

電力伝送用超大規模アレーアンテナにおける ランダムに分布した破損素子の影響

今野 佳祐[†] 陳 強[†] 澤谷 邦男[†] 瀬在 俊浩^{††}

[†] 東北大学大学院 工学研究科 電気通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
^{††} 宇宙航空研究開発機構, 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1 調布航空宇宙センター
E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 宇宙太陽光利用システム (Space Solar Power Systems, SSPS) 用の超大規模アレーアンテナにおいて, 破損素子及び素子間相互結合の影響を考慮する必要がある. 本報告では, 超大規模アレーアンテナにおける破損素子及び相互結合の影響を IEM/LAC (Impedance Extension Method/Local Admittance Compensation) によって解析する. その結果から, 超大規模アレーアンテナの動作利得において破損素子及び相互結合の影響が大きいことを明らかにする.
キーワード SSPS, アレーアンテナ, モーメント法, IEM/LAC.

Effect of Randomly Distributed Faulty Elements on a Huge-scale Array Antenna for Power Transmission

Keisuke KONNO[†], Qiang CHEN[†], Kunio SAWAYA[†], and Toshihiro SEZAI^{††}

[†] Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

^{††} Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu Aerospace Center 7-44-1 Jindaiji Higashimachi, Chofu,
Tokyo, 182-8522, Japan

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract On the huge-scale array antenna for SSPS (space solar power systems), the problem of faulty elements and effect of mutual coupling between array elements should be considered in practice. In this paper, the effect of faulty elements as well as mutual coupling on the performance of the huge-scale array antenna are analyzed by using the proposed IEM/LAC. The result shows that effect of faulty elements and mutual coupling on the actual gain of the huge-scale array antenna are large.

Key words SSPS, array antenna, method of moments (MoM), IEM/LAC.

1. ま え が き

近年, 化石燃料に代わる新しいエネルギー源の開発が, 未来に向けて克服すべき課題となっている. そのような代替エネルギー源の 1 つとして, 宇宙太陽光利用システム (Space Solar Power Systems, SSPS) が大きな注目を集めている [1], [2]. SSPS は太陽光をエネルギー源として利用し, 得られた電力を SSPS 上にある超大規模周期的アレーアンテナ (数億素子規模) からマイクロ波として地上に送信する. このような超大規模周期的アレーアンテナの解析は SSPS を実現するために不可欠な課題である.

SSPS 用超大規模アレーアンテナの送信電力は非常に大きい. 素子間相互結合の影響を含む動作利得の正確な解析が電力効率の観点から欠かせない. 従って, 素子間相互結合が動作

利得に及ぼす影響を明らかにすることが興味深い研究課題の 1 つである. また, 運用中の SSPS では, 電力伝送用アレーアンテナにおいて給電回路の故障や断線のために破損素子が存在し得る. 破損素子はメインロープレベルの減少のみならず, サイドロープレベルの増大も引き起こすことから, 電磁環境工学 (Electromagnetic Compatibility, EMC) の観点から見て, 破損素子数と動作利得の変動との関係を明らかにすることがもう 1 つの魅力的な研究課題である. しかしながら, アレーアンテナ中における破損素子に関するほとんどの研究は, 破損素子を探索するアルゴリズムの開発に関する研究に限られており [3]- [5], 破損素子数と動作利得の変動との関係を検討したものは少ない.

過去の研究では, 周期的アレーアンテナの解析は統計的・確率的な手法によって行われてきた. Hsiao らは, 素子の振幅や位

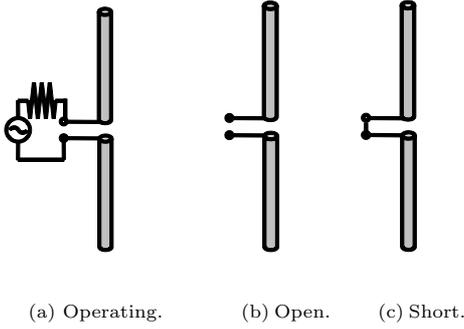


Figure 1 破損素子の定義.

相に含まれる誤差とアレーアンテナのサイドロブレベルとの関係が仲上-ライス分布に従うことを明らかにした [6], [7]. しかしながら, 破損素子数とサイドロブレベルとの関係はこれらの論文中で明確に議論されていない. Skolnik らは, 統計的に密度テーパアレーアンテナを設計する手法を提案した [8]. しかしながら, 計算機資源に制約があったために, これらの論文中では素子間相互結合の影響が無視されている.

近年, 計算機の進歩に伴って周期的アレーアンテナを数値的に解析することが可能になってきている. モーメント法 (Method of Moments, MoM) に高速多重極法 (Fast Multipole Method, FMM) [9] や高速フーリエ変換 (FFT) [10] を組み合わせた手法は, それぞれ周期的アレーアンテナを解析する強力な手法の 1 つである. 統計的・確率的な手法と異なり, MoM は素子間相互結合及びエッジ効果を考慮して周期的アレーアンテナを解析することができる. しかしながら, 莫大なメモリを有する高速計算機を用いたとしても, MoM によって数億素子を有する超大規模周期的アレーアンテナの解析は不可能である.

上述のような問題を解決するために, 筆者らはインピーダンス拡張法 (Impedance Extension Method, IEM) [11], [12] 及び局所アドミタンス補償 (Local Admittance Compensation, LAC) [13] を提案してきた. IEM を用いると, 素子間相互結合及びエッジ効果を考慮して, 数億素子を有する超大規模アレーアンテナの解析をすることが可能である. 加えて, IEM を LAC と組み合わせて用いる (IEM/LAC) ことで, 破損素子を有するアレーアンテナも正確に解析できる. 本報告では, ランダムな位置に破損素子を含む超大規模アレーアンテナに対して IEM/LAC を適用し, 破損素子数が動作利得に及ぼす影響を明らかにする. 更に, 素子間相互結合がメインロブレベル及びサイドロブレベルに及ぼす影響も定量的に検討する.

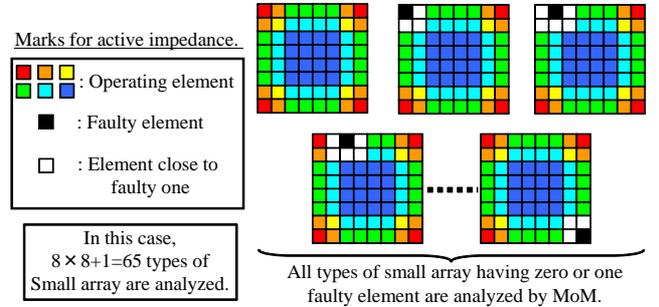
2. 破損素子の定義

本報告では, 図 1 に定義するような 2 種類の破損素子を考える. Open 素子はケーブルの断線による給電回路の故障を表しており, 電源抵抗を無限大に設定している. Short 素子は給電回路の破損による不整合や出力低下を表しており, 電源抵抗及び電圧の両方を 0 に設定している.

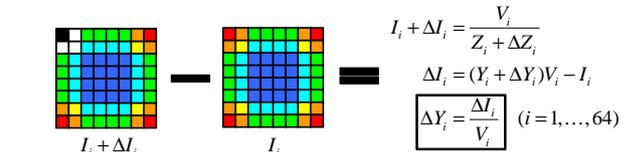
図 1 に示されるような破損素子は運用中の超大規模アレーアンテナ中に存在し得る. 破損素子は, その周囲に存在する素子の動作アドミタンスの変動を引き起こすのみならず, アレーア

ンテナの動作利得に影響を及ぼす. 破損素子を含むそのようなアレーアンテナを正確かつ高速に解析するために, 次章で触れる IEM/LAC がこれまで提案されてきた [13].

3. IEM/LAC



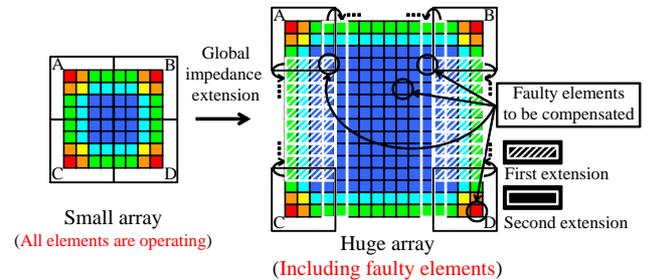
(a) Step 1 Small array 全パターンの解析.



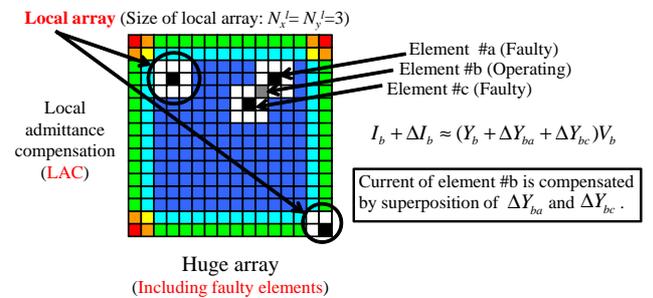
I_i, V_i : Current or voltage of feeding segment in i th element, respectively.
 Z_i, Y_i : Active impedance or admittance of feeding segment in i th element, respectively.
 Δ : Difference from small array w/o faulty elements.

This process is carried out for all small arrays.

(b) Step 2 動作アドミタンス差分の計算.



(c) Step 3 Huge array への動作インピーダンス拡張.



(d) Step 4 局所アドミタンス補償 (LAC) の実行.

Figure 2 IEM/LAC (Small array: 8×8 , Huge array: 16×16).

図 2 に, IEM/LAC の詳細を順番に示す. 図中において, ほぼ同じ値の動作インピーダンスを有する素子は同じ色で表してい

る。解析対象の超大規模アレーアンテナ (Huge array) のサイズは 16×16 とし、小規模アレー (Small array) のサイズは 8×8 とする。IEM/LAC は、規模がある程度以上の周期的アレーアンテナの動作インピーダンス/アドミタンスが、アレーサイズに依らずほとんど一定であることを利用している [11]- [13]。

まず、破損素子のない・あるいは 1 素子だけ破損素子を含む Small array の全パターンを MoM によって解析する (Step 1)。次に、1 素子だけ破損素子を含む Small array の動作アドミタンスから、破損素子を含まない Small array の動作アドミタンスを引いて差分を取り、保存する (Step 2)。その後、破損素子を除く Huge array 各素子の動作インピーダンスを、Small array からコピーして得る (Step 3)。Step 3 において、Small array 中の動作インピーダンスは、Huge array 中の角部において対応する素子に充填される。Huge array 中にあるその他の素子の動作インピーダンスは、図 2(c) に示されているように、角部にある素子の値を逐次的にコピーして得られる。更なる詳細を知りたい読者の方は、文献 [11] を参照されたい。最後に、Step 2 で求めた動作アドミタンスの差分を利用して、破損素子周辺にある素子の動作アドミタンスの変動分を補償する (Step 4)。ここで、動作アドミタンスを補償する領域のことを“Local array”と呼ぶ。LAC は重ね合わせの原理に基づいているため、IEM/LAC は複数の破損素子に近接した素子の動作アドミタンスも求めることができ、ランダムな位置に無数の破損素子を有する Huge array の解析へも容易に適用できる。

4. IEM/LAC の有効性

本章では、IEM/LAC の有効性を数値解析によって示す。解析モデルは、図 3 に示すような反射板付き 2 次元クロスダイポールアレーアンテナである。各素子に与えた給電振幅分布はガウス分布に従う 10dB テーパーである。各素子の給電位相も調整することができ、 $(\theta_{\text{main}}, \phi_{\text{main}})$ のようにビーム走査方向で表す。また、グラウンド板の影響を考慮するために鏡像法を用いる。そして、本報告における全ての数値解析結果は東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-9 を用いて得られたものである。

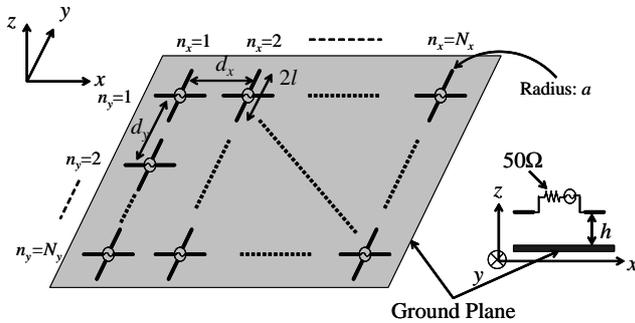
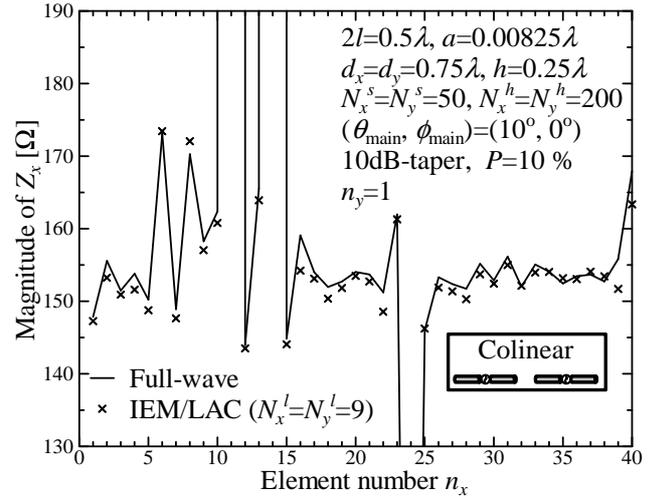
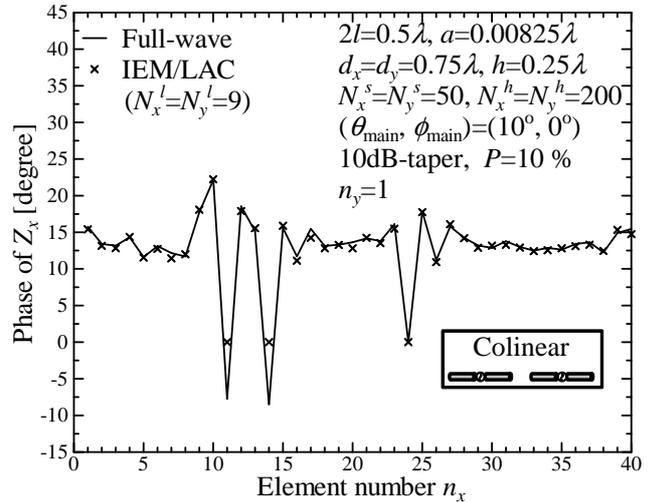


Figure 3 SSPS 用 2 次元クロスダイポールアレーアンテナ。

$N_x^h = N_y^h = 200$ の Huge array を IEM 及び IEM/LAC によって解析する。Open あるいは Short の故障は同じ確率でランダムに生じると仮定され、 P を Huge array における破損素子の割合とする。IEM, IEM/LAC のどちらにおいても、Small



(a) 振幅。



(b) 位相。

Figure 4 動作インピーダンス。

array のサイズは $N_x^s = N_y^s = 50$ とし、IEM/LAC における Local array のサイズは $N_x^l = N_y^l = 9$ とする。

一例として、図 4 に Huge array における各素子の動作インピーダンスの振幅及び位相を示す。図 4 において、“Full-wave” とあるのは MoM と共役勾配法を組み合わせた手法によって得られた厳密解であり、そのプログラムはスーパーコンピュータ用の並列化・ベクトル化チューニングを施して高速化してある。図中において、 $n_x = 11, 14,$ and 24 の位置が破損素子の位置であり、破損素子によって動作インピーダンスの大きな変動が生じていることが分かる。IEM では破損素子の影響を無視しているために、破損素子による動作インピーダンスの変動を再現できていない。その一方で、IEM/LAC によって得られた動作インピーダンスの振幅及び位相は、LAC が実行されているため厳密解とよく一致している。また、“Full-wave” に要した計算時間はおおよそ 7500 秒だったのに対し、予め保存しておいた動作アド

ミタンスのデータを呼び出すだけの IEM/LAC に要した計算時間はわずか 0.1 秒であった。

5. 超大規模アレーの解析

本章では, $N_x^h = N_y^h = 10000$ というサイズを有する Huge array を IEM 及び IEM/LAC によって解析する. アレーパラメータや給電振幅分布は前節における値と同じとする. Small array のサイズは $N_x^s = N_y^s = 50$ とし, Local array のサイズは妥当性を十分確かめた上で $N_x^l = N_y^l = 3$ (i.e., $1.5\lambda \times 1.5\lambda$) とした. また, 比較のために素子間相互結合を無視した数値解析結果 (without mutual coupling) を用いる. 本章でも, Open あるいは Short の故障は同じ確率でランダムに生じると仮定される.

5.1 相互結合が動作利得に及ぼす影響

全素子が動作している Huge array の動作利得を IEM によって解析し, 表 1 に結果を示す. 表 1 に示すように, メインローブレベルは素子間相互結合の影響で 0.3dB 増加している. その一方で, 40° 方向におけるサイドローブレベルは, 素子間相互結合によって 1.3dB の減少を示している. アレーが非常に大きいため, 素子間相互結合による動作利得のそのような違いは電力効率と EMC の観点から見て決して小さくなく, 送信電力に対する素子間相互結合の影響の大きさが明らかになった.

Table 1 10000 × 10000 アレーアンテナの動作利得への素子間相互結合の影響.

	Actual Gain [dBi]	
	IEM	w/o mutual coupling
Mainlobe ($\theta = 10^\circ$)	82.0	81.7
Sidelobe ($\theta \approx 40^\circ$)	-3.9	-2.6

5.2 破損素子が利得に及ぼす影響

破損素子数と動作利得との関係を統計的に評価するために, 相対利得 “Relative gain” を以下のように定義する.

$$\text{Relative gain} = |\mathbf{E}_R|^2 = \frac{|\mathbf{E}(P, \theta, \phi)|^2}{|\mathbf{E}(0, \theta, \phi)|^2}, \quad (1)$$

ここで, \mathbf{E} は (θ, ϕ) 方向の遠方界であり, P は破損素子の割合である. 過去の研究では, 素子の振幅及び位相にランダムな誤差を含むアレーアンテナにおいて $|\mathbf{E}_R|$ が従う確率密度関数は仲上-ライス分布であることが明らかになっている [6], [14].

$$p(|\mathbf{E}_R|) = \frac{2|\mathbf{E}_R|}{\sigma^2} I_0\left(\frac{2|\mathbf{E}_R|\overline{|\mathbf{E}_R|}}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{|\mathbf{E}_R|^2 + \overline{|\mathbf{E}_R|}^2}{\sigma^2}}. \quad (2)$$

式 (2) では, p が仲上-ライス分布に従う確率密度関数を表し, $\overline{|\mathbf{E}_R|}$ は \mathbf{E}_R の平均, σ^2 は $|\mathbf{E}_R|$ の分散を表す. また, I_0 は 0 次第 1 種変形ベッセル関数を表す. ここで, P , θ , 及び ϕ を用いて, 仲上-ライス分布の平均や分散だけでなく, その関係を以下のように表すことができる [8].

$$\overline{|\mathbf{E}_R|} = 1 - P. \quad (3)$$

$$\sigma^2 = P(1 - P) \frac{\sum_{n=1}^N |\mathbf{E}_n(\theta, \phi)|^2}{\left|\sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n(\theta, \phi)\right|^2}. \quad (4)$$

Table 2 破損素子数とメインローブレベルとの関係.

P	$ \mathbf{E}_R ^2$ [dB]	
	IEM/LAC	$(1 - P)^2$
0.1 %	-0.0096 ~ -0.0094	-0.0087
1 %	-0.0958 ~ -0.0952	-0.087
10 %	-0.998 ~ -0.996	-0.92

$$\overline{|\mathbf{E}_R|^2} = \overline{|\mathbf{E}_R|}^2 + \sigma^2. \quad (5)$$

ここで, \mathbf{E}_n は n 番目のアレー素子から放射される遠方解であり, N はアレー素子数である.

式 (4) から, 破損素子による変動はメインローブとサイドローブとで全く異なることが以下のように導ける. メインローブに関しては, 全素子からの遠方界が同相で重ね合わせられているため, $\left|\sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n(\theta, \phi)\right|^2 \propto N^2$ となることが分かる. この結果と $\sum_{n=1}^N |\mathbf{E}_n(\theta, \phi)|^2 \propto N$ 及び $\sigma^2 = P(1 - P) \frac{N}{N^2}$ であることから, N が非常に大きい場合 $\sigma^2 \approx 0$ が容易に導ける. 分散 σ^2 は平均値 (i.e., $\overline{|\mathbf{E}_R|} = 1 - P$) からの散らばりを表すため, $\sigma^2 \approx 0$ は以下のことを明らかにする.

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}_R|^2 &\approx \overline{|\mathbf{E}_R|^2} \\ &\approx \overline{|\mathbf{E}_R|}^2 \\ &= (1 - P)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

その一方で, サイドローブにおいては各素子から放射される遠方界が位相の異なる状態で重畳されるため分散 σ^2 は 0 ではなく, 式 (6) は成り立たない. そのことは破損素子によってサイドローブの相対利得が上昇し得る可能性があることを示す. 以上の議論に基づくと, メインローブレベルの変動は破損素子数に依存し, その一方でサイドローブレベルの変動は破損素子数とその分布の両方に依存することが推測される.

Huge array における破損素子数とメインローブとの関係を表 2 に示す. IEM/LAC による数値解析の試行回数 M_{trial} は 2000 回であり, 解析 1 回あたりに要した時間は 15 秒程度だった. 表 2 から, IEM/LAC によって得られたメインローブの相対利得は P が一定であればほぼ一定値であり, (6) 式で示される $(1 - P)^2$ とよく一致した. 従って, 表 2 の結果は確率論に基づく前述の議論を裏付けるものとなった.

同じ Huge array において, $\theta \approx 40^\circ$ 方向サイドローブの相対利得が横軸を超える確率を図 5 に示す. 式 (1) によって表現される相対利得の定義から, 図 5 において 0dB を超えるあるいは下回る相対利得は, 破損素子によるサイドローブレベルの増加または減少をそれぞれ意味する. 例え Huge array に分布している破損素子数が同じだとしても, その分布によってはサイドローブレベルの増加・減少のどちらも起こりうるため, 一定の P に対してサイドローブレベルが増加あるいは減少する確率を評価する必要がある. 従って図 5 の縦軸としては, 図中にプロットされた曲線の相対利得が, 対応する横軸の値を上回る確率を選んだ. 図 5 から, Huge array がランダムに分布する破損素子を含むとき, $P = 0.1\%$ の曲線においては 0.4 dB, $P = 1\%$ の曲線においては 1.1 dB, そして $P = 10\%$ の曲線においては 2.8

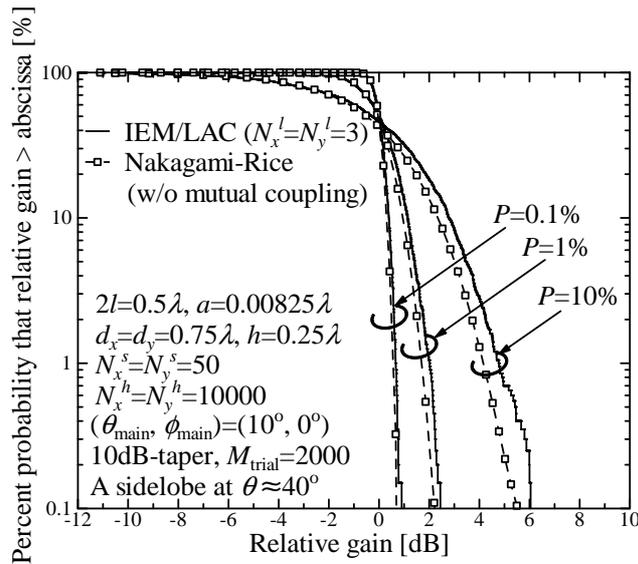


Figure 5 Percent probability that relative gain of a sidelobe at $\theta \approx 40^\circ$ is higher than abscissa.

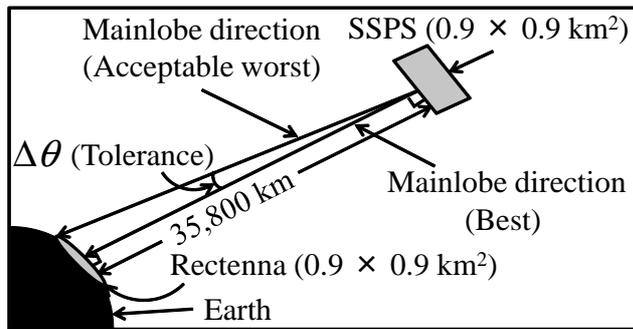


Figure 6 SSPS 及びレクテナの位置関係.

dB ほどのサイドローブレベルの増加が 10% の確率で起こり得ることが分かる。加えて、IEM/LAC によって得られた結果は素子間相互結合を無視した結果と比較して大きな値になっており、素子間相互結合が無視できないことも明らかとなった。

5.3 メインローブ方向の許容値

破損素子によって生じるメインローブ方向の変動及びその許容値は、評価すべきもう 1 つの興味深い課題である。静止衛星軌道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 上で運用される SSPS と地上のレクテナとの位置関係を図 6 に示す。動作周波数としては 2.5GHz を選択し、図 6 に示されている SSPS 用アレーアンテナの物理的な大きさは、本章で与えたパラメータから算出している。また、地上に設置するレクテナの大きさは SSPS 用アレーアンテナと同じと仮定している。

メインローブ方向のずれの許容値は、ブロードサイド方向と図 6 に示されたレクテナのエッジとの差から求められる。従って、メインローブ方向のずれの許容値は以下ようになる。

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{0.45}{35800}\right) = 7.2 \times 10^{-4} \text{ deg.} \quad (7)$$

IEM/LAC を利用して、破損素子によって生じるメインローブ方向の誤差を明らかにする。試行回数は $M_{\text{trial}} = 2000$ 、破損率は $P=0.01, 0.1, 1, 10, 30\%$ とする。数値解析の結果から、破損

素子によるメインローブ方向の変動は、 $P = 30\%$ のときですら 10^{-7} deg. 未満だった。この値は式 (7) で与えられる許容値よりも遥かに小さい値である。従って、メインローブ方向における破損素子の影響は無視できると結論づけられる。

6. むすび

本報告では、ランダムな位置に破損素子を有する超大規模アレーアンテナの解析に IEM/LAC を適用した。その結果、破損素子及び素子間相互結合が超大規模アレーアンテナの動作利得に及ぼす影響を明らかにすることができた。

References

- [1] P.E. Glaser, "Power from the sun: Its future," Science, vol.162, pp.857-861, Nov. 1968.
- [2] P.E. Glaser, "An overview of the solar power satellite option," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.40, no.6, pp.1230-1238, June 1992.
- [3] O.M. Bucci, A. Capozzoli, and G. D'Elia, "Diagnosis of array faults from far-field amplitude-only data," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.48, no.5, pp.647-652, May 2000.
- [4] A. Patnaik, B. Choudhury, P. Pradhan, R.K. Mishra, and C. Christodoulou, "An ANN application for fault finding in antenna arrays," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.55, no.3, pp.775-777, March 2007.
- [5] J.A. Rodriguez-Gonzalez, F. Ares-Pena, M. Fernandez-Delgado, R. Iglesias, and S. Barro, "Rapid method for finding faulty elements in antenna arrays using far field pattern samples," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.57, no.6, pp.1679-1683, June 2009.
- [6] J.K. Hsiao, "Normalized relationship among errors and sidelobe levels," Radio Science, vol.19, no.1, pp. 292-302, Jan.-Feb. 1984.
- [7] J.K. Hsiao, "Design of error tolerance of a phased array," Electronics Letters, vol.21, no.19, pp. 834-836, September 12 1985.
- [8] M.I. Skolnik, J.W. Sherman, III, and F.C. OGG, Jr., "Statistically designed density-tapered arrays," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.12, no.4, pp.408-417, July 1964.
- [9] K. Konno, Q. Chen, and K. Sawaya, "Quantitative evaluation for computational cost of CG-FMM on typical wire-grid models," IEICE Trans. Commun., vol.E93-B, no.10, pp.2611-2618, Oct. 2010.
- [10] H. Zhai, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, and C. Liang, "Analysis of large-scale periodic array antennas by CG-FFT combined with equivalent sub-array preconditioner," IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, no.3, pp.922-928, March 2006.
- [11] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna for SSPS using impedance extension method," Proc. IEICE Int. Symp. Electromagn. Compat., pp.33-36, July 2009, Kyoto, Japan.
- [12] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Analysis of huge-scale periodic array antenna using impedance extension method," IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.12, pp.3869-3874, Dec. 2009.
- [13] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, "Application of impedance extension method to 2D large-scale periodic array antenna with faulty elements," Proc. IEICE Int. Symp. Antennas. Propag., 47, pp.1-4, Nov. 2010, Macau, China.
- [14] R.J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, Artech House, Boston, London, 1994.