

大型展開アンテナ評価実験

佐藤正樹 織笠光明 藤野義之

ETS-VIII衛星は、開口径 13 m級の大型展開アンテナを搭載し、フェーズドアレーアンテナ給電部及びビーム形成回路によりビームを形成する。ここでは、軌道上における大型アンテナの電気的特性の検証としてアンテナパターン等を測定した。また、アンテナ鏡面の熱歪みが原因と思われる地上局の受信レベル変化が測定され、このビーム方向の補正を試みた結果についても報告する。

1 まえがき

技術試験衛星Ⅷ型 (ETS-VIII) は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、日本電信電話株式会社 (NTT) 及び情報通信研究機構 (NICT) により開発され、移動体衛星通信実験を目的に開口径 13 m級 (LDR: Large Deployable Reflector、方翼外形 約 19m×17m) の大型展開アンテナを搭載している。この LDR の給電系は、異なるアプローチから 2 種類のビーム形成回路 (BFN: Beam Forming Network) が搭載された^[1]。NICT が開発した BFN には、指向制御方法を簡潔化した一括指向制御方法^[2]を採用し、一方、NTT が開発した BFN は大規模 MMIC 技術^[3]によって高い集積度で全ビームの独立制御を実現している。衛星には、送信用と受信用の LDR 及び BFN が搭載されているが、ETS-VIIIは、受信系の低雑音増幅器の不具合により、受信用 BFN が使用できないため、実験では、送信用 BFN を使用したデータを取得し、電気的特性評価を行った。本文ではその評価結果について述べる^{[4][5]}。

大型展開アンテナは、アンテナビーム幅が狭くなるため、所望のサービス地域に対していくつかのマルチビームを正確に配置する必要がある。軌道上におけるこの大型展開アンテナの電気的特性を検証するために、実験では日本全土にノミナルとして 5 つのマルチビームを形成し、そのビームパターン等を測定した。その結果、大型アンテナの反射鏡の熱歪みの影響と考えられる地上局受信レベルの変化が測定された。また、この受信レベル変化の補正を目的に、給電部の電気的ビームシフト機能を用いてビームを操作し、地球局受信レベルの変化幅を小さくした。

2 マルチビームの形成

ETS-VIIIは、マルチビームを形成するために、給電部に LDR の焦点面から反射鏡側にデフォーカスした位

置に 31 個のマイクロストリップアンテナ (MSA: Micro Strip Antenna)^[6]を配置したフェーズドアレー (PA: Phased Array) 給電の方式を採用している。

PA 給電方式は、多数配置される位相器及び増幅器の励振分布を変える事によりビームを自由に形成する事が可能であり、また、多数の素子から構成されるため一部の素子や給電系の故障に対し冗長性を確保できる。送信系では、多素子を用いた空間電力合成により給電の耐電力性の問題を緩和できる。

その反面、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のレベル比) を確保するために、給電アレーの励振を高精度に制御する事が重要となる。なお、PA 給電方式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指向性が劣化する。ここでは、そのビームアイソレーションやサイドローブのレベルも評価した。

3 大型展開アンテナの放射パターン等の検証

3.1 放射パターンの測定方法

まず、BFN を含め大型展開アンテナ系全般の特性を検証するために送信アンテナの放射パターンを測定した。図 1 に移動体通信用のノミナルビームとアンテナパターン測定のための地球局の配置を示す。移動体通信用のノミナルビームとして、九州ビーム (beam1)、四国ビーム (beam2)、東海ビーム (beam3)、関東ビーム (beam4) 及び東北ビーム (beam5) の 5 つのビームを設定した。測定は、JAXA と NICT の共同で実施した。図 1 のように日本全国に受信局 6 局 (角田市 - JAXA 局、鹿嶋市、横須賀市、明石市、北九州市及び指宿市山川町) を設置し、アンテナパターン測定に必要なデータを取得するため衛星の姿勢をスキャンさせ、

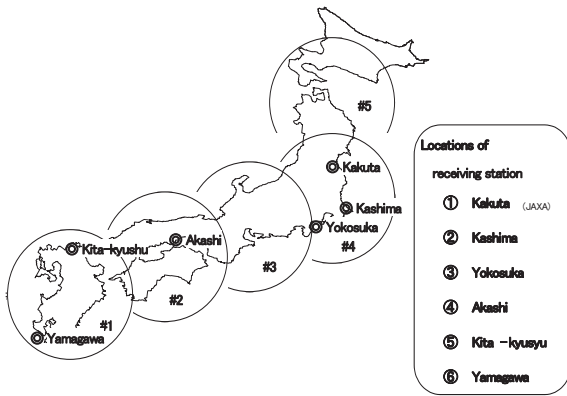


図1 ビーム配置例と全国の受信地球局

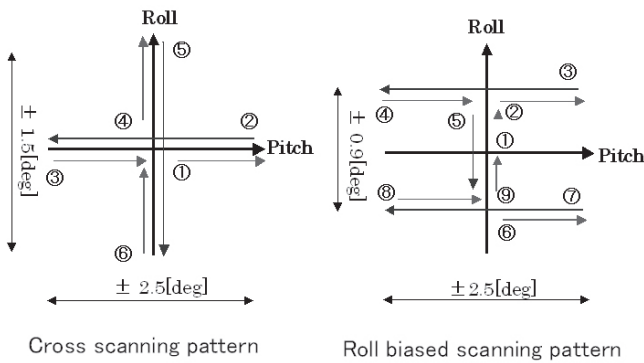


図2 姿勢スキャンアルゴリズム

ETS-VIIIからのビーコン信号を各地球局で同時に受信した。

衛星のスキャン方法は、図2に示すように衛星の姿勢のピッチ軸回り（ビームは東西方向に動く）及びロール軸回り（ビームが南北方向に動く）にそれぞれ十字及びエ文字に姿勢を動かした（以下、十字スキャン及びエ文字スキャンと呼ぶ）。十字スキャン幅はピッチ軸 $\pm 2.5^\circ$ 及びロール軸 $\pm 1.5^\circ$ 、エ文字スキャン幅はピッチ軸 $\pm 2.5^\circ$ 及びロール軸 $\pm 0.9^\circ$ である。また、大型の展開アンテナであることを考慮して鏡面が歪まないように約 $0.004^\circ/\text{sec}$ という低速度で衛星姿勢を動かした^[7]。日本全国の6局において十字及びエ文字スキャンにより図3に示すような測定点でデータを取得することと同じ効果が得られる。測定のための受信局は、経度及び緯度が等間隔になるように配置するのが望ましく、今回できる限り等間隔となるような、JAXA 及び NICT の施設の中で受信局を設置した。また地球局が受信する衛星からの信号は、衛星に搭載されている交換機から出力されたビーコン波である。

3.2 放射パターンの評価

衛星姿勢のピッチ軸（東西方向）をスキャンさせて、衛星のアンテナパターンの各局における2次元カット

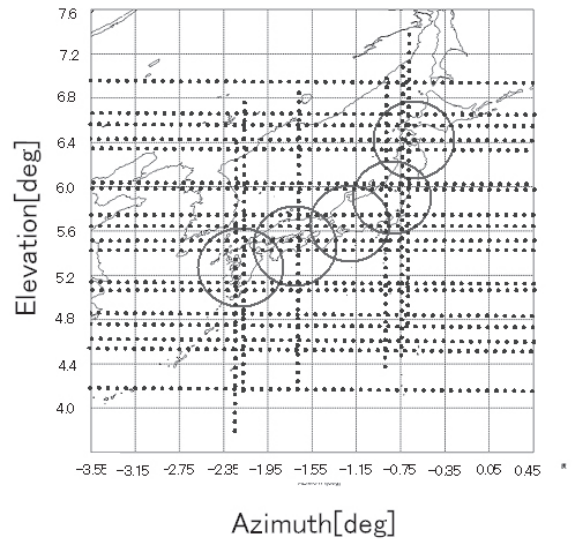


図3 十字及びエ文字スキャンで得られる測定点

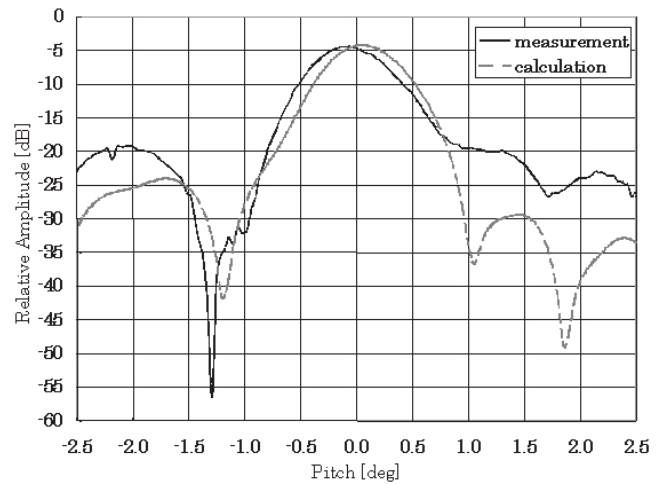


図4 九州ビームのカットパターンの測定値と計算値

パターンを測定し、これらから各ビームの3次元コンタ図を作成した^{[8][9]}。図4に九州ビーム (beam1) の北九州局カットパターンの測定例を示す。測定データと予測鏡面形状から計算したカットパターンを比較すると、測定値の受信レベルの高い部分（ボアサイト）は計算値に較べ約 0.2° 東にあることがわかる。この差は、主に大型展開アンテナの初期展開誤差、取り付け誤差及び鏡面歪みが要因として考えられ、打ち上げ前に鏡面形状が測定されている事から取り付け誤差は小さいと考えられる。なお、NTTが開発したBFNの評価においても同様な報告がなされている^[5]。

また、図3に示した各点での測定データから作成した九州ビームのコンタ図を図5に示す。図5からも、測定データから求めたボアサイト (measurement) は計算値より東にあることがわかる。ただし、測定データから作成したコンタ図は、計算値より若干歪んでおり、これは各地球受信局の位置の緯度及び経度が等間

隔に設置されていないためと考える。従って、以降はアンテナパターンの全体的な評価にはコンタ図を利用し、詳細な検討を行う場合はカットパターンを用いる事にする。

3.3 周波数再利用のためのサイドローブの評価

図1に示す通信用のマルチビームは、beam1とbeam4、beam2とbeam5でそれぞれ周波数再利用を行うこととしている。周波数再利用のためのサイドローブの評価は、衛星姿勢スキャン範囲及び地球局数や配置の制約から高精度に推定する事が困難であるが、3.2で取得した各局のAzカットパターンからおおよその評価を行った。図6に九州ビーム (beam1) を鹿児島県指宿市山川町に設置した山川局で、また関東ビーム (beam4) を茨城県鹿嶋市に設置した鹿嶋局で取得した時のカットパターンの例を示す。図中の塗りつぶしたサイドローブの抑圧領域は、関東ビームのカットパターンにおいては九州地方での周波数利用領域を示し、九州ビームのカットパターンは関東地方を示す。

ビーム形成としてサイドローブはボアサイトより20 dB低い値を目標に設計したが^[10]、図6の測定カットパターンは、サイドローブ抑圧領域ではピークと比較して関東ビームが-20 dB、九州ビームが-15dBとなっている。サイドローブの-15dBは、周波数の再利

用が可能と考えられるが、BFNの励振分布をさらに調整する事でサイドローブの低減が期待できることから、別途素子電界ベクトル回転法 (REV法) による励振分布の最適化に取り組んでいる^[11]。

4 ビーム指向方向の検証

4.1 食時間帯におけるビーム指向方向

衛星が地球の影に入る食時間帯において、全国に配置した地球局にETS-VIIからのビーコン信号の受信レベルに変化が見られたため、その原因究明と受信レベルの変化を小さくする補正実験を実施した。

4.1.1 食時間帯におけるビーム指向方向の変化

鹿島局、横須賀局、明石局、九州局及び山川局で九州ビーム (beam1) を食時間帯において受信したレベル変化の様子を図7に示す。また、この時間帯の衛星状態を示すテレメトリデータの送信用の固体高出力増幅器 (SSPA) の出力及びアンテナ鏡面温度を図8に示す。食時間帯のSSPA出力電力には変化がなくアンテナの温度が180K低下していることから、食時間帯の地球局受信レベルの変化は大型アンテナの温度変化に起因する鏡面の歪みによると推定される。

また、食時間帯の全国に配置した地球局の受信データから、ビームの移動方向を推定した。図9に示すように、食時間帯のビームは東方向に約0.2°移動してい

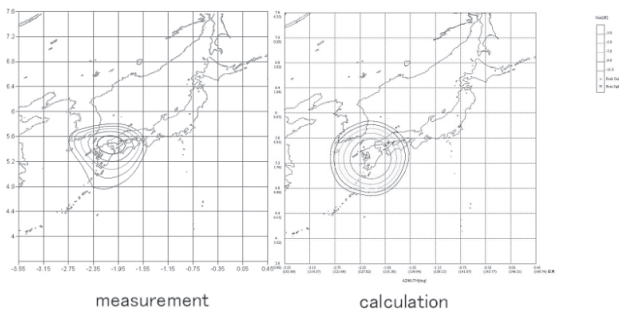


図5 九州ビーム (beam1) のコンタ図

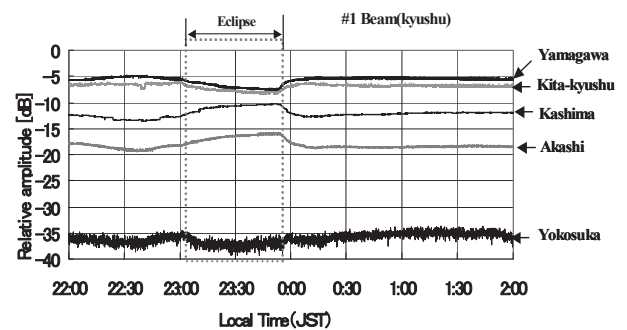


図7 食時間帯における各地地上局受信レベルの変化

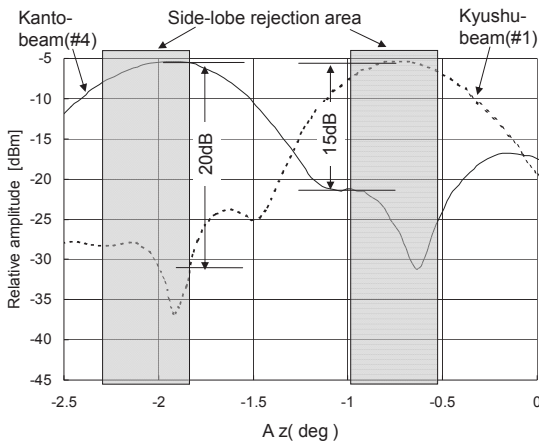


図6 大型展開アンテナのサイドローブの評価例

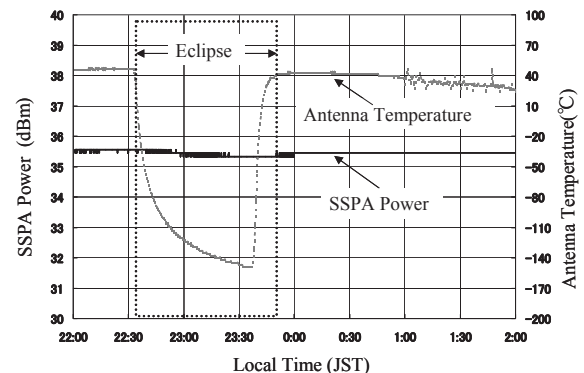


図8 アンテナ温度とSSPA電力のテレメトリ

るのがわかる。なお、食時間帯にビーム指向方向が東に移動する事象は、打ち上げ前の解析結果とも一致している。

4.1.2 食時間帯におけるビーム指向方向の補正

これまでの解析により、食時間帯にビーム指向方向が東へ約 0.2° 程度移動している事が推測され、そのビーム指向方向を補正し地球局の受信レベル変化を小さくする実験を実施した。実験方法は、食入り前のレベルを維持するように閾値を設け、これを逸脱した時に地球局受信レベルが回復するように BFN の位相励振分布を変更しビーム方向を食時間帯前の位置のようにシフトさせた。ビームのシフト量はアンテナパターンから求め、具体的には食入り後は 0.5dB 低下した時にビーム方向を西へ 0.05° シフトさせ、また食明け時は逆に東へビームを戻した。また、PA 給電方式によりビームを自由に形成する事が可能である事から、同じ関東ビーム (beam4) を 2 つ同時に形成し、ビーム指向方向を補正した時と補正しない場合の地球局受信レベルを比較した。実験結果を図 10 に示す。変化幅の最大値 (peak to peak: p-p) を比較すると、補正無しの約 2.5dBp-p 変化に対し、補正した場合は変化幅

を約 1dBp-p 小さくすることが出来た。

4.2 ビーム指向方向の日変化

4.1 で食時間帯のアンテナ鏡面の熱変化の影響と思われるアンテナのビーム指向方向の移動について述べた。ここでは、大型展開アンテナのビーム指向方向の日変化について報告する。

4.2.1 ビーム指向方向の測定

ビーム指向方向の日変化の調査を目的に、図 11 のように九州ビーム (beam1) を形成し、衛星からのビーコン信号を明石局、北九州局及び山川局の 3 局で同時に受信した。まず図 12 に九州ビーム (beam1) の 3 局での Az (東西方向) カットパターンを示す。このカットパターンは図 2 に示したように衛星の姿勢をスキャンして測定した。衛星打ち上げ前の検討において、アンテナ鏡面の熱歪みによるビームの指向方向誤差は、主にピッチ軸回り (東西方向) であるという推定結果が得られており、ここではこの方向のみについて調査した。各局からみたビームのボアサイト方向の Pitch=0° は真上を示し、ピッチ軸回りのプラス側が西

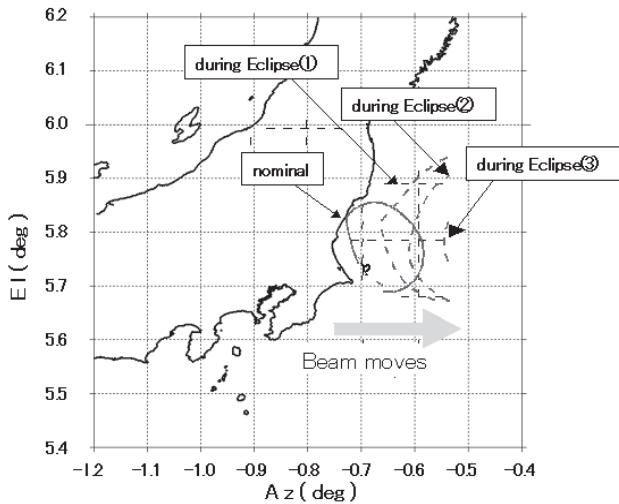


図 9 食時間帯にビームが移動する様子

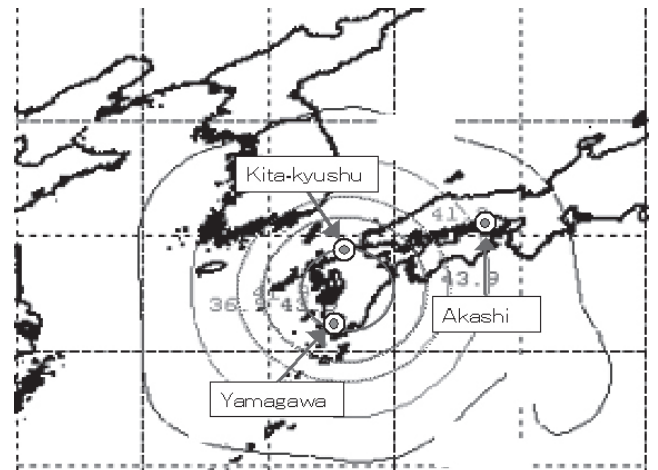


図 11 九州ビーム (beam1) パターンと受信局の位置

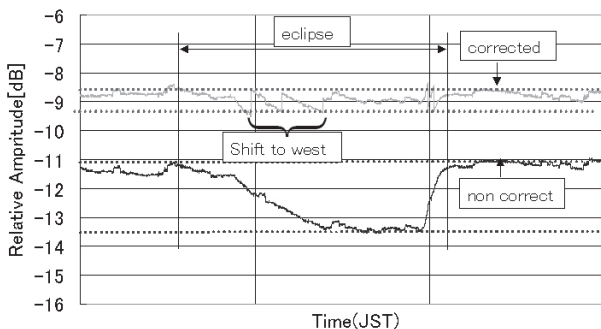


図 10 食時間帯におけるビーム指向方向の補正

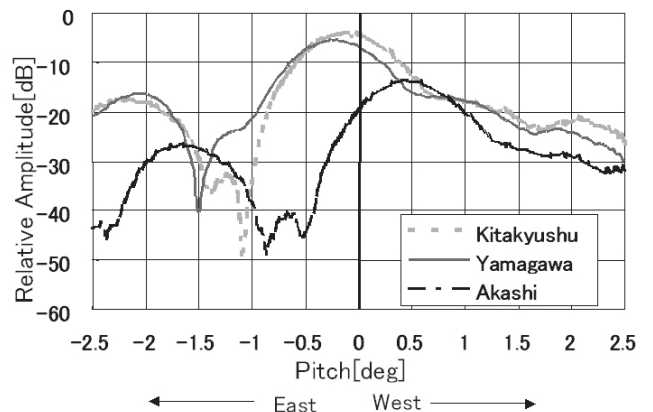


図 12 3局の Pitch 軸 (東西方向) のカットパターン

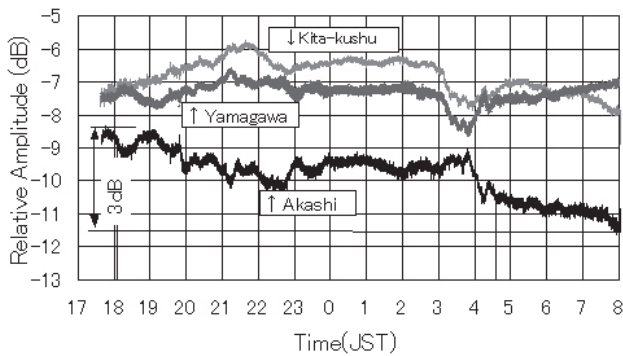


図 13 #1 ビーム (九州) の 3 局の受信レベル日変化

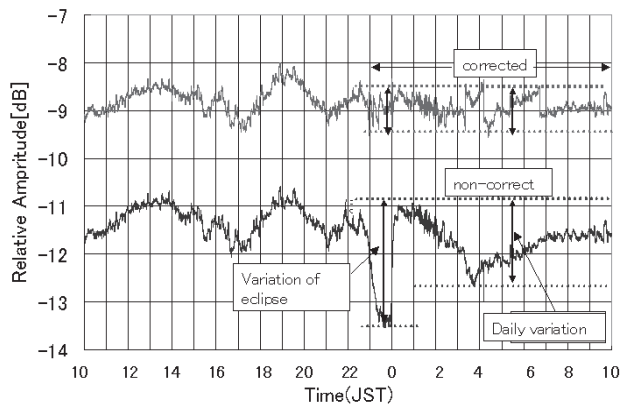


図 14 ビーム指向方向を補正して受信レベル変化幅を小さくした結果

方向、そしてマイナスが東側となる。例えば図 12 において、九州ビーム (beam1) のポアサイトは、明石局のカットパターンではピークがプラス側にあるので明石局より西側にあることがわかる。同様に九州ビーム (beam1) は、北九州局及び山川局より東側に位置するのがわかる。

4.2.2 地球局受信レベルの日変化

明石局、北九州局及び山川局において衛星から九州ビーム (beam1) のビーコン信号を受信した時の受信レベル変化を図 13 に示す。測定は夕方 18 時～翌朝 8 時まで実施した。図 13 において、北九州局と山川局は同じ傾向で変化しているが明石局のレベル変化の増減は、ほぼ対称になっている。これらから地球局受信レベル変化の要因はビーム指向方向の変動によるものと考えられる。明石局の受信レベル変化幅が約 3dB (p-p) であり、そのビーム指向変化幅は図 12 のカットパターンから約 0.25° と推定される。

4.2.3 地球局受信レベルの補正

次にこの地球局受信レベル変化幅を小さくする補正実験を実施した。補正方法は、基本的に 4.1.2 の食時間帯における地球局受信レベル変化の補正方法と同じである。BFN の位相励振分布を変更し関東ビーム (beam4) の指向方向をシフトさせた。前述と同様に、

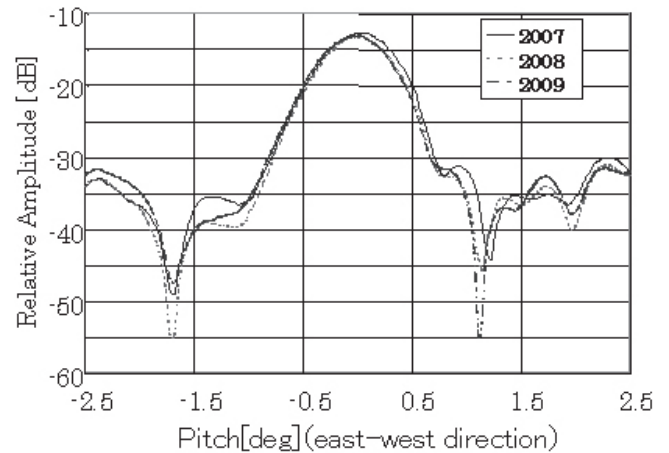


図 15 夏至付近の 3 年間の鹿島局カットパターン (Pitch 軸-東西方向)

衛星打ち上げ前の検討において、大型アンテナ反射鏡面の熱歪みによるビーム指向誤差は東西方向が支配的であるという推定結果が得られていることから、地球局受信レベルの補正実験でもビーム指向方向を東西方向に制御した。地球局受信レベルの補正方法は、受信レベルに閾値を設け、これを越えた時に地球局受信レベルが基準値の範囲に戻るようビーム指向方向をシフトさせた。関東ビーム (beam4) を同時に 2 つ形成し、一方を補正しないで、もう一方を補正してそのレベル変化幅を比較した結果を図 14 に示す。変化幅の最大値を比較すると、補正なしの時の約 2dBp-p に比べ、補正することにより約 1dBp-p と小さくすることができた。なお図 14 には、0 時付近の食時間帯レベル変化の補正実験結果も含んでいる。また、この変化傾向は打ち上げ前の推定値と比べ周期は一致するものの極性がほぼ反対となっており原因の究明が今後の課題となっている。

4.3 ビーム指向方向の経年変化

大型展開アンテナのビーム指向方向の経年変化を把握するのを目的に、3 年間の夏至付近の関東ビーム (beam4) の鹿島局カットパターンをまとめた。その結果を図 15、16 に示す。サイドローブやヌルの大きさに差異があるもののメインローブの形状はピッチ軸 (東西方向) 及びロール軸 (南北方向) とともに大きな変化はなく 3 年間の経年変化は小さいと推測される。

5 まとめ

ETS-VIII 衛星に搭載されている大型展開アンテナの電気的特性を評価した。衛星の姿勢をスキャンして推定したアンテナパターンの指向方向は、設計値に対し 0.2° 程度の差があるものの所望エリアをカバーしており、BFN は静止軌道上において正常に動作しているこ

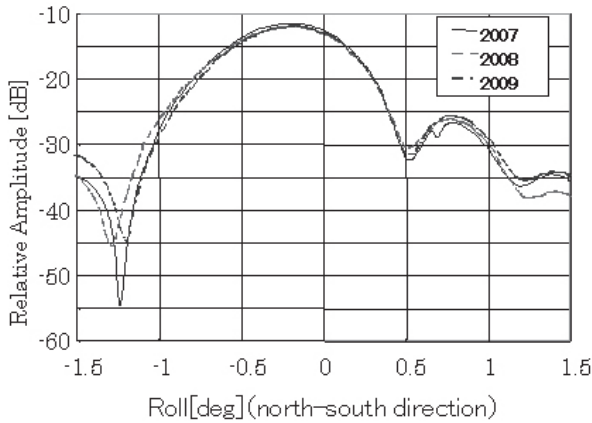


図 16 夏至付近の3年間の鹿島局カットパターン (Roll 軸-南北方向)

とが実証できた。また、通信用マルチビームの周波数再利用を目的にサイドローブを評価し、サイドローブはボアサイトより 15 dB 低い値であり概ね良好な結果が得られたが、更に REV 法による BFN の励振分布の最適化に取り組んでいる。

今回、大型展開アンテナ鏡面の熱歪みの影響と思われる地球局受信レベルの変化が観測されたが、BFN の機能によりビーム指向方向の調整で変化幅を小さくする事ができた。この鏡面の熱歪みによると考えられる地球局受信レベル変化の測定やそれを補正する実験の成果は、将来の大型の展開アンテナを衛星に搭載するにあたっての設計^[2]に寄与できる。

謝辞

アンテナパターンを測定する際に、衛星姿勢スキャン方法の検討や衛星運用を実施して頂いた宇宙航空開発機構の皆様に感謝致します。

【参考文献】

- 1 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.
- 2 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.
- 3 T. Ohira, Y. Suzuki, H. Ogawa, and H. Kamitsuna, "Megalthic microwave signal processing for phased-array beamforming and steering," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 45, No. 12, pp. 2324-2332, 1997.
- 4 鈴木義規, 今泉豊, 大幡浩平, "技術試験衛星VIII型搭載ビーム形成装置の軌道上評価," 信学ソサイエティ, BS-2-3, 2007.
- 5 鈴木義規, 今泉豊, 大幡浩平, "衛星搭載アンテナパターンの短時間測定法と技術試験衛星VIII型搭載ビーム形成装置の軌道上評価結果," 信学論 (B), Vol. J91-B No. 12 pp. 1569-1577, 2008.
- 6 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リップ素子の開発," 信学論, Vol. J82 B-II, No. 7, pp. 1420-1424, 1999.
- 7 M.Usui, H.Kohata, T.Hamaki, and Y.Yamasa, "Antenna pattern

measurement of the large deployable reflector of the ETS-VIII," ISTS, j-02, 2009.

- 8 T.Orikasa, Y.Fujino, M.Satoh, H.Kohata, and M.Usui "Electrical performancr of large deployable reflector antenna equipped on Engineering Test Satellite (ETS-VIII)," IAC-09.B2.6.6.
- 9 佐藤正樹, 藤野義之, 織笠光明, 永井清二, 小園晋一, 渡邊宏, 山本伸一, 平良真一, "軌道上におけるETS-VIII搭載大型アンテナパターンの評価," 信学ソサイエティ, BS-2-4, 2007.
- 10 松本泰, 井出俊行, "ビーム形成回路," 通信総合研究所季報技術試験衛星VIII型(ETS-VIII)特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 63-71, 2003.
- 11 T.Orikasa, Y.Fujino, and M.Satoh, "Measurement of radiation of large deployable reflector antenna equipped on Engineering Test Satellite (ETS-VIII) on orbit," ISAP2008,TP-26 1645008, October 2008.
- 12 蓑輪正, 田中正人, 浜本直和, 三浦周, 藤野義之, 西永望, 三浦龍, 鈴木健治, "安心・安全のための地上/衛星共用統合移動通信システム," 信学論, Vol. J91-B No. 12 pp. 1629-1640.

佐藤正樹 (さとう まさき)

産学連携部門連携研究推進室マネージャー
衛星通信、アンテナ



織笠光明 (おりかさ てるあき)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
博士 (工学)
衛星通信、アンテナ



藤野義之 (ふじの よしゆき)

東洋大学教授/元ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
博士 (工学)
衛星通信、無線電力伝送