

衛星搭載大型反射鏡アンテナの 低サイドローブマルチビーム生成法の一検討

濱本直和

大型反射鏡とフェーズドアレイ給電部を搭載した静止衛星による衛星携帯電話システムでは、マルチビームシステムによる効率的な周波数再利用を実現するため、各ビームのサイドローブレベルを低減する必要がある。本稿では、最適ビームパターンの探索手法で必要となる拘束点設定手順を検討し、計算機シミュレーションによりその有効性と限界を検証する。

1 まえがき

同一周波数帯を共用する地上／衛星統合移動通信システム^[1]では、周波数再利用の効率向上や通信チャネル数の増大を実現する上で、低サイドローブ化した指向方向の異なるビームを多数生成することが重要になる。このようなマルチビームを衛星搭載アンテナで実現する場合、フェーズドアレイ給電部を搭載した反射鏡アンテナが一般に用いられる。フェーズドアレイ給電では、複数の給電素子の励振分布（各給電素子から放射する信号の振幅と位相）を適切に与えることにより、ビーム形状や指向方向の変更及びサイドローブの低減が可能である。

フェーズドアレイ給電による反射鏡アンテナの放射パターンを所望の形状にする手法として、給電部の励振分布を探索して最適パターンを見つける手法がある^{[2][3]}。これらの手法では、拘束点と呼ばれる複数の最適化条件（指定方向の利得）を与え、放射パターンが所望の結果に近づくよう励振分布を探索する。主ビーム形状の調整や数か所程度のサイドローブレベル低減を目標とするなら、比較的少ない数の拘束点で所望の放射パターンを生成することが可能である。

しかし、拘束点による最適解の探索手法では、ビームパターンを計算した後でないと設定した拘束点の良否が分からないため、拘束点の設定は試行錯誤的になるという困難さがある。特に100ビーム以上を必要とする移動体衛星通信用マルチビームでは、ビームの指向方向毎に異なるパターンのサイドローブを、広範囲に渡って一定値以下に抑えるための試行錯誤による労力は大きい。そこで本稿では、計算機による自動処理に適した具体的な拘束点設定手順を検討し、この手順がマルチビームの低サイドローブビームパターンの自動生成に有効であることを計算機シミュレーションにより検証する^[4]。

2 検討の前提

2.1 マルチビームアンテナシステムの構成

本検討では、様々な場所から通信が可能な衛星携帯電話システムや、地上系の携帯電話システムと周波数を共用する地上／衛星統合移動通信サービス^[1]を想定する。表1に想定するサービスリンク（衛星携帯端末－衛星間）の回線設計例を示す。使用する衛星携帯電話用端末は、小型低消費電力を実現するため送信EIRPを0.2W程度とする。この値に対して音声通信が可能な衛星搭載アンテナの所要利得は47dBi以上となる。移動体衛星通信に割り当てられた2GHz帯で47dBi程度のアンテナ利得を実現するためには、開口径30m程度の大型反射鏡と広いサービスエリアを実現するための100ビーム以上のマルチビームを生成する給電部が必要になる。

本検討では、大型展開パラボラ鏡面とデフォーカスしたフェーズドアレイ給電部及びビームフォーミングネットワーク（BFN）からなる離焦点型の衛星搭載ア

表1 サービスリンク回線設計例

項目	単位	アップリンク	ダウンリンク
周波数	GHz	2.0	2.0
送信電力	W	0.2	0.2
給電損失	dB	1.0	1.0
送信アンテナ利得	dBi	0.0	47.0
自由空間損失	dB	189.6	189.6
フェージング損	dB	3.0	3.0
受信アンテナ利得	dBi	47.0	0.0
G/T	dB/K	19.7	-24.8
受信C/No	dBHz	47.7	50.2
Eb/No (10 kbps)	dB	7.7	10.2

ンテナシステムを想定する(図1参照)。この形式のアンテナシステムはきく8号に搭載実績のあるもので³⁾、給電部はN個の給電素子と各素子に1つずつ接続した電力増幅器(送信側)や低雑音増幅器(受信側)で構成され、給電部につながるBFN内で各素子の励振分布を制御する。できるだけ広いカバーエリアで十分な利得が得られる鏡面サイズや離焦点距離及び衛星搭載性を考慮した結果、本稿では表2に示す諸元を用いて以降の低サイドローブ化の議論を進める。

2.2 ビームパターンの計算方法

本検討で用いたビーム特性の計算手法の概略を以下に示す。計算を実行するプログラムはC言語を用いて作成した。

- ①放物面形状のアンテナ鏡面位置座標を1波長程度

表2 想定する衛星搭載アンテナ諸元

衛星位置	東経 136 度
反射鏡搭載位置	衛星構体東側
周波数	2 GHz
反射鏡形状	理想放物面
反射鏡電気開口径	30 m
焦点距離	18 m (F/D = 0.6)
オフセット角	60 度
給電素子数	127
給電部の位置	焦点距離の 10% (1.8 m) 鏡面側に移動
素子放射パターン	$\cos^2 \theta$
ボアサイト方向	東経 135 度、北緯 35 度

の間隔(計算精度と計算時間の兼ね合いで決定)で並べて鏡面全体を表す鏡面データセットを生成する。

- ②次節に示す方法で励振分布を決定する。
- ③アンテナ焦点からデフォーカスした複数の給電素子による1次放射波を鏡面に当てる。各放射波の振幅と位相は②の結果を用いる。
- ④物理光学の手法で鏡面上に生成した微小ダイポールによる遠方電磁界を計算し、鏡面全体に渡って合成してビームを生成する。
- ⑤アンテナビームの指向角度(方位角: A_z 、仰角: E_l)に対するビーム利得を利得等高線(ビームパターン)として描画する。

3 サイドローブ低減化の検討

所望のビームパターンを生成する励振分布を算出する方法として、本検討では最小2乗法による探索手法を用いる。最小2乗法による探索では、複数の拘束点と呼ばれる拘束条件(指定方向の設定利得)と計算結果の差の2乗和が小さくなる方向に、励振分布の振幅と位相を繰り返し調整して最適解を見つける。問題は、広範囲のサイドローブ低減に必要な拘束条件をどのように設定するかである。本検討では以下に示す拘束点設定のための手順を用いる

- ①励振分布の初期値を設定する。
- ②与えた励振分布のビームパターンを計算する。
- ③主ビーム周辺の外側で、アンテナ利得が規定値以上に高くなる場所を探す(なければ終了)。
- ④③の場所に1つあるいはその近傍に複数のサイド

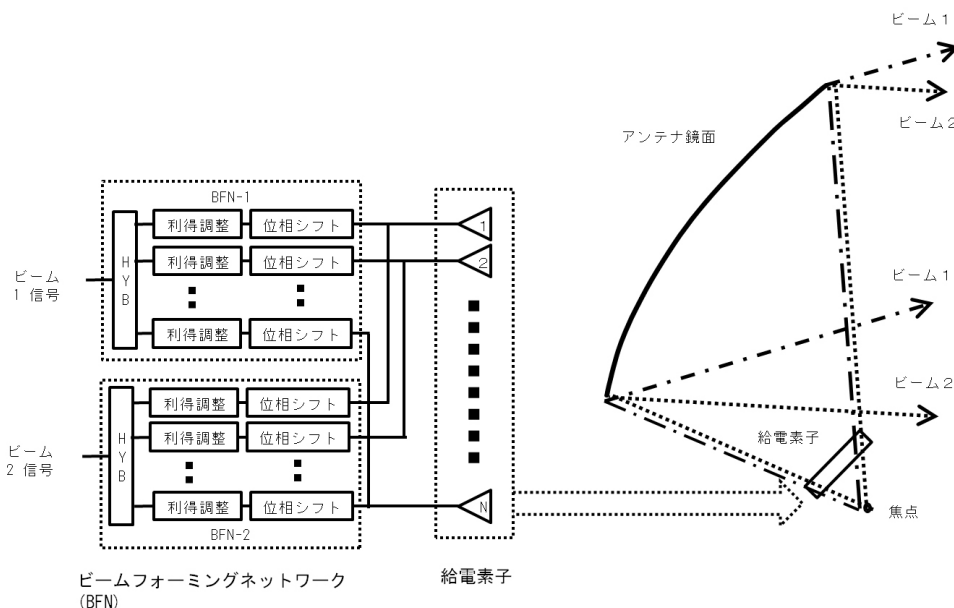


図1 フェーズドアレイ給電アンテナシステムの構成(2ビームの例)

ローブ低減用の拘束点を追加してその拘束条件に最適な励振分布を探索し、②に戻る。

この手順は、高いサイドローブが現れる場所に、それを抑える拘束点を繰り返し追加するだけのシンプルなものである。ただし、本手順で所望のサイドローブ低減が確実に保証されるわけではない。例えば、新たに追加した拘束点の影響で異なるサイドローブ増大を引き起こし、それを低減するために更なる拘束点を設定するような事態が繰り返し続くことも考えられる。そこで、計算機シミュレーションにより、本手順の是非を検証する。

3.1 励振分布の初期値

始めに探索時の励振分布初期値について考察する。文献[2],[3]等では、初期値についての具体的な記述はなく、おそらく様な励振分布を初期値に用いると思われる。一方、本検討では、指定方向のビーム利得を最大化する励振分布から探索を開始することにする。指定方向の利得を最大化する励振分布は、最大比合成法^[4]を用いて一意に得ることができる。探索時の励振分布の変更により利得は最大値から下がる方向に変化するが、その変化量が少ないうちに拘束条件を満足できれば、利得低下の少ないビームパターンを期待できる。

利得最大化による計算結果の一例として、図2(a)に北海道方向(明石方向:ボアサイト方向から $Az = 1.04$ 度、 $E1 = 1.4$ 度の方向)の利得を最大化した場合のビームパターン例を示す。このときの指定方向の利得は 49.5 dBi となる。また、47 dBi 以上の利得範囲はおおよそ ± 0.2 度になり、これが1ビームのサービスエリアになる。一方サイドローブの特徴を示すエリア端の利得から 20 dB 低下した利得等高線パターンを見ると、その形状が外側に大きくいびつに広がっており、その外側にもサイドローブの増大が見られる。このように、利得最大化では、サービスエリア内のアンテナ性能は高いが、主ビーム周辺のサイドローブ特性を改善する必要がある。

3.2 サイドローブを低減化する拘束点の設定

サイドローブレベルの低減目標は、衛星通信システムの性能目標に応じて決めるべきものであるが、ここでは表2の回線諸元及び実現可能性を考慮して以下の目標を設定する。

- サービスエリアを決定する最低利得を決める(本検討では 47 dBi、エリア端利得と呼ぶ)。
- 上記利得から一定レベル低い利得までの領域をできるだけ狭い領域に閉じ込める(47~27 dBi の領域、ビーム周辺領域と呼ぶ)。

- 上記領域の外側(軸外領域と呼ぶ)でアンテナ利得を一定レベル以下にする(27 dBi 以下)。

以下に、前述した拘束点設定手順によってこの目標が実現可能であるかどうかを、手作業でステップを踏みながら検証する。

(1) 主ビーム周辺の拘束点

最初にビームの中心位置とサービスエリアを決めるための拘束点を設定する。中心方向は前述と同様に北海道方向とし、さらにサービスエリアの範囲を指定するために中心から上下左右に 0.25 度離れた4点をエリア端の拘束点とする。中心方向の設定利得は前述の最大利得を少し上回る 51 dBi とし、またエリア端利得は 47 dBi とする。なお、前述の利得最大化パターンにおけるエリア端の幅(± 0.2 度)に対して、ここでは少し広めの 0.25 度をエリア端とし主ビームの幅が少し広がるように調整する(鏡面アンテナでは主ビーム形状の幅が広いほど近傍のサイドローブレベルが低くなる傾向にある)。

前節の利得最大化の励振分布を初期値として、上記の拘束点による最小2乗法探索で得られたビームパターンを図2(b)に示す。指定方向にビームが形成され、ピーク利得は最大利得からの低下量が 0.2 dB 程度、主ビーム周辺領域は期待通り狭まっている。ただし、まだかなりの周辺領域の広がりやサイドローブの局所的な増大があり、このままでは所望のビームパターンとはならない。そこで、本検討の繰り返し手順に従って低サイドローブ化を試みる。

(2) 拘束点の追加

サイドローブのピーク位置とその周辺(図の例では8か所)にサイドローブレベル低減用の拘束点を追加設定し、再度最小2乗法探索を行う。その結果を図2(c)に示す。拘束点を追加した場所のサイドローブは期待通りに所望の 27 dBi 以下に低減し、主ビーム周辺領域も円状の領域に抑えられている。

しかし拘束点の追加によって、軸外領域に新たな2つのサイドローブが現れている。そこで、再度、これらのピーク位置に拘束点を追加して最適化を行う。その結果、図2(d)に示すように、新たなサイドローブの増大は見られず、軸外領域で 27 dBi 以下の低サイドローブ化が実現された。このときのピーク利得は 48.9 dBi になり、最大利得からの低下は 0.6 dB となった。図3に(a)と(d)のE1方向のカットパターン($Az=1$ 度)を示す。主ビームが若干広がり、サイドローブは低減している。

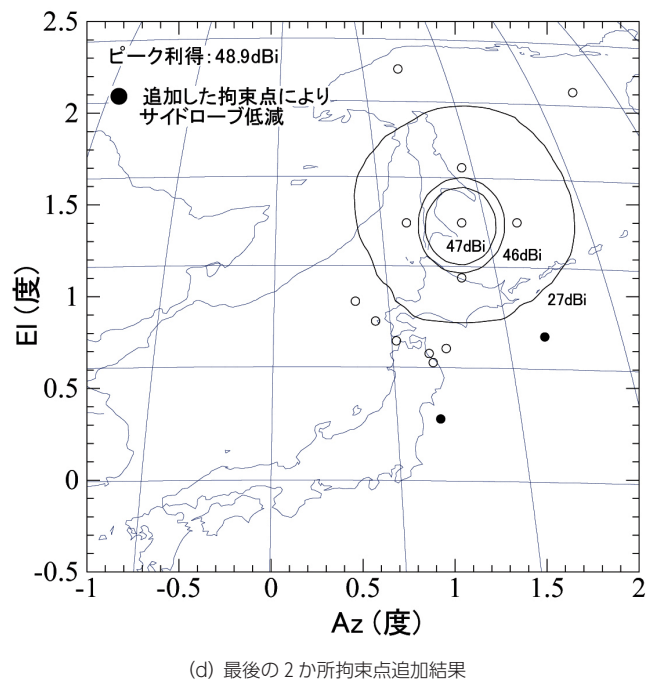
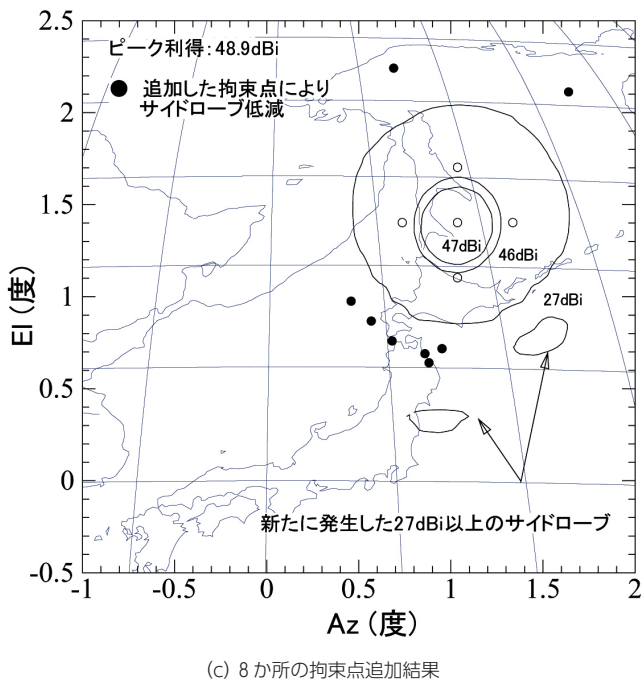
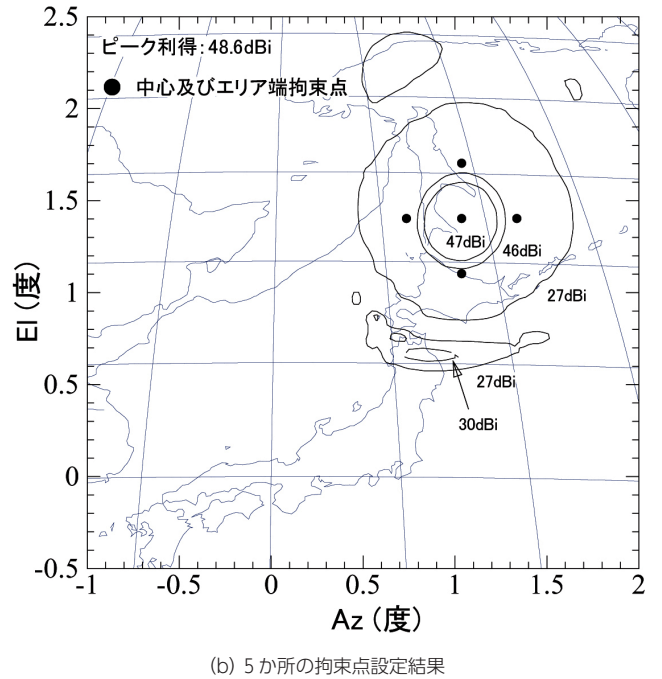
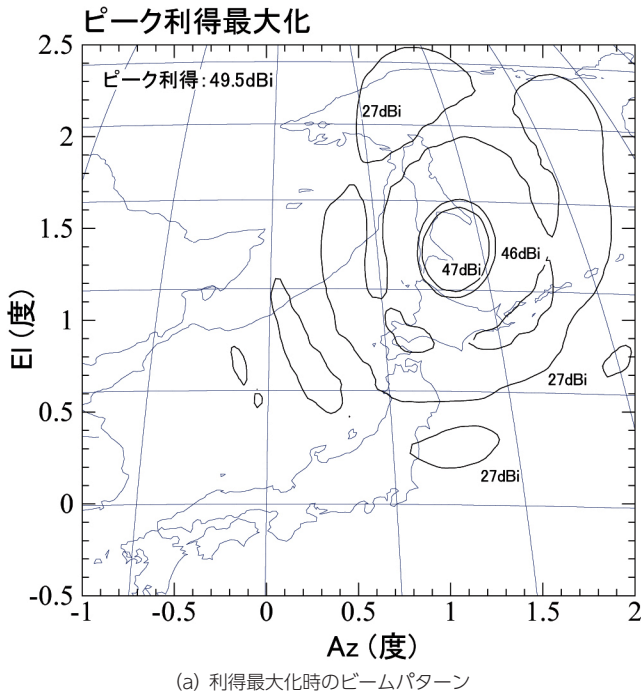


図2 低サイドローブビーム生成のための初期パターンと拘束点設定のプロセス (copyright(c) 2008 IEICE)

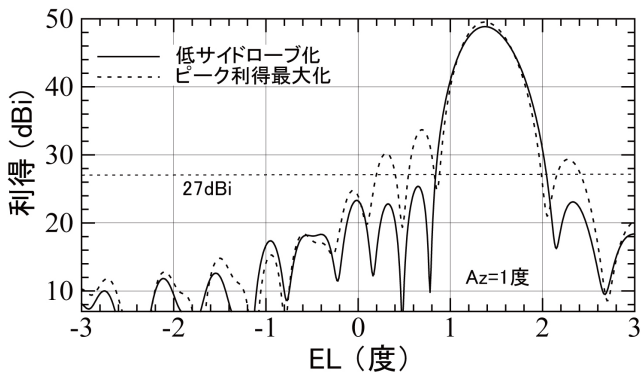


図3 前図 (a) と (d) の Az=1 度のカットパターン (copyright(c) 2008 IEICE)

4 低サイドローブ化したマルチビームの自動生成

前節では適当に選んだ指向方向のビームに対して、本検討の拘束点設定手順が低サイドローブ化に効果のあることを確認した。しかし、一例だけではこの方法が確実であるとは言えないので、次に 100 ビーム以上のマルチビームの低サイドローブ化を自動処理で試行する。

4.1 マルチビームアンテナの低サイドローブ化

この試行では、アンテナボアサイト方向から $Az \pm 3$ 度、 $EL \pm 3$ 度以内に 0.4 度間隔の三角配列で約 270 方向を指定し、これらの方向の低サイドローブビーム用励振分布を自動処理で算出することを試みる。サイドローブ低減範囲はボアサイト方向から $Az \pm 3$ 度、 $EL \pm 3$ 度以内とし、算出の過程でエリア端利得が 46 dBi に達しない場合や、拘束点の追加を 10 回以上繰り返してもサイドローブが低減できない場合、そのビームは生成不可とする。

図 4 に処理を自動化したフローを示す。この自動処理では、1 回の探索で追加する拘束点を、軸外領域のアンテナ利得が最大となる 1 か所に限定し、手作業で用いた「近傍」というあいまいな手順を除く。拘束点の追加数を 1 つにすることで計算機による拘束点の自動設定が容易になる。

自動処理で生成された低サイドローブビーム全体を図 5 に示す。生成されたビームは 160 ビームで、サービスエリアの中心付近では 47 dBi のエリア端利得で隣接ビームと交わるビームが生成され、また中心から 2 度程度離れた周辺ビームについてもおおよそ 46 dBi 以上のエリア端利得でビームを生成することができた。また生成されたビームのサイドローブ利得は軸外領域で 27 dBi 以下に抑えられている。この試行から本検討の拘束点設定手順がマルチビームアンテナのビーム設計に有効であることが分かる。

なお、本計算には CPU クロックが 1 GHz の市販

パーソナルコンピュータ (OS は Windows XP™) を用い、1 ビーム当たりの計算所要時間は 1~2 分程度で (所望のサイドローブ条件を満たすまでの繰り返し回数によって変化)、270 方向の全ての計算に要する時間は約半日程度であった。

4.2 性能限界

本検討手順による低サイドローブ化の限界を確認す

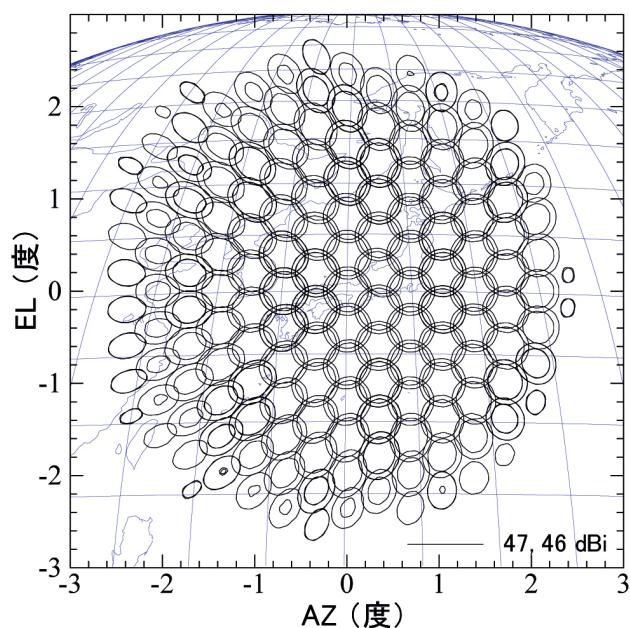


図 5 自動生成による低サイドローブ化したマルチビーム構成例 (copyright (c) 2008 IEICE)

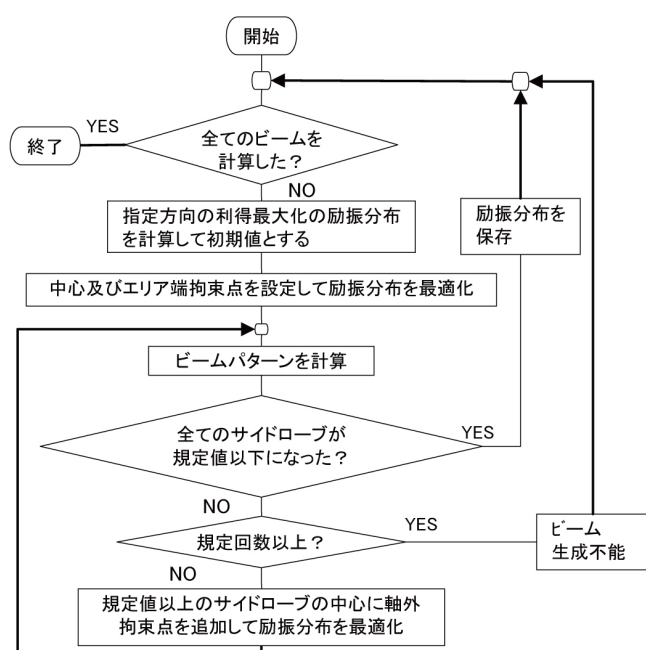


図 4 マルチビーム自動生成のフローチャート (copyright (c) 2008 IEICE)

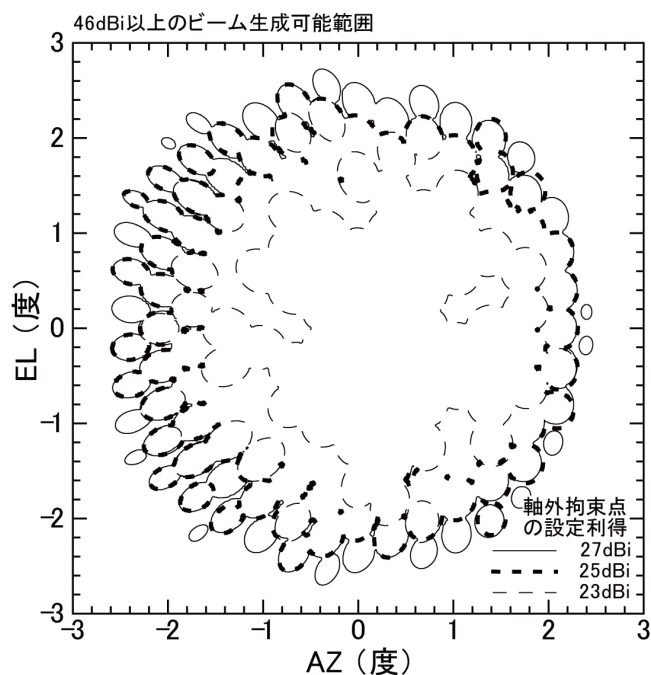


図 6 拘束点の利得を 27、25、23dBi とした時の最外ビームの輪郭 (copyright (c) 2008 IEICE)

るため、サイドローブの所望値を 27 dBi よりも厳しい 25 dBi 以下、あるいは 23 dBi 以下とした場合についてビームの自動生成を試みた。図 6 にエリア端利得（ここでは少し基準を甘くして 46 dBi とする）以上の利得が得られるビーム全体の輪郭を示す。

この図から、サイドローブの所望値を低くすることで、指向角度の大きなビーム生成が難しくなることが分かる。処理結果を調べた結果、以下の理由でビーム生成ができなかった。

- 振れ角が大きい場合は、利得最大化を行っても所望のエリア端利得に達するビームを作れない。
- サイドローブの所望値を厳しくした場合、拘束点を増やしてもサイドローブ低減が達成されない。

これらの限界がアンテナシステムとしての性能限界なのか、拘束点設定手順にまだ改善の余地があるのかは不明であり、更なる検討が必要である。

5 むすび

大型反射鏡とフェーズドアレイ給電部を搭載した衛星搭載アンテナのビームを低サイドローブ化する励振分布算出手順を検討し、計算機シミュレーションによりその有効性を検証した。またこの手順を衛星搭載マルチビームアンテナの低サイドローブビームの自動生成に応用し、一例として口径 30 m の衛星搭載アンテナシステムにおいて、所望のサービスエリア内に多数の低サイドローブビームの生成が可能であることを示した。今後の課題としては、本手順の限界について詳細な検討を行い、その改善の可能性を明らかにすることである。

本研究は、総務省の研究委託「地上／衛星共用携帯電話システム技術の研究開発」により実施した。

【参考文献】

- 1 蓑輪正, 田中正人, 浜本直和, 藤野義之, 西永望, 三浦龍, 鈴木健治, “安全・安心のための地上／衛星統合移動通信システム,” 信学論 B, Vol. J91-B, No.12, pp.1629-1640, 2008 年.
- 2 C. Klei, “Design of Shaped-Beam Antennas Through MiniMax Gain Optimization,” IEEE Trans. on Antennas and Propagations, Vol. AP-32, No.9 Sept., 1984.
- 3 針生健一, 山佐靖彦, 岡本照喜, 乙津祐一, “S 帯移動体衛星通信・放送システムにおける大型アンテナのビーム形成の一検討,” 信学技報, SAT-95-19, RCS95-55, pp.73-78, 1995 年 7 月.
- 4 浜本直和, 藤野義之, 鈴木龍太郎, “衛星搭載大型反射鏡アンテナによる低サイドローブマルチビーム生成法の検討,” 信学技報, Vol.109, No.181, SANE-2009-63, pp.59-64, 2008 年 8 月.

濱本直和 (はまもと なおかず)

有人宇宙システム株式会社宇宙機システム部
主幹技師／元新世代ワイヤレスネットワーク
研究センター推進室研究マネージャー (2006
年 4 月～2012 年 3 月)
衛星通信