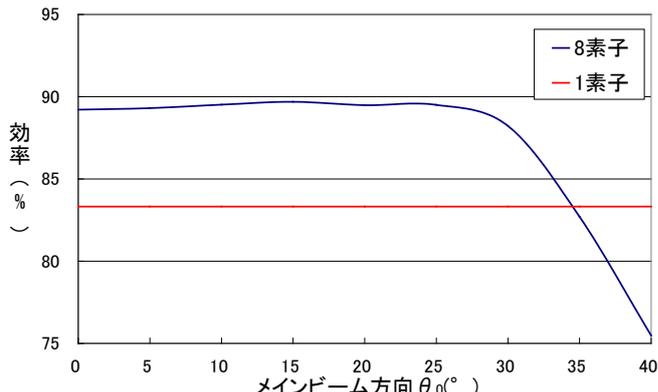


図4 8素子リニアアレイの放射効率

表2 影響を無視できる最大メインビーム方向

素子数	メインビーム 最大角 θ
4	31.3°
8	34.6°
12	36.7°

2.3 平面アレイの場合

x 方向に 4 素子、y 方向に 4 素子計 16 素子を平面状に並べた平面アレイにおいてリニアアレイと同様にシミュレーションを行った。まず素子間隔を変化させてシミュレーションを行った。16 素子の平面アレイでは素子間隔が 0.51 波長以上であれば相互結合による影響を無視できるといえる。この結果は 4 素子リニアアレイの結果とほぼ等しいので、平面アレイにおける相互結合による影響はリニアアレイにおける影響とほとんど変わらないと考えられる。また平面アレイにおける影響は x 方向よりも y 方向に隣接する素子間の S パラメータによって決まるが、これは給電点の位置が x 方向のアレイには対称であるのに対して、y 方向のアレイには非対称であるからと考えられる。また本研究で用いた方形パッチアンテナが厳密な円偏波でないこともわずかに影響していると考えられる。

次に素子間位相差を変化させてシミュレーションを行った。平面アレイではグレーティングロブが生じない範囲では相互結合による影響は見られなかった。

2.4 アンテナパターンのサイドロブの差を利用した相互結合の評価方法

本研究では S パラメータや放射効率を用いて相互結合による影響について評価を行ってきた。しかし SPS により素子数が多い場合にはパラメータの数が非常に多くなり、影響を評価するのは困難である。そこで本研究ではアンテナパターンのサイドロブの差を利用して相互結合による影響の評価を行った。理論値のアンテナパターンとは無指向性な素子の配置で決まる指向性アレイファクタと図 7 に示すアレイファクタの積であり、相互結合による影響を考慮していない。この理論値と相互結合による影響が含まれているシミュレーション結果のアンテナパターンを比較して、ある値の範囲内におけるサイドロブの差がある基準値以内に収まっていれば相互結合の影響は無視できるとする評価基準を用いて相互結合による影響を調べた。同時に比較対象にする範囲や差の基準値について、評価が妥当となるような値を求めた。

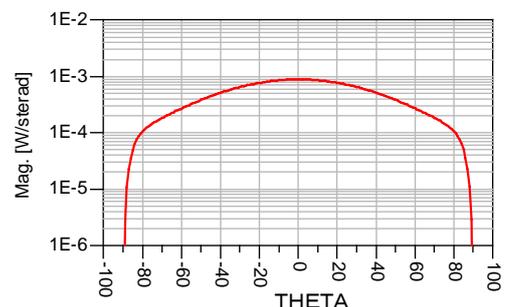


図7 設計したパッチアンテナの指向性

リニアアレイにおいて素子間隔を変化させた場合には、妥当だと思われる 2 つの評価基準とこれを用いて評価した相互結合による影響が無視できる最小の素子間隔を表 3 に示す。表 3 より S パラメータと比較すると、基準 1 を用いた場合には S パラメータと同様に素子数が多くなるにつれて最小の素子間隔が小さくなる傾向があるが、素子数が多い場合には S パラメータの結果からずれる。一方基準 2 を用いた場合には素子数が少ない場合にはばらつきがあるが、素子数が多い場合には S パラメータに近い結果になった。

表 3 素子間隔を変化させた場合のサイドローブの差を用いた評価

素子数	S パラメータ	基準 1		基準 2
		アンテナパターン	-25dB 以上	-30dB 以上
		サイドローブの差	25%以内	30%以内
4	0.500 λ	0.514 λ		0.475 λ
8	0.498 λ	0.463 λ		0.520 λ
12	0.493 λ	0.409 λ		0.537 λ
20	0.487 λ	0.364 λ		0.482 λ

素子間位相差を変化させた場合にも同様に妥当だと思われる 2 つの評価基準とこれを用いて評価した相互結合による影響が無視できる最大のメインビーム方向を表 4 に示す。表 4 より放射効率の結果と比較すると、基準 1 を用いた場合には放射効率の結果とほぼ一定の差があり、基準 2 を用いた場合には素子数が多くなるにつれて放射効率の結果に近づく傾向が見られた。

表 4 素子間位相差を変化させた場合のサイドローブの差を用いた評価

素子数	放射効率	基準 1		基準 2
		アンテナパターン	-20dB 以上	-25dB 以上
		サイドローブの差	20%以内	30%以内
4	31.3°	24.3°		16.4°
8	34.6°	23.8°		25.9°
12	36.7°	29.0°		33.0°

平面アレイにおいても同様に評価すると、素子間隔を変化させた場合にはアンテナパターンの対象範囲に関係なくサイドローブの差が 20%以内で影響を無視できるとすると、最小の素子間隔が 0.45 波長であった。また素子間位相差を変化させた場合にはアンテナパターンの対象範囲が-20dB 以上でサイドローブの差が 20%以内で影響を無視できるとすると最大のメインビーム方向は 29.6°、対象範囲が-25dB 以上で差が 30%以内で影響を無視できるとすると最大のメインビーム方向は 27.6° であった。

2.5 SPS における相互結合の影響

これまでの考察から SPS における影響について考える。JAXA の 2004 年型 M-SPS 基準モデル[1]では送電部の直径が 1.8km~2.5km であり、素子数が膨大になる。また SPS のビーム制御角はせいぜい±5° 程度といわれている。従って現在の SPS モデルでは相互結合による影響は無視できるといえる。

3 SPORTS5.8 を用いた実測実験

本研究所にあるマイクロ波送電実験装置 SPORTS5.8 を用いて相互結合についての実験を行った。図 8 に実験モデルを示す。

まず素子数が 4 のリニアアレイにおいて素子間隔を 0.6 波長と 0.8 波長の場合について実験を行った。図 9 にアンテナパターンを示す。図 9 より両者のメインビームはシミュレーション結果とほとんど一致しているが、サイドローブは素子間隔が広い方がよりシミュレーション結果に近づいている。また素子間隔が 0.6 波長の場合でもサ

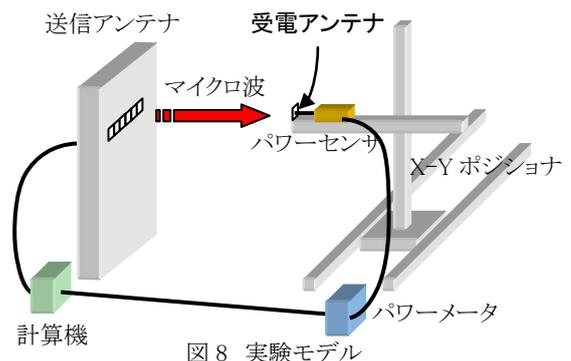


図 8 実験モデル

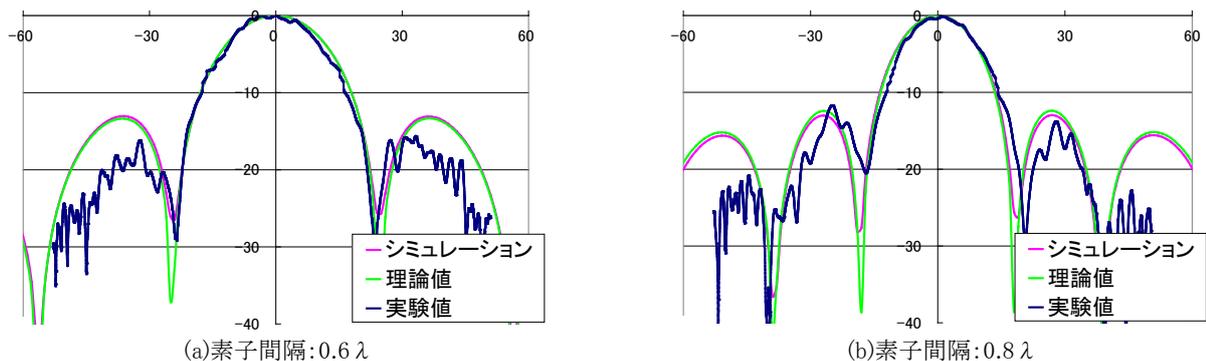


図9 素子間隔を変化させた場合

イドローブの半値幅はシミュレーション結果とほとんど一致しているのですが、この実験では相互結合による影響は見られなかった。

次に素子間位相差を 45° と 90° 、つまりメインビーム方向が 12° と 24.6° の場合について実験を行い、結果を図 10 に示す。図 10 よりメインビーム方向が 12° の場合には理論値とほとんど一致しており、メインビームが 24.6° の場合には半値幅やヌル点がずれているもののサイドローブの差はほとんど変わらないので、これは X-Y ポジショナなどの測定誤差によるものだと考えられ、この実験では相互結合による影響は見られなかった。

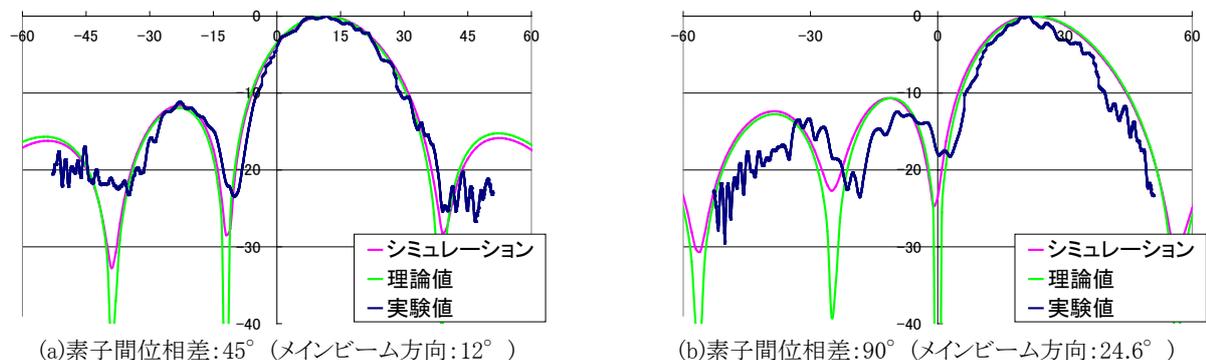


図10 素子間位相差を変化させた場合

また 16 素子の平面アレイにおいても同様な実験を行ったが、測定したアンテナパターンはリニアアレイとほとんど等しかった。

4 まとめと今後の課題

方形パッチアンテナを用いてリニアアレイ、平面アレイにおいて素子間隔や素子間位相差、素子数を変化させてアンテナ間の相互結合による影響についてシミュレーションや実測実験を行った。S パラメータの代わりにアンテナパターンのサイドローブの差に着目して、影響の有無について調べた。現在の SPS モデルでは相互結合による影響を無視できるといえる。

今後はより多くの場合についてシミュレーションを行うことで、サイドローブの差を用いる評価基準の妥当性について検討する必要がある。また本研究では素子間位相差を変化させた場合に放射効率を用いて影響を評価したが、走査損による放射効率の低下を考慮していないので結果は正確性に欠ける。走査損による放射効率の低下や素子間位相差を変化させた場合のその他の評価基準についてさらに考察することで、より正確に相互結合による影響を評価できると考えられる。

参考文献

- [1] 齊藤由佳, 香河英史, 森雅裕, "JAXA における宇宙エネルギー利用システム実現性検討", 電子情報通信学会信学技報, SPS2005-01, 平成 17 年 4 月