

3-6-3 ビーム形成回路

3-6-3 Beam Forming Network

松本 泰 (東北大学電気通信研究所) 井出俊行
MATSUMOTO Yasushi and IDE Toshiyuki

要旨

ETS-Ⅷ衛星搭載反射鏡アンテナに使用する、フェーズドアレー給電用BFN(Beam Forming Network:ビーム形成回路)について述べる。BFNは、反射鏡の焦点面からデフォーカスされて設置した給電アレーに対し、励振振幅と位相を制御してアンテナビームの形成や走査を行う。本稿で述べるBFNは、複数のビームの形成に必要な励振振幅・位相の共通項を一括して制御可能な構成を特徴とする。この構成によって衛星軌道上で発生する機械的・熱的・電氣的要因による指向誤差を簡単かつ効果的に補正できる。

A newly developed BFN (Beam Forming Network) for a phased array feed on ETS-Ⅷ satellite is described. The BFN controls the excitation weight of the feed arrays, which are located at a defocus position of the large deployable reflector antennas. The BFN described here has a unique architecture by which excitation weight for beam steering can be sheared by multiple beams. This enables simple and effective calibration of beam pointing errors caused by mechanical, thermal, or electrical environment in satellite orbit. The BFN also has a self-calibration function to reduce excitation weight errors caused by thermal environment.

[キーワード]

フェーズドアレーアンテナ, 衛星搭載アンテナ, ビーム形成回路, マルチビームアンテナ, 衛星通信
Phased array antenna, Satellite antenna, Beam forming network, Multi beam antenna, Satellite communications

1 まえがき

携帯端末から静止衛星に直接アクセス可能な通信システム[1]-[3]において、携帯端末・衛星間に音声クラスの通信回線を成立させるには、S帯周波数においては開口径10m以上の軌道上展開型の衛星搭載アンテナが必須となる。また、アンテナビーム幅が狭くなるので、所望のサービス地域に対して多数のアンテナビームを正確に配置する必要がある。したがって反射鏡の構造、給電系の構成とビーム形成方法、指向精度の維持方法、アンテナ系全体の小型軽量化などが、衛星搭載アンテナにおける重要な技術課題となる。

ETS-Ⅷ搭載アンテナでは、給電アレーを大型展開反射鏡アンテナの焦点面より反射鏡側にデフォーカスし、ビーム形成は主に給電位相の制

御により行う(フェーズドアレー給電方式と呼ぶ)[3]-[5]方式を用いている。この方式は、(1)ビーム形成の自由度が高く、一部の素子や給電系の故障に対して冗長性が確保できる、(2)送信系では多素子を用いた空間電力合成により給電部の耐電力性の問題が緩和できる、(3)給電アレーの励振振幅分布を複数ビーム間で共通化することにより、電力増幅器の動作レベルを変化せずにビーム間の電力配分を通信需要に応じて変更できる、などの特長を持つ。

反面フェーズドアレー給電方式では、マルチビーム衛星通信システムに必要なエリア利得(所望地域内の最低利得)やビーム間アイソレーション(あるビームのメインローブの利得と、同一周波数を使用する他ビームのサイドローブレベルの比)を確保するために、給電アレーの励振を高精度に行うことが重要となる。また、ビー

ム形成に多数の給電素子を使用するので、ビーム数や給電素子数の増加に伴ってBFNの回路規模が増大する。したがって励振精度の確保とBFNハードウェアの複雑化・大型化の防止が、重要な技術課題となる。

これらの理由からETS-Ⅷのアンテナ給電系には、異なるアプローチで上記技術課題の解決を図った2種類のBFN (BFN1、BFN2)を搭載している[3]。BFN1は、指向制御方法を簡潔化した一括指向制御方式[6]を採用している。一方BFN2は大規模MMIC技術[7]によって高い集積度で全ビームの独立指向制御を実現している。

なお、BFN1は通信総合研究所、BFN2はNTTがそれぞれ開発を担当している。

本稿では、BFN1と、その制御器であるBFC (Beam Forming Controller) について述べる。BFN1は、異なるアンテナビームの指向誤差要因に共通点が多いことに着目し、この共通指向誤差を共用可変減衰器及び移相器によって一括補正する方式を送信用に使用している。本方式は指向制御に必要な制御ウエイト数が少なく、かつ制御アルゴリズムが簡潔である。BFCは、軌道上における機器の温度変化に対して、オンボード計算により励振ウエイト偏差を補償してウエイトを正確に保つ機能を搭載しており、また、ビーム指向制御実験用に様々な機能を備える。

以下、衛星搭載ビーム形成部についての概要、BFN1及びBFCの構成・機能・性能並びにアンテナビームの走査特性について述べる。

2 フェーズドアレー給電系とビーム形成部の概要

ETS-Ⅷ衛星上には、送信専用及び受信専用の2組のフェーズドアレー給電大型展開反射鏡アンテナ[8][9]が搭載される。アンテナ鏡面は、六角形状の展開モジュール14個より構成されたオフセットパラボラ鏡面であり、反射鏡の焦点面よりも反射鏡側に、31個のカップMSA (マイクロストリップ) 素子[10]を三角配置した給電アレーが配置されている。給電アレーの設置位置、素子数、素子配置、励振分布は、アンテナ性能を考慮して最適化[9]されている。送信系では送信電力をビーム間で自由に分配できるように、ア

レーの励振振幅分布はビームにかかわらず共通としている。

ビーム形成部は、送信用・受信用それぞれ2種類のビーム形成回路 (BFN1とBFN2)を持ち、それぞれ3ビームを形成可能である。一括指向制御方式は送信BFN1の2ビームに適用されている。本方式は原理的に送受両方に適用可能であるが、受信用BFN1はすべて独立指向制御である。これは次の理由による。送信系ではアレーの励振振幅分布を共通化しており、励振振幅・位相の両方が共通制御可能なので一括指向制御方式との適合性が良い。これに対し、衛星搭載受信アンテナは送信アンテナよりも高いビーム間アイソレーションを必要とする。これは所望アップリンク信号がフェージングによって減衰する一方、周波数共用地域からのアップリンク干渉波には減衰が生じない場合を想定するためである。また、ETS-Ⅷと携帯端末間のアップリンク回線は電力マージンが少ない[11]。したがって各ビームの励振ウエイトを個別に最適化することが望ましい。

送信・受信BFN1の励振ウエイトは、ビーム形成制御器 (BFC) により制御される。BFCは内蔵プロセッサが単一故障点となることを回避するため、2台で待機冗長系を構成する。

図1にマルチビーム通信用のビーム配置の例を示す。ビーム位置を示す円はエリア利得42dBiに対応する。ビーム位置#1と#4、#2と#5ではそれぞれ周波数再利用を行う。

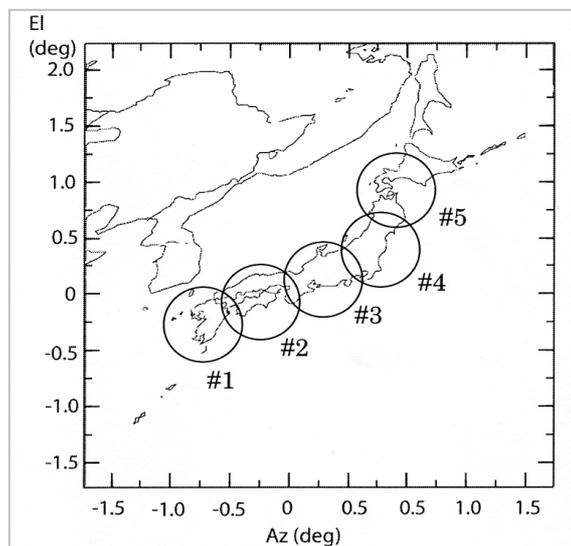


図1 移動体通信用ビームの配置

なお、図中には5個所のビーム位置が示されているが、送信用BFN1によって形成する3ビームのうち、一括指向制御ビームはビーム位置#3と#4に対応する。一方、独立指向制御の対象となる1ビームは任意のビーム位置を選択して形成する。また、放送実験を行う場合は独立指向制御ビームの励振ウエイトを変更し、放送専用のシングルビームを形成する。

3 BFNの機能構成とビーム走査

送信BFN1及び受信BFN1の機能構成を図2に示す。送信BFNでは、一括指向制御ビーム(図

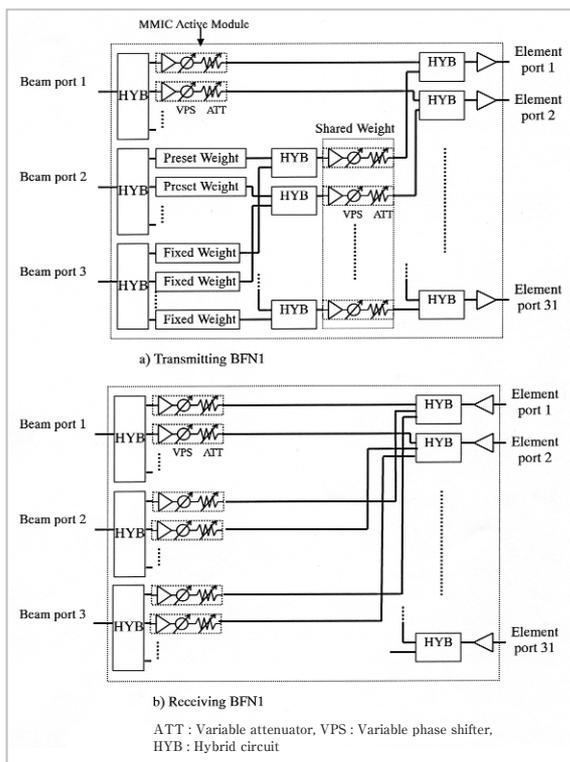


図2 ビーム形成回路1の構成
a) 送信BFN1 b) 受信BFN1

2a)のビームポート2、3)への入力信号が、図中の共用可変減衰器と共用移相器を経て素子ポートに出力される。共用可変減衰器・移相器は、各ビームで共用されている給電系機器(送信用給電部では、電力増幅器、フィルタ、給電線など)の温度変動等によって生ずる励振誤差の補正に用いられる。また、各ビーム共通の機械的指向誤差要因(衛星の姿勢誤差、給電素子の取付け位置誤差、反射鏡の初期展開誤差、鏡面歪など)

を、共通移相器を用いたアンテナビーム走査により補正する。

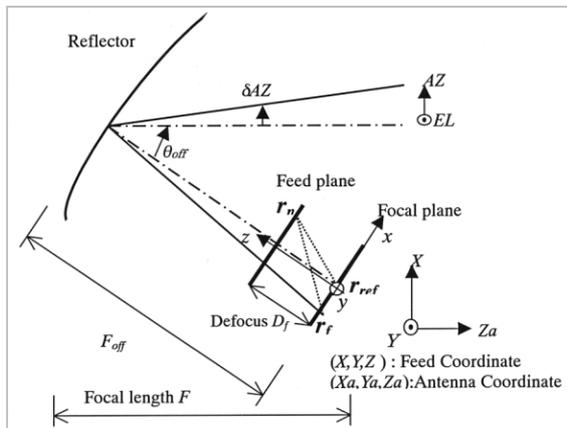


図3 フェーズアレイ給電反射鏡アンテナの座標系

図3において、指向方向(単位[rad])を(AZ, EL)から(AZ+δAZ, EL+δEL)に走査するための素子nの移相量ξ_nは、走査前後における焦点面上の仮想的給電位置をr_fとr_{ref}として次式で表される[6]。

$$\xi_n = k(|r_n - r_f| - |r_f - r_{ref}|) \quad (1)$$

$$\approx k(F_{off}/D_f)(X_n \cdot \delta AZ - Y_n \cdot \delta EL) \quad (2)$$

ここで、

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$r_n = (X_n, Y_n, D_f) : \text{素子位置, } (n=1 \sim N)$$

$$r_{ref} = (X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}) = (-F_{off} \cdot \tan(AZ), F_{off} \cdot \tan(EL), 0)$$

$$r_f = (X_f, Y_f, Z_f) = (-F_{off} \cdot \tan(AZ + \delta AZ), F_{off} \cdot \tan(EL + \delta EL), 0)$$

(δAZ, δEL) : ビーム走査角 [rad]

$$F_{off} = F/\cos^2(\theta_{off}/2) : \text{鏡面の開口中心-焦点間距離}$$

F : 反射鏡の焦点距離

D_f : デフォーカス距離

θ_{off} : 反射鏡オフセット角

式(2)の移相量は初期指向方向に依存せず、異なる指向方向のビームを一括走査できることを示している。また、単位走査角に対する移相量は、直接放射アレーのF_{off}/D_f倍となる。

なお、フェーズアレイ給電反射鏡アンテナは直接放射型アレーと異なり、一般にボアサイトからの走査離角が増加すると収差のために指向性が劣化する。また、式(2)に用いる走査角(「指示走査角」と呼ぶ)と、実際に得られる走

査角は必ずしも一致しない場合がある。また、エリア利得とビーム間アイソレーションの確保のために利得拘束を行った成形アンテナビームを用いるので、アンテナ利得の最大方向を用いてビーム走査角を定義することは難しい。本論文では拘束を行う領域を用いて走査角($\delta AZ, \delta EL$)を定義し、指示走査角($\delta AZ, \delta EL$)は次のように定める。

- 1) エリア利得とビーム間アイソレーションを確保すべき拘束領域を定め、励振ウエイトの最適化を行う(「初期励振ウエイト」と呼ぶ)。得られた励振位相を η_n ($n=1\sim N$)とする。
- 2) すべての拘束領域を所望の走査角($\delta AZ, \delta EL$) [rad] だけ平行移動し、1)と同様に励振位相 η'_n を求める。走査前後の励振位相差を $\delta\eta_n = \eta'_n - \eta_n$ とする。
- 3) 励振位相差 $\delta\eta_n$ の給電面上の分布に対して、2乗位相偏差 ε^2 を最小とする給電面上の最適位相傾斜 N_x, N_y を求める。ただし、 2π の位相不確定性の影響を除くため、 ε^2 は次式により定義する(関数 $\arg(*)$ の値域は $-\pi\sim\pi$ とする)。

$$\varepsilon^2 = \sum \arg^2 [\exp(jk(X_n \cdot N_x - Y_n \cdot N_y + C) - j\delta\eta_n)] \quad (3)$$

- 4) 指示走査角を次式により定める。

$$\delta AZ = D_f / F_{off} \sin^{-1}(N_x), \delta EL = D_f / F_{off} \sin^{-1}(N_y) \text{ [rad]} \quad (4)$$

次にETS-Ⅷ搭載アンテナの諸元を想定し数値計算を行った。送信用励振振幅分布は指向方向によらず一定とするので、ウエイトの最適化は位相のみ行う。拘束条件はエリア利得42dBi以上、ビーム間アイソレーションは27dB以上(利得15dBi以下)である。

なお、送信アンテナのビーム間アイソレーションの仕様は20dB以上であるが、ウエイトの最適化は励振誤差がない条件下で行うため、励振誤差による劣化を見込んで拘束条件を厳しくしている。

得られたアンテナパターンを例を図4a)に示す。図中、東海地方の5点がエリア利得の拘束点、九州地方の5点がビーム間アイソレーションの拘束点である。また、42dBiの利得等高線はエリア利得、15dBiの等高線はビーム間アイソレーションの拘束値に対応する。同図b)は所望走査角をEL方向0.5度とし、全拘束点を平行移動して最適化

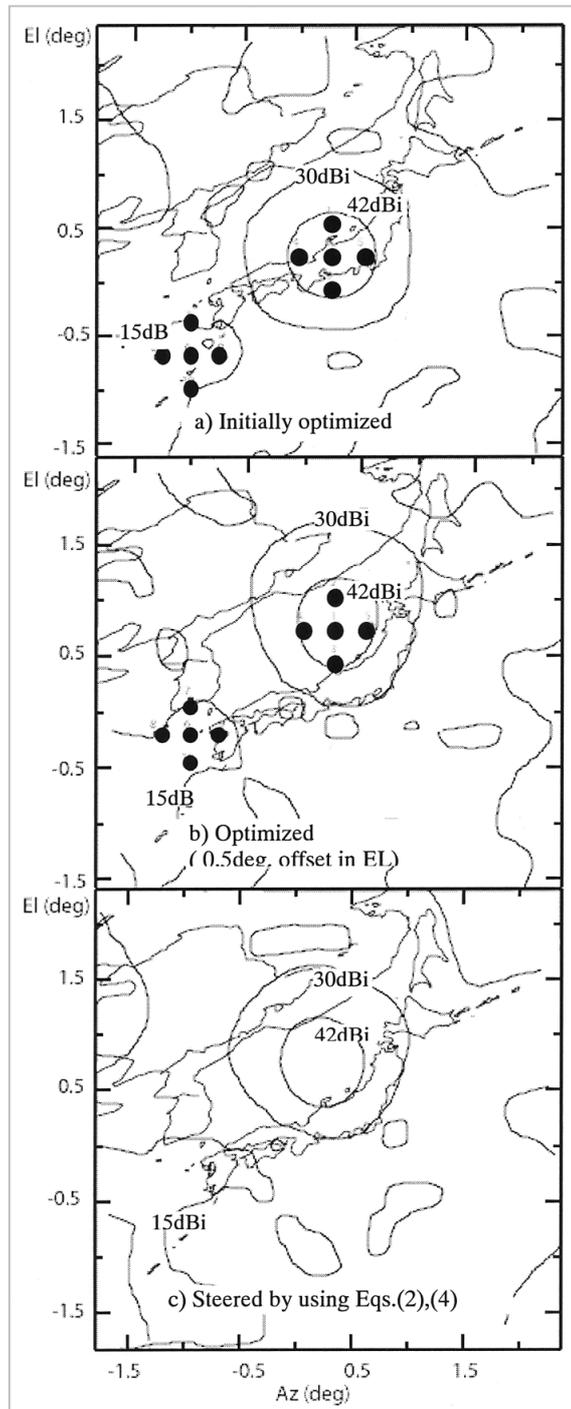


図4 送信アンテナパターンの計算例

を行ったパターン、c)は初期励振ウエイトに対して式(2)、(4)を用いた一括走査を行ったパターンである。図b)とc)を比較すると、エリア利得とビーム間アイソレーションをそれぞれ満足する領域はほぼ一致している。図b)、c)ともビーム間アイソレーションを満たす領域が図a)よりもやや狭まっているが、これはメインローブのボアサイトからの離角が増加したためと考え

られる。

なお、実際の静止軌道上では、衛星姿勢誤差や鏡面の熱変形によって0.5度を超えるアンテナ指向誤差が生ずる可能性は少ない。

利得拘束点に対する所望走査角と指示走査角と関係を図5に示す。指示走査角と所望走査角は比が1.1の比例関係にある。他の初期ビーム位置に対する走査でも、ほぼ同様の結果を得た。

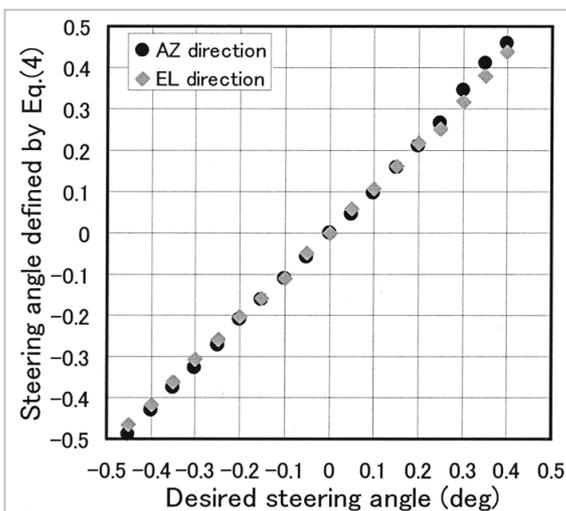


図5 所望走査角と式(4)により定義される指示走査角の関係

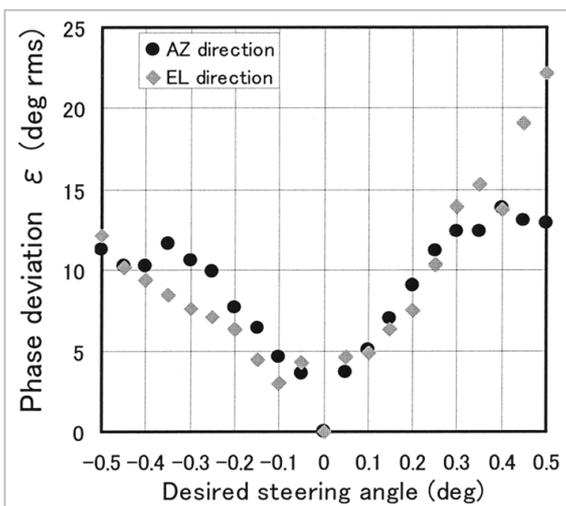


図6 所望走査角に対する位相偏差εの変化

図6は、位相偏差εと所望走査角の関係である。位相偏差は走査角と共に増加し、走査角0.5度ではεは12～22度rmsである。この程度のランダムな位相誤差が給電アレーに生じた場合、特にビーム間アイソレーションには大きな劣化が予想される[12]。図4c)に示す結果は、図6において

位相偏差最大のケース(+EL方向、走査角0.5度)に対応するが、一括指向制御の結果には大きな劣化は見られない。したがって、一括指向制御によって生ずる最適励振ウエイトからの位相偏差は、同じrms値のランダム位相誤差ほど指向性の劣化に影響しないと考える。

4 搭載用機器の開発

4.1 ビーム形成回路1

送信BFN1の構成を図2に示す。ビームポート1は独立指向制御ビーム、ビームポート2、3は一括指向制御ビームに対応する。ビームポートへの入力信号は31分配され、必要な励振ウエイトの付加と増幅を行った後、各素子ポートに出力される。励振ウエイトの付加は、5bit可変減衰器と6bit可変移相器及び挿入損失補償用増幅器を1パッケージに実装したMMICアクティブモジュール[13][14]によって行う。その主要諸元を表1に示す。各MMICモジュールは宇宙用のポリイミド多層基板に実装されている。基板表面にはMMICモジュールとマイクロストリップRF線路、基板裏面にはMMICモジュールとBFCとのインタフェース回路が実装される。

なお、ビーム2は、初期励振ウエイトを変更できるように機器立上げ時にプリセット可能なMMICモジュールを使用している。BFN1の主要

表1 MMIC可変減衰器・移相器モジュールの諸元

可変移相器	6bit デジタル移相器
移相量設定誤差	2.8度 rms 以内
可変減衰器	5bit デジタル可変減衰器
減衰量設定誤差	0.12dB rms 以内
消費電力	150mW 以下
挿入損 (減衰量最小時)	0.5dB 以下
入出力 VSWR	1.3 以下
寸法・重量	13.0.x27.2x3.5 mm, 5 g

表2 ETS-VII搭載用BFN1とBFCの諸元

励振誤差	振幅 0.4 dB rms, 位相 6度 rms
機器重量	BFN1: 15.2 kg 以下 BFC: 6.0 kg 以下
寸法	BFN1: 430×352×175 mm BFC: 292×224×188 mm
消費電力	BFN1: 50 w 以下 BFC: 12 w 以下

仕様(送信BFN1、受信BFN1共通の仕様)及びBFCの仕様を表2に示す。

4.2 ビーム形成制御器

ビーム形成制御器(BFC)は、励振ウエイトの計算とBFN内のMMICモジュールの制御及び衛星のテレメトリ・コマンド系(TTC: Telemetry and Tracking Control Subsystem)とのインタフェースを行う。BFCの動作モードと主要機能を表3に示す。

試験モード	各MMICモジュールの制御ビットパターンを直接設定する。
定常モード	独立指向制御ビームの励振ウエイトを設定する。
プログラム走査モード	あらかじめ指定した時刻・指向方向プログラムに従ってビーム走査を行う。
REV計測モード	指定した素子の位相を一定時間間隔・一定刻みで変化させる。
軌道上再プログラムモード	TTC経由で制御ソフトウェアを更新する。

試験モードは、主にMMICモジュールの機能確認に用いる。それ以外の運用モードでは、BFCは所要の励振ウエイトに対し、給電部各部の温度に基づく振幅・位相の温度補償値を加え、各MMICモジュールの制御ビットパターンに変換する。変換の際は、移相器の設定に依存した固有通過損を補償するように可変減衰器制御ビットパターンを決定する。決定したビットパターンは、BFNの各MMICモジュールのインタフェース回路に順次バッファリングされ、最後に更新コマンドによって全モジュールの設定状態が同時に更新される。更新時の遷移時間は10ns以下であり、中継信号のシンボル長よりも十分短い。このため指向制御の瞬間にアンテナビームの変形による通信断やビーム間干渉は生じない。

定常モードは、通常の通信・放送実験に用いる。このモードでは式(2)の位相制御によってビーム1は独立走査、ビーム2と3は一括走査が可能である。プログラム走査モードはこの走査を0.2秒間隔で繰り返し行う。本モードは衛星軌道上でのアンテナ性能評価や、通信回線のビーム間ハンドオーバを模擬する実験に使用する。

なお、式(2)の指示走査角は、図3のアンテナ座標系に基づくが、衛星運用上は衛星直下点を基準として東と北をそれぞれAZ、ELとした方が便利である。搭載アンテナはボアサイト(アンテナ座標の+Z)が日本列島中心部(135E, 34.67N)、を指向するように衛星に取り付けられるため、BFCは指示走査角を座標変換して移相量を算出する。また、衛星のテレメトリ情報から抽出した姿勢誤差を相殺するための走査角も算出する。

REV(Rotating Element Electric Field Vector Method: 素子電界ベクトル回転法[15])計測モードは、給電部の評価に用いる。REV法は受信信号の位相計測が不要なため、衛星搭載フェーズドアレーの評価に適する[16]。ただし、衛星打上げ後の計測では、精度改善のために振幅計測値の時間平均操作を行うので、位相回転を適当な時間間隔で行う必要がある。REVモードでは、任意の素子の励振位相を、指定した変化幅と時間間隔で回転できるので、特に衛星打上げ後の評価に都合がよい。軌道上再プログラムモードは、打上げ後の不具合発生時や実験目的を変更する際に用いる。

4.3 励振ウエイト設定機能の評価

上記のオンボード温度補償機能を検証するた

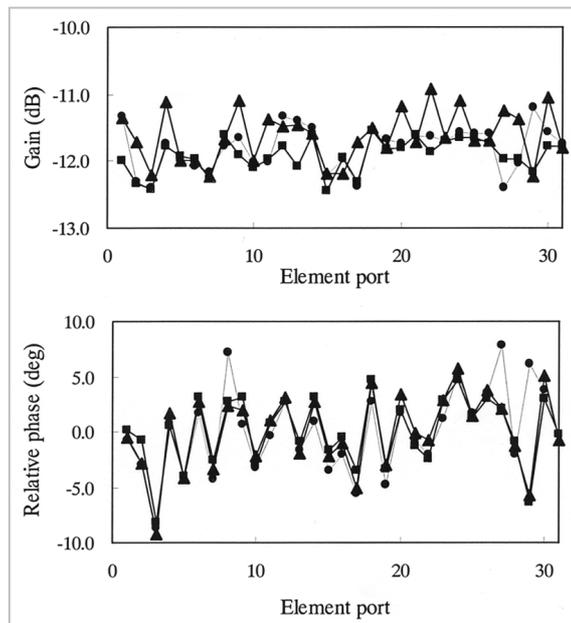


図7 送信BFN1の励振誤差測定結果

(a)振幅誤差 (b)相対位相誤差 ●温度-10度、■温度22.5度、▲温度40度

め、ビーム形成回路とビーム形成制御器を組み合わせ、機器温度を変化させて均一ウエイトに対するウエイト設定誤差の測定を行った。送信BFN1についての測定結果を図7に示す。温度補償を動作させない場合、機器温度(ベースプレート部)における温度が-10度から+40度まで上昇すると、通過損は約4dB増加することがBFN単体の温度試験の結果から分かっている。測定結果では-10度から+40度までの温度変化による通過損の変化は1dB以内に収まっている。また、31の素子系統における振幅及び位相偏差はそれぞれ、0.4dBrms及び4度rms以下であり、温度補償機能が有効に動作していることが確認できた。

5 ビーム走査性能の評価

アンテナ性能の検証法としては、2次放射パターンの実測が最も直接的方法である。しかし、ETS-VIIIのアンテナ鏡面は、長径が19mに及ぶため、地上の重力環境下で鏡面精度を維持しつつ、2次放射パターンを計測することは困難である。そこで以下の2段階に分けて検証を行った。

第1段階は、BFNと給電アレーのBBM(ブレッドボードモデル)を用いた評価である。この評価ではアンテナ鏡面は使用しない。まず、給電アレーの1次放射電界を近傍界測定によって求める。次に鏡面形状(この段階では理想形状とする)。

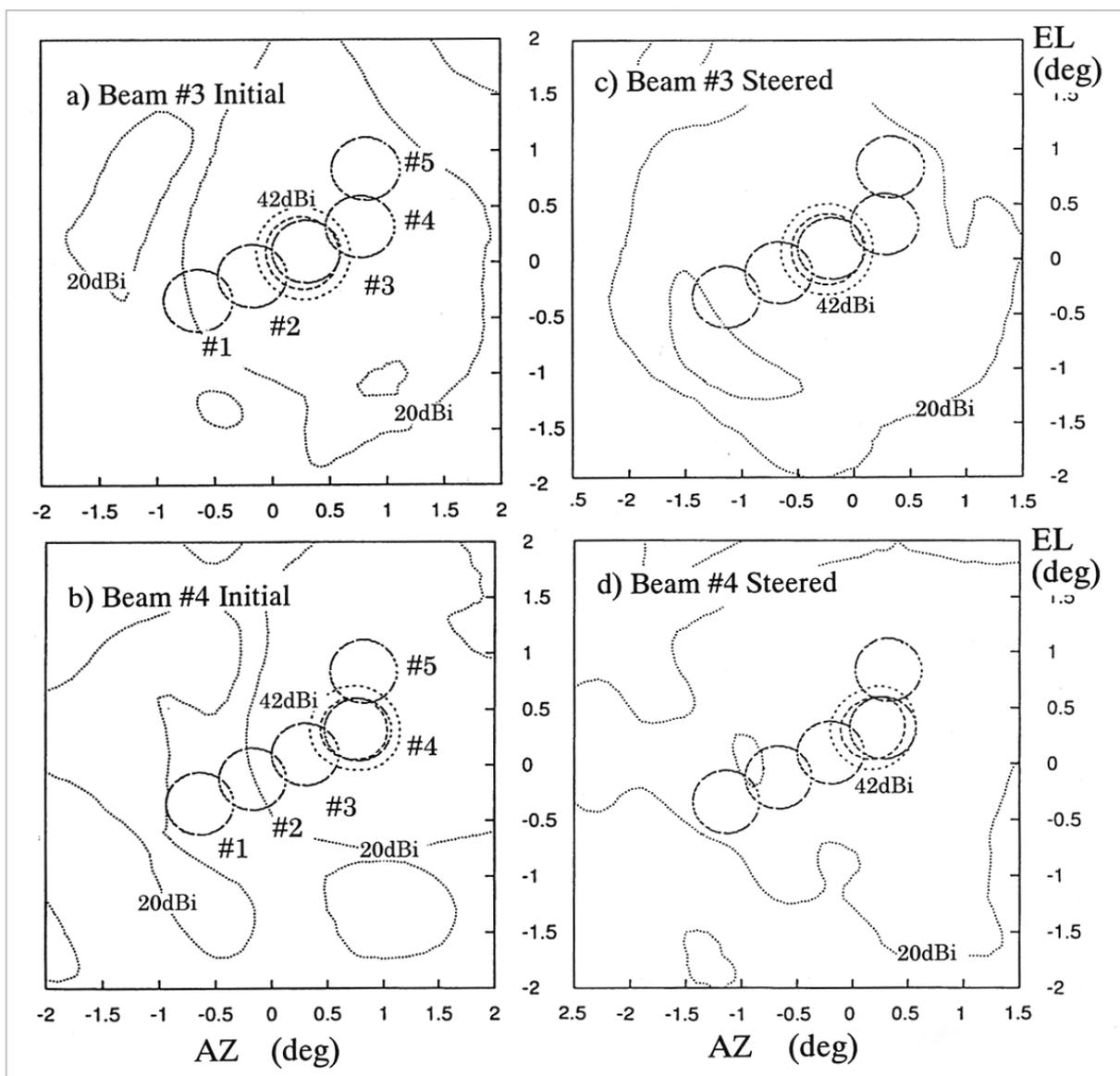


図8 一括走査(-0.5度AZ)の前後におけるアンテナパターン測定結果

を仮定して鏡面への入射電界分布を求め、2次放射パターンを評価する[9]。BBMでは給電素子、励振振幅分布、反射鏡の諸元の一部はフライトモデルと異なるが[9][17]、一括指向制御方式の検証には問題ない。

なお、カップMSA給電素子の位相中心は、給電パッチ上ではなく、金属カップの開口端面上にあることを実験により確認している。したがって、デフォーカス距離は、反射鏡焦点面からカップ開口端まで距離によって定義する。

図1に示したビーム位置#3、#4に対して最適化したウエイトによる2次放射パターンを図8a)、b)、これらを0.5度-AZ方向に一括走査した後のパターンを図8c)、d)にそれぞれ示す。図中の円は走査前後の所望ビーム位置、点線は測定結果を43、42、20dBiの利得等高線で表している。一括走査の結果所望の走査量が得られ、エリア利得(42dBi)を満足している。

なお、すべての42dBi等高線が所望位置よりも約0.2度-AZ側にずれているが、1次パターン計測時の給電アレーのアライメント誤差による可能性がある。一方、ビーム間アイソレーションの仕様値(20dB)より周波数再利用地域の利得は22dBi以下が条件となるが、走査によって20dBiの利得等高線がやや広がっており、アイソレーションの劣化した領域があることを示している。

これは一括制御によって生じた位相偏差に加え、給電系の励振誤差、1次パターンの計測誤差が原因と考えられる。

次の段階として、反射鏡と給電部構成機器のエンジニアリングモデルを組み合わせて測定を行った[18]。この測定では(1)実機と同じ給電部機器構成の動作確認及び(2)幾何学的な鏡面形状測定値によるアンテナ評価の妥当性の検証、が目的である。使用した機器の諸元や配置はフライト用機器とほぼ同一である。ただし、大型展開反射鏡は、電波無反射室の制約により全14モジュールのうち7モジュールのみで構成した。反射鏡面の形状を光学的手段によって計測し、次に鏡面と給電部を組み合わせ、近傍界測定によって2次放射パターンを計測した。近傍界計測の結果は、鏡面形状に基づく予測結果とよく一致しており[18]、鏡面形状を用いた大型アンテナ評価法の妥当性及び給電系の動作が確認できたと考える。

6 むすび

本稿では、ETS-Ⅷ搭載フェーズドアレー給電反射鏡アンテナに用いる、BFN1及びBFCについて述べ、十分な励振ウエイト設定性能とアンテナビームの指向制御特性を持つことを示した。

参考文献

- 1 E. H. Kopp, "Handheld telephony from geosynchronous orbit", 17th ICSSC, AIAA-98-1396, 1998.
- 2 S. C. Taylor and A. R. Adiwoso, "The Asia cellular satellite system", 16th ICSSC, AIAA -96-1134, 1996.
- 3 Y. Kawakami, S. Yoshimoto, Y. Matsumoto, T. Ohira, and N. Hamamoto, "S-band Mobile satellite communications and multimedia broadcasting onboard equipments for ETS-Ⅷ", Trans. IEICE Vol. EB82-B, No. 7, pp.1659-1666, 1999.
- 4 K. Tokunaga, K. Ueno, Y. Matsumoto, Y. Suzuki, N. Hamamoto, and M. Okumura, "Design of phased array-fed reflector antennas for the Japanese Engineering Test Satellite 8", 50th International Astronautical Congress, IAF-99-M.3.06, 1999.
- 5 R. J. Mailloux, "Phased array theory and technology", Proc. of the IEEE, Vol. 70, No.3, pp. 246-291, 1982.
- 6 松本泰, 橋本幸雄, 井出俊行, 坂齋誠, 浜本直和, 田中正人, "マルチビームの一括指向誤差補償が可能な衛星搭載ビーム形成部の検討", 信学論, Vol. J80 B-II, No.7, pp. 617-621, 1997.
- 7 T. Ohira, Y. Suzuki, H. Ogawa, and H. Kamitsuna, "Megalithic microwave signal processing for

- phased-array beamforming and steering", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 45, No. 12, pp. 2324-2332, 1997.
- 8 K. Nakamura, Y. Tsutsumi, K. Uchimaru, T. Tsujihata, and A. Meguro, "Large Deployable reflector on ETS-VIII", 18th ICSSC, AIAA-98-1229, 1998.
 - 9 徳永恭子, 角田博明, 松本泰, 大平孝, "衛星搭載フェーズドアレー給電反射鏡アンテナの電気設計と試作", 信学論, Vol. J82 B, No. 7, pp. 1357-1365, 1999.
 - 10 松本泰, 田中正人, 織笠光明, "衛星搭載フェーズドアレー用カップマイクロストリップ素子の開発", 信学論, Vol. J82 B, No. 7, pp. 1420-1424, 1999.
 - 11 S. Hama, Y. Matsumoto, S. Taira "GEO based mobile communication of the near future -BFN and packet switch on the ETS-VIII-", Space Communications 15, PP. 55-63, 1998.
 - 12 徳永恭子, 角田博明, 松本泰, 大平孝, "衛星搭載フェーズドアレー給電反射鏡アンテナの給電部開発及び二次放射特性の評価", 信学技報, SANE97-65, 1997.
 - 13 榊原千洋, 高須英樹, 奥村実, 上橋進, 浜真一, 松本泰, "S帯BFN用MMIC移相器モジュール", 信学総大, C-2-37, 1998.
 - 14 H. Takasu, C. Sakakibara, M. Okumura, S. Kamihashi, Y. Matsumoto, and S. Hama, "S-band MMIC active module with small phase variation and low insertion loss for beam forming network", Trans. IEICE Vol. E83-C, No. 1, pp. 122-125, 2000.
 - 15 真野清司, 片木考至, "フェーズドアレーの素子振幅位相測定法 -素子電界ベクトル回転法-", 信学論, Vol. J65-B, No. 5, pp. 555-560, 1982.
 - 16 田中正人, 松本泰, 小園晋一, 鈴木健治, 山本伸一, 吉村直子, "素子電界ベクトル回転法による衛星軌道上のフェーズドアレーの測定", 信学論, Vol. J80 B-II, No.1, pp. 63-72, 1997.
 - 17 Y. Matsumoto, T. Ide, M. Tanaka, T. Orikasa, and Y. Yamasa, "Array element and BFN design for phased-array-fed satellite antennas", 17th AIAA International Communication Satellite Systems Conference, 98-1224, 1998.
 - 18 上野健治, 跡部雅敏, 宮坂明宏, 織笠光明, 奥村実, "ETS-VIII搭載アレー給電反射鏡アンテナの部分鏡面を用いた実証試験", 信学技報, A・P2000-155 /SANE2000-136, 2001.

松本 泰

東北大学電気通信研究所助教授
博士(工学)
無線通信



井出 俊行

無線通信部門モバイル衛星通信グループ主任研究員
無線通信

