

Countermeasure against Abnormal States of an SPS System Using a Novel Microwave Transmitting Antenna

Tadashi Takano* and Yasuhiro Kazama+

* Nihon University, Department of Electronics and Computer Science

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, 274-8501 Japan.

+ Institute of Space & Astronautical Science, JAXA

3-1-1 Yoshino-dai, Sagamihara, 229-8510 Japan

Abstract

The microwave power which SPS systems handle is quite large, for example, 5,0GW in NASA Reference System and 10MW in SPS2000 System. The power is beamed and pointed to a rectenna on the ground. In a abnormal state, the beam may be directed to unwanted directions, or the microwave frequency may hop to an prohibited range as failure modes. Therefore, countermeasures against abnormal states is indispensable for the safety of the SPS System itself and environments.

We consider first to cut off the DC power generated by solar cells, but it is an easy task, as stated later. It is esteemed to be a best solution to scatter the generated microwave power into space in an abnormal state.

We propose to switch the phase distribution from the uniform one to a spherical one in order to expand the radiated beam. The design method of such a wide beam antenna is also proposed. Actually, simulation is carried out to confirm the validity of these methods.

SPS システム異常に対する

新しいマイクロ波送電アンテナによる対処法

高野忠*、風間保宏+

* 日本大学・理工学部 〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1

+ 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 〒229-8510 相模原市由野台3-1-1

1. まえがき

SPS システムで扱うマイクロ波電力は、NASA 規準システムで500万KW[1]、日本のSPS2000 システムでも1万KW[2]と、極めて大きい。その電力はビーム状でレクテナに向けられているが、システム異常状態では、ビームが望ましくない方向に向いたり、周波数が許されていない領域に飛ぶなどの、故障モードが考えられる。従って、SPS システムが異常事態に陥る時、システム自身および周囲環境の安全のため、対策を施す必要がある。

電力の源である太陽電池からの直流電気を、すぐ切れれば問題無いが、後述するように簡単ではない。発生したマイクロ波を宇宙空間に散逸させることが、最良と考えられる。

我々は位相配列アンテナの位相分布を、一様分布から球面状分布に切り替えて、ビーム拡大させる方法を提案する。また実際広角ビームを実現する設計法を提案する。実際にシミュレーションにより、この方法の妥当性を実証する。

2. システム異常時の対応

対応策としては、いくつか考えられる。電源に近い方から列挙すれば、下記のようなろう。

- (1) 太陽電池出力の遮断
- (2) マイクロ波増幅器入力 of 遮断
- (3) マイクロ波増幅器出力 of 遮断
- (4) アンテナ出力での拡散

太陽電池出力を大電力段で遮断することは、放電による短絡が起りやすく難しい。短絡を防ぐため、地上では高圧ガスや油を封じた遮断器を使うが、軌道上では重量を増やすので望ましくない。小電力段で小形遮断器を多数使うことも考えられるが、重量を増やす。

マイクロ波増幅器の励起入力信号を遮断すると、雑音のみ入力することになるので増幅されて、不要周波数が発生することが危惧される。

マイクロ波増幅器出力の大電力マイクロ波を遮断することは、マイクロ波が反射するので、熱的破損が生じやすい。

以上から、アンテナ出力での拡散が有望と思われる。その概念を図1に示す。正常時は

狭いマイクロ波ビームで、地上のレクテナを照射している。システムの異常を検出すると、ビームを即座に広げて地上で害にならないレベルまで低くする。

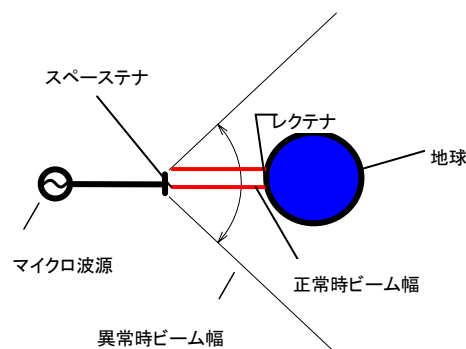


図1 アンテナ出力での拡散法

3. ビーム拡散の方法

スペースステナは図2に模式的に示すように、共振型の小形放射素子を並べた位相配列アンテナ (Phased Array Antenna) とする[3]。正常時に鋭いビームがレクテナに正確に向くよう

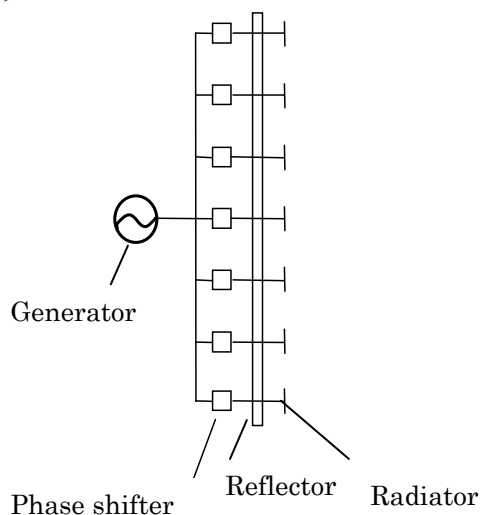


図2 位相配列アンテナの模式図

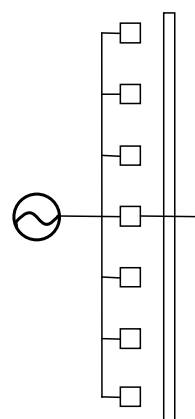


図3 素子切り離しによるビーム拡散方法

に制御するため、各放射素子には移相器が接続されている。

図3はビームを広げる1方法を示す。大部分の素子を切り離してしまい、少数の素子(ここでは1個)のみ給電し放射させる。この場合ビーム幅は、給電する素子数にほぼ反比例して広がる。しかし増幅器の切り離し操作が必要で、2節の(3)項と同じ問題がある。また給電する素子に接続されている増幅器は、正常時と異なる大電力を扱うことになり、他の増幅器と異なる性能が必要になる。

また異常時に、移相器を制御して、ランダム位相を与える案もある。この方法によれば、前述のつなぎ変えの問題が無い。しかし、確率的に高いサイドローブを生じて、不要な方向にマイクロ波を放射する可能性がある。

そこで本論文では移相器を、球面波状位相分布を与えるように制御する方法を提案する。

4. シミュレーション結果

シミュレーションの条件を以下に示す。

- ・ 素子： 等方性放射体で、1001素子を一行に並べる。便宜のため素子番号を、真ん中を0、右側を正、左側を負として付ける。
- ・ 素子間隔： $\lambda / 2$
- ・ 位相分布： 球面波状、等価半径 R_p
- ・ 周波数： 2.45 GHz
- ・ 励振振幅： 独立な状態で放射電界が1になるように、各素子を励振する。
- ・ 素子間の結合は、無視する。

まず位相が全て一樣な場合、放射パターンをもとめて電界の振幅について表示すると、図4となる。いわゆる sinc パターンであり、ペンシルビームが得られている。電力半値ビーム幅 Θ と波長 λ 、アンテナの長さ D との間には、 $\Theta \approx \lambda / D$ の関係がある。この場合 $D=500\lambda$ なので、 Θ の概略値は約 $1/500$ ラジアンすなわち 0.11 度になるはずであり、シミュレーション結果はこれと一致している。

次に各移相器の位相を、球面波になるように設定する。仮想的点波原からアンテナを見込む角度を、 ± 20 度とすると各素子の位相は、図5のようになる。横軸は素子の番号で、縦軸の位相量は長さで表示しており、波長 122 mm で 360 度に相当する。中心と端の移相器で、 5.2 m すなわち 360×43 度の位相差がある。

この時の放射パターンは、図6のように求められる。ビーム幅はほぼ 40 度であり、設計通りである。放射振幅は角度 0 度で最も低く 52 であり、ビーム軸から離れるに従い大きくなるがリップルも大きくなる。放射電力は電界の 2 乗に比例し、ビーム幅内の積分エネルギーは一定になる。従って放射振幅はビーム幅の平方根に反比例するはずであり、図4と図6を比較すると、この関係を満たしていることが分かる。

次にアンテナ見込み角度を ± 60 度とすると、位相分布は図7となる。中心と端の移相器で、 18 m の位相差がある。

この時の放射パターンは、図8のように求められる。ビーム幅はほぼ 120 度であるが、高さの変化が図6に比べ急峻になっている。放射振幅は角度 0 度で 25 であり、ビーム端で 73 に達する。

以上説明したように、ビーム幅はアンテナ見込み角度にほぼ等しくできることが分かった。ただビーム幅が広がると、放射パターンが矩形から崩れる。この特性をまとめると、図9となる。横軸は所望のビーム幅、縦軸は本設計法で実現されるビーム幅と、角度 0 度とビーム端における放射振幅を、表している。ビーム幅 20 度くらいまでは、パターンがほぼ矩形なので、放射振幅はビーム幅の平方根に逆比例している。しかしビーム幅がさらに広がるにつれ、角度 0 度ではもっと低下し、ビーム端では高くなることが示されている。

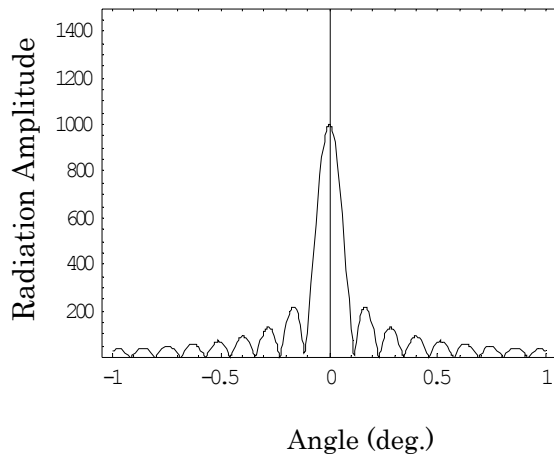


図4 一様位相分布での放射パターン

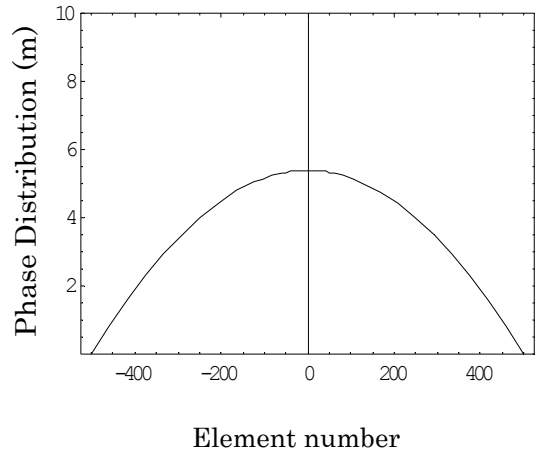


図5 球面波状位相分布 (見込み角度: ± 20 度)

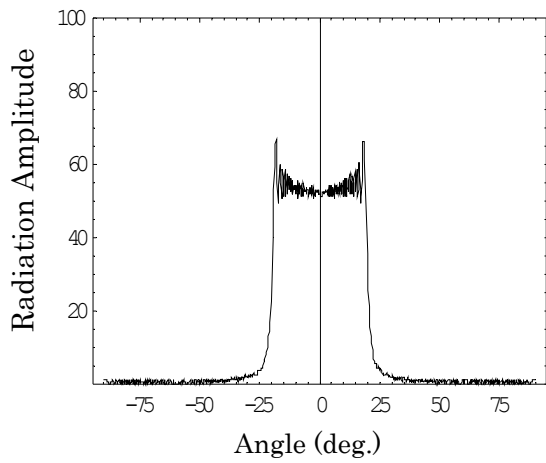


図6 見込み角度 ± 20 度における放射パターン

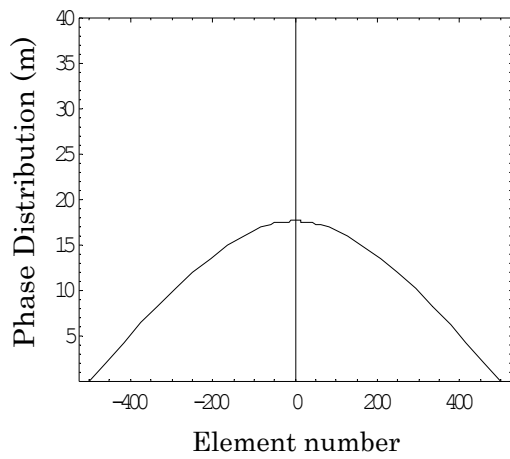


図7 球面波状位相分布
(見込み角度: ± 60 度)

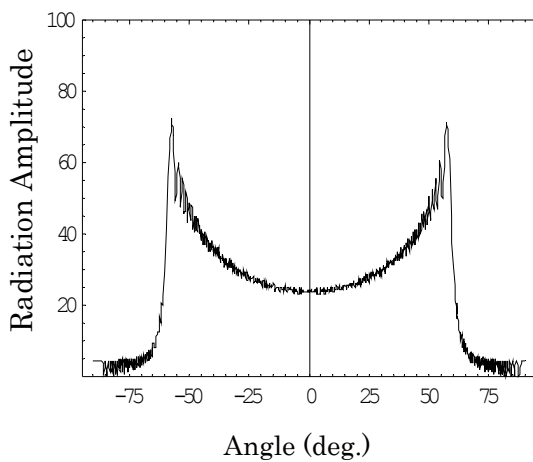


図8 見込み角度 ± 60 度における
放射パターン

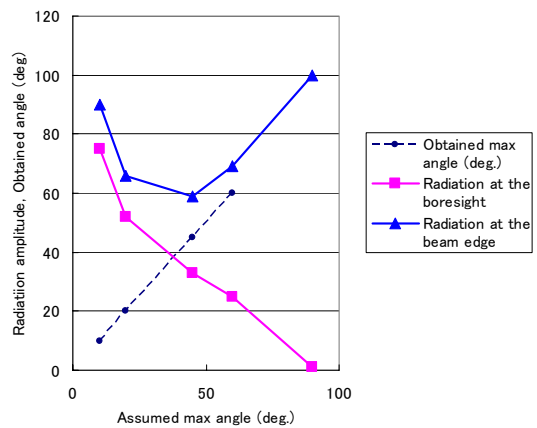


図9 ビーム幅を変化させた時のアンテナ特性

5. 地上での放射電力密度の推定

本節では、広角ビームアンテナによるエネルギー拡散度を推定する。前節までの解析は1次元モデルで行なっているため、その結果を2次元モデルに拡張するという手順を取る。

まず正常状態では一様分布であり、図4のパターンを用いる。その電力半値ビーム幅 Θ は0.11度である。これを異常時に、40度に上げるとすると、角度比は364倍である。これは1次元であるが、地上ビームの足跡面積は2次元なのでその2乗であり、 1.32×10^5 となる。すなわち足跡面積が大きくなる分だけ、照射エネルギー密度を薄めることができる。これを、マイクロ波電力伝送におけるエネルギー拡散度と呼ぶことができよう。

例えばNASAのSPS規準システムでは、 23 mW/cm^2 の電力を地表で受ける。異常時にエネルギー拡散を行なえば、以下の値に減少できる。

$$\cdot \quad 23 \text{ mW/cm}^2 / 1.32 \times 10^5 = 1.74 \times 10^{-4} \text{ mW/cm}^2$$

現在、電波に対する人体への保護規準は、 1 mW/cm^2 である[4]。上の値はそれより4桁も低い値であり、SPSシステムの異常時にも十分低い電力を実現できることになる。

6. まとめ

位相配列アンテナによって、SPSシステムの異常時に対応する方法を提案した。これは放射ビームを格段に広げて、地上の照射エネルギー密度を低くするものであるが、正常時の回路構成を大幅に変えることなく、ビーム拡散ができる特徴がある。

さらに提案する方法で広ビームアンテナを設計し、シミュレーションを行なったところ、指定されたビーム幅を実現できた。ただしビーム幅を広くしていくと、ビーム幅内で利得変動が大きくなる。

本方法を、例えば、NASAのSPS規準システムに適用したとする。するとビーム幅40度に拡散でき、エネルギー密度は人体への保護規準より4桁も低い値にできる。

異常復旧の作業は、ビーム拡散した後で行なえる。実際の手順は、今後検討する。また提案した方法は、レーダや宇宙通信のように、捕捉操作を伴うシステムにも応用できる。

謝辞

本研究の一部は、総務省からの委託研究「高マイクロ波帯用アンテナ技術の高度化技術の研究開発」により行なわれた。関係者に感謝する。

参考文献

- [1] NASA CR 3393, 1981年
- [2] 宇宙科学研究所, SPS2000タスクチーム, “SPS2000概念計画書”, 1993年7月
- [3] T. Takano, S. Kawasaki, H. Toshiyoshi, H. Ikeda and Y. Kazama, “The R&D of Active Phased Array Antennas with Significant Cost Reduction and Usage Convenience”, ISAP07, 4B3-3, Niigata JAPAN, 2007.
- [4] 平成2年度「電波利用における人体の防護指針」(電気通信技術審議会答申)