

大型反射鏡アンテナの放射パターン補正実験

織笠光明 佐藤正樹 山本伸一 川崎和義 藤野義之

通信衛星に搭載される大型アンテナの反射鏡は非常に複雑で、鏡面の誤差と歪を与える。大型のアンテナでは特に熱歪が深刻で、軌道上でビーム指向方向誤差、ビーム形状歪、サイドローブの上昇が生じる。本稿では素子アレーのウェイトを変え、放射パターンを補正するために、ETS-VIIIを利用して複数の地上局による素子電界ベクトル回転法（REV法）を用いた反射鏡形状を推定する実験を実施し、限定的ではあるが推定が可能であることがわかった。

1 まえがき

ETS-VIII搭載大型アンテナでは実験によりビーム指向方向が日変動することが明らかになった^{[1][2]}。この原因は反射鏡の熱歪によるものである。将来の衛星搭載用大型のアンテナでは軌道上において熱歪によるビームパターン変動を考慮したアンテナビーム制御設計をする必要がある。

ここでは大型アンテナに対する技術課題および実際にETS-VIIIを利用して反射鏡の歪の推定と放射パターンを補正する手法の検討を行っている。また応用実験としてETS-VIIIを利用して反射鏡の歪の推定と放射パターンの補正を複数の地上局を用いたREV法で実施し、その実験結果と考察について述べる。

2 衛星搭載大型アンテナの技術課題

2.1 アンテナに対する要求と現状技術

将来の衛星搭載アンテナに対する最大の要求は、地上端末の負荷軽減（小型化、低消費電力化）を考慮して大きな開口径を有することである。そのためアンテナ放射パターンのビーム幅が狭くなるので対象とするサービスエリアをマルチビームでカバーすることが必要となり、高度な機能・性能が要求される。

搭載アンテナに対する基本要件は、

- (1) 高利得・高効率であること
- (2) サイドローブが低いこと
- (3) ビーム指向制御精度が高いこと
- (4) 容易にビームが形成できること
- (5) 耐電力性が高いこと
- (6) 消費電力が小さいこと

である。これらの要求は大容量のマルチビーム通信を想定したものである。ETS-VIIIに搭載されたアンテナは主に陸上移動体衛星通信を目的に上記基本要件を満た

すべく開発され、軌道上において機能・性能の種々の基本実験を行い、技術の確認および課題の抽出を実施してきた^{[1][2]}。

基本実験を通して得られた課題として反射鏡の熱歪によるアンテナ放射パターンの劣化（ビーム形状の歪、サイドローブレベルの上昇、ビーム指向方向変動等）がある。ETS-VIIIに搭載された給電部はフェーズドアレーであり、アレーの励振分布を変更することでビーム形状、サイドローブ、指向方向の補正が可能である。

一方、NICTでは将来の通信システムとして、地上／衛星共用携帯電話システム（Satellite / Terrestrial Integrated mobile Communication System: STICS）の研究開発を行っている^[3]。このシステムで検討されている搭載アンテナ開口径が約30mクラスで、ETS-VIIIに対し直径で2倍、ビーム幅は約半分の大きさとなっている。以下では将来アンテナとしてSTICSで検討されている衛星搭載アンテナについて、ETS-VIIIと比較して述べる。

図1にSTICSのアンテナパラメータを示す。給電部を焦点からdF = 800mm程度反射鏡方向に移動させて設置して、マルチビームを形成させ、ある程度のビーム指向方向制御を可能としたアレー給電反射鏡アンテナである。方式としては基本的にETS-VIIIと同じである。図2に想定されるビーム配置例を示しており、日本本土と排他的経済水域を100ほどのビームでカバーしている。

ETS-VIIIとSTICSでのアンテナの比較を表1に示す。ビーム数が多くなり、給電回路規模が多くなり複雑化することが予想される。そのため、ビームを形成する回路であるBFN(Beam Forming Network)はETS-VIIIではアナログ回路で実現されているが、アナログ回路を使用して、100ビームを形成するためには非常に複雑なものとなる。そのためSTICSではデジタル回路にてBFNを構成することを考えている。ETS-VIIIにお

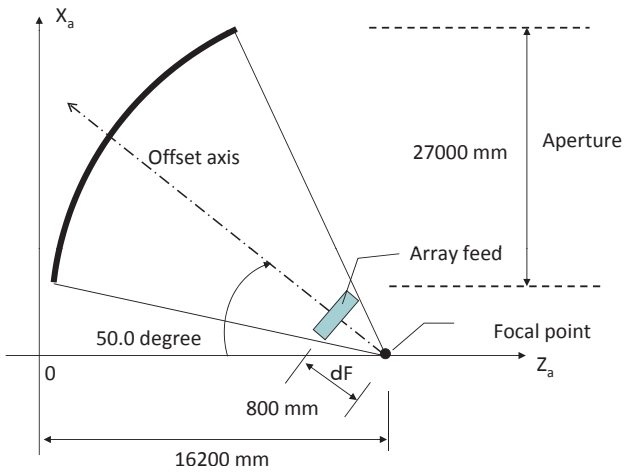


図1 想定するアンテナパラメータ

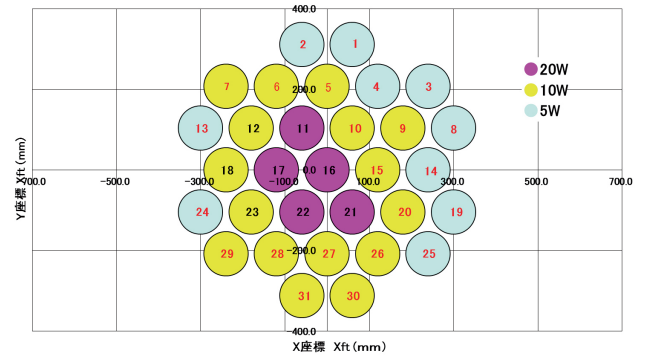


図3 ETS-VIIにおける給電部の励振振幅

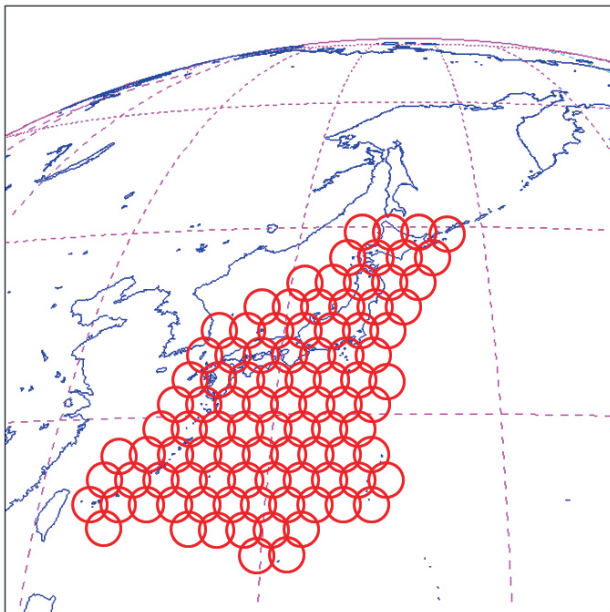


図2 ビーム配置例

表1 現状と将来アンテナの比較

衛星	ETS-VII	STICS
アンテナ開口径 (m)	13.0	27.0以上
周波数 (GHz)	2.5/2.6	2.0
ビーム幅 (degree)	0.7°	0.4°
素子数	31	100
ビーム数	3	100
偏波	左旋円偏波	円偏波
アンテナ数	2台(送受分離)	1台(送受共用)

いては、SSPA の能力を考慮し図3に示すように3段階の励振振幅 (赤 20W、黄色 10W、水色 5W) で素子励振振幅を固定し、位相を変えて各ビームの給電部励振分布を設定している。個体電力増幅器 (Solid State Power Amplifier: SSPA) の種類は 20W 出力と 10W

出力の2種類である。STICSではより自由な設定ができるよう励振振幅は励振振幅を4~5段階程度でより自由度の高いものを想定している。今後はSSPAの種類増加、高効率化が望まれる。上述のアンテナに対する基本要求的うち(1)~(3)は精度要求が高いことであり、高精度の機器を開発することが必要となる。また(4)のビーム形成は給電部がフェーズドアレー方式を作用することで解決でき、ビームの指向制御も容易となる。(5)の耐電力性についても、フェーズドアレー方式にすれば、電力が分散して他の方式より高くなる。

一方(6)の消費電力については、SSPAの高効率化とSSPAの種類選定最適化が将来の検討課題である。

2.2 大型アンテナの技術課題

将来の大型アンテナに対する課題は、2.1で述べた基本要求的で示した事項を満たすための機器開発のみではない。実際に基本実験で得られた結果から、いくつかの実用に向けた重要な課題が確認された。

ETS-VIIのアンテナパターン測定実験により確認された軌道上における技術課題として、

- (1) 反射鏡の熱歪によりビーム指向方向が日変動する。
- (2) 反射鏡の形状が不明で所望のサイドローブを得る給電部の励振ウェイトを設定することができない。
- (3) 反射鏡の形状誤差と給電部の励振ウェイト誤差の分離ができない。

が主要なものとしてあげられる。

上記課題のうち(3)についてはETS-VIIでは設計時に、反射鏡歪の放射パターンに対する影響に対する認識が甘く、反射鏡形状は熱歪解析で予測できると考え、十分に考慮されていなかった。したがって今後のアンテナ開発についてはそのような配慮をした設計を実施すればよい。しかし、(1)、(2)については、深刻な問題である。STICSでは開口径がETS-VIIの2倍もあり、

反射鏡の熱歪を小さくさせることは難しい。さらに大きな鏡面を用いる場合は課題の克服がより困難となっていく。

反射鏡の形状誤差に対する対策としては

- (1) 反射鏡の熱歪を小さく抑える。
- (2) 軌道上の反射鏡の熱歪および形状を予測する。
- (3) 軌道上で反射鏡形状を測定する。
- (4) 地上にて軌道上の鏡面形状を推定する。

が考えられる。

これらのなかで、(1)は上述のごとく現実的ではない。(2)についてはETS-VIIIでは**2-2**の基本実験結果で述べたように、実際と異なる結果が得られており、現時点での形状予測技術は不十分である。

一方、(3)はETS-VIIIでは搭載されていない機能であるが、実現できれば有用である。この場合反射鏡形状と励振ウェイトの影響を分離することが必要で、このためにはたとえばアレー給電部の近くに電波を検出できるような小型アンテナを適当な位置に配置して、素子電界ベクトル回転法 (Rotating element Electric field Vector method: REV 法)^[4]等の手法により給電部の励振ウェイトを測定する等がある。また(4)については種々手法が考えられ、将来の検討課題である。

3 鏡面形状推定の検討

鏡面形状は軌道上において熱歪により変形することが、基本実験により明らかになった。しかし、軌道上において鏡面形状がどのようになっているか推定することができなかった。

基本実験ではREV法により各素子の励振ウェイト(アレー給電部の素子ごとに与える位相と振幅値)を測定して補正をすることを試みたがうまく補正ができなかった。これは励振ウェイト誤差に反射鏡の誤差が加わり、分離できないためである。STICSにおいては軌道上で反射鏡形状を推定することがシステムを実現させる上で重要であることから、反射鏡形状誤差の推定手法として地上にて軌道上の鏡面形状を推定する方法を用いた。ETS-VIIIの応用実験として複数の地上局を用い、REV法により反射鏡の誤差の推定実験を実施した。REV法により反射鏡形状を推定する手法について、ETS-VIIIと複数の地上局を用いた実験を実施し、本手法の有効性を検証した。

3.1 REV法の概要^[4]

REV法はアレーアンテナの各素子の励振ウェイトを離れた場所で推定することができる手法である。この手法は受信レベルの変化を測定するのみで、位相測定は要求されない。そのため、衛星と地上局間での測

定においてもレベルのみを測定するので、容易に測定することができる。

この手法の原理を簡単に述べると、衛星搭載アンテナの N 個のアレー素子から放射される電界が局で受信されるとき、受信点での電界は各素子からの電界ベクトルの合成として得られ、これを E_0 とする。このとき番号 n の素子の励振位相を回転させると、元の合成電界 E_0 とに対して図4に示すように新たな E なる電界が破線のように回転する。このときの各位相のレベルを受信し、決められた励振ウェイトで作られる電界、すなわち現在作られているビームの励振ウェイト、これを元の合成電界 E_0 と呼ぶ。一方この元の電界はREVにより選定された素子の励振位相が変えられる(0° から 360° 、ステップ的に)ので合成電界が変化する。このとき与えられた新たな電界 E の2乗の比が位相 Δ を変数として、cosineカーブで表されることを利用するもので、

$$Q = \frac{|E|^2}{E_0^2} = C_0 + C_1 \cos(\Delta + C_2) \quad (1)$$

で示される。 C_0 , C_1 , C_2 を求め、これを用いて元の合成電界に対する素子 n の振幅 E_n と位相 ϕ_n 対し、

$$k = \frac{E_n}{E_0} \quad (2)$$

$$X = \phi_n - \phi_0 \quad (3)$$

の k と X を求めるものである。ここで、添え字 0 は元の合成電界の値を示す。これを全ての素子 N について繰り返して実施する。

実際の測定では位相変化のタイミングを合わせて、スペクトラムアナライザで信号を受信する。このとき受信した信号はアレー給電部として誤差と反射鏡形状誤差が含まれている。特に反射鏡はETS-VIIIの場合、非常に大きいため波長(120mm)以上の変動も考えられ、 360° の不確定性もありえる。

3.2 複数局を用いたREV法

一局のみによる測定では前述のような問題点があるため、複数局を用いたREV法を検討した。これは地上局位置が異なると各局で受信するREVで得られた励振ウェイト分布が異なることを利用したもので、パラメータを決めて評価関数を作りこれを最少にすることで求める方式である。その時のパラメータは反射鏡の形状等に関わるものである。STICSではこれを評価するための「大型アンテナ指向変動等補正模擬ソフトウェア」を開発した。これを用いて評価する。

実際の評価のためには鏡面形状には多くのパラメータがありこれらすべてを考慮することが困難である。そのため鏡面形状を与えているパラメータを選定する

4 通信応用実験

必要がある。実験で確認する機能として、

- (1) ビーム指向方向を補正する。
- (2) サイドローブを低減させる。

の2項目を選定して実験を実施した。これは、(1)についてはビーム指向方向がマルチビームを形成するために重要な特性であること、(2)については周波数再利用するためには低サイドローブ化が最重要課題となるためである。以下では、各項目に対する検討を述べる。

(1) ビーム指向方向補正

ビームシフト量を求めるため、「大型アンテナ指向変動等模擬ソフトウェア」では回転のパラメータとして反射鏡を角度 α_t と β_t で回転させて、反射鏡が変形したときの形状にフィットした角度を求める。ここで角度 α_t と β_t は図5に示すようにそれぞれオフセット軸（反射鏡の中心から給電部方向、図1参照）回りの回転、 Y_a 軸回りの回転である。求められた α_t と β_t から反射鏡の位置・形状が与えられ、ビームシフト量を求めることができる。位相を評価する値として、評価関数を定義する。

評価関数は地上局でREV法により測定した相対位相値と計算により求めた位相値の差異が最小になるように与えられる。

REV測定で得られた相対位相: $P_r(m,i)$

計算で得られた相対位相: $P_s(m,i)$

として評価関数を次のように定義する。

$$\text{評価関数: } \Delta f = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M (P_s(m,i) - P_r(m,i))^2 \quad (4)$$

ここで、 M は地上局数、 N は素子数を表す。

評価関数の二乗の中の各地上局により P_s と P_r は異なっている。それぞれの地上局での値が最小になる条件が求めるパラメータとなる。

α_t と β_t を変化させて評価関数 Δf を最少化する α_t と β_t が求められる。これが求める解となる。以後これらのパラメータの変形を1次変形と呼ぶ。

(2) 低サイドローブ化

鏡面の回転はサイドローブに対してほとんど影響を与えないので、(1)で述べたパラメータでサイドローブレベルの補正は難しい。また反射鏡の誤差の影響でサイドローブが上昇する要因は主に鏡面の周期性の誤差である。そのため、ETS-VIIIの鏡面をモジュールごとにパラメータを与えることとした。ETS-VIIIでは図6に示すように反射鏡は14個のモジュールで形成されている。それぞれアンテナ座標系とモジュール座標系の定義を示す。モジュール座標系は軸はアンテナ座標系と並行で、中心が異なっているだけである。モジュールごとに以下に示すパラメータを与える。

θ : モジュールのZ軸からの角度

ϕ : Z軸回りの回転角

ΔZ : Z軸方向の移動距離

これらの各モジュールの値をパラメータとして同様に式(4)から評価関数 Δf を最少化することでモジュールごとの θ 、 ϕ と ΔZ が求められる。このとき各モ

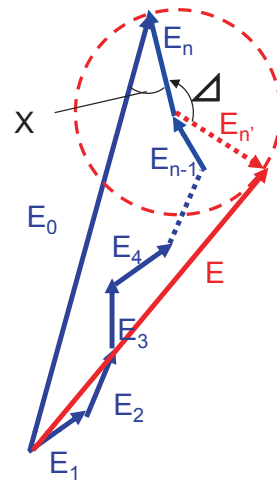


図4 REV法の原理

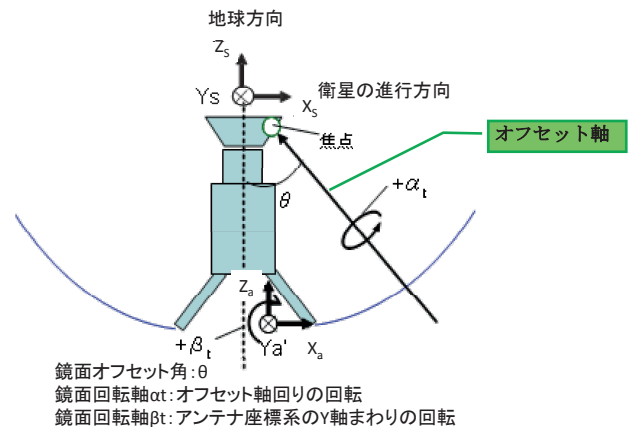


図5 パラメータの選定 (ビーム指向補正)

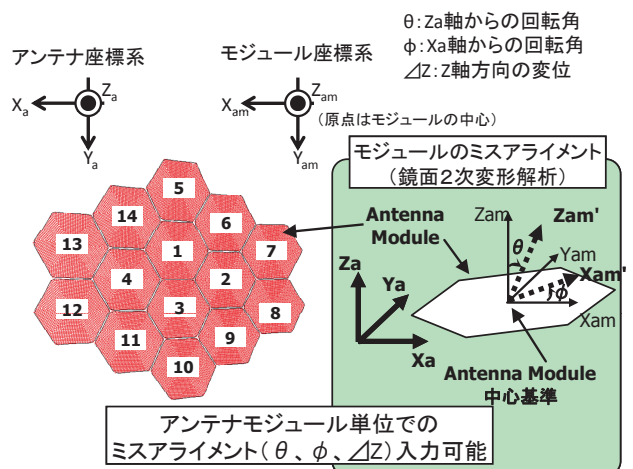


図6 パラメータの選定 (低サイドローブ化)

ジュールに与えられたパラメータ値で14個のモジュール分の鏡面データをもとに、計算値 P_s を求める。この P_s 値と REV 測定値を比較して比較することになるので、ビーム指向補正での回転角での評価より、14倍の回数で評価することになる。以後これらのパラメータによる誤差を2次変形と呼ぶ。

3.3 鏡面形状の推定手順

ここでは実際の実験の手順を示す。図7に鏡面形状推定のフローを示す。図7はビーム指向方向補正実験を想定して示しているが、低サイドローブ化についてもフローは同様である。実験は図に示すように放射パターン測定とREV測定の2種を実施している。パターン測定は現状の放射パターンの確認のために測定するが、REV測定と続けて実施している。これはなるべく近い時刻に測定することで、熱歪の時間変動の影響を極力小さくさせるためである。REVで得られたデータから相対位相値 Pr を求める。次に補正値を算出する。初めに与えられたパラメータである α と β から P_s を計算し、評価関数を用いて比較評価する。これより得られたパラメータもとに反射鏡データとして、パターン計算によりビーム指向方向を確認する。また、補正にはこの鏡面データから新たに励振ウェイトを求め、このウェイトをETS-VIIIの給電部に与えてパターン測定実験を行い、評価する。

3.4 実験検討

ここでは実験に際し、考慮した事項をまとめる。

3.4.1 地上局の検討

地上局を図8に示す、NICT関連の施設を利用した。ある程度ビームをカバーするために、沖縄、九州、関西、関東の広範囲の局で実施した。ビーム指向方向補正実験と低サイドローブ化の実験は時期が異なっており、実験を実施した時期においては、ETS-VIIIは衛星軌

道位置の南北方向のずれを修正する「南北制御」を行っておらず、衛星の軌道位置が南北に変動する。そのためビームが南北に移動する。その移動量は日にちが経つほど大きくなる。実験の間隔は約1年あり、低サイドローブ化の実験時はかなり変動が大きくなっていった(ビーム指向方向で約0.3°程度)ので、沖縄局を追加している。

3.4.2 評価ビームの検討

ETS-VIIIのアンテナはフェーズドアレーを給電部としたオフセットパラボラアンテナである。このため通常の直接放射のアレーアンテナとは異なり、素子単体のパターンはパラボラ反射鏡でビームが細くなり、日本全国を均一に照射することができず、一部を照射することになる。そのため各素子からの寄与(素子の利得)が地方により異なる。図9は素子単体の放射パターンを計算したものである。これは図3に示した素子配列のうち、たとえば素子9の場合、アレーの励振振幅ウェイトの素子9番目を1とし、他の素子を0としたときのパターンである。素子13についても同様に素子13の励振振幅を1、他を0としている。ここで

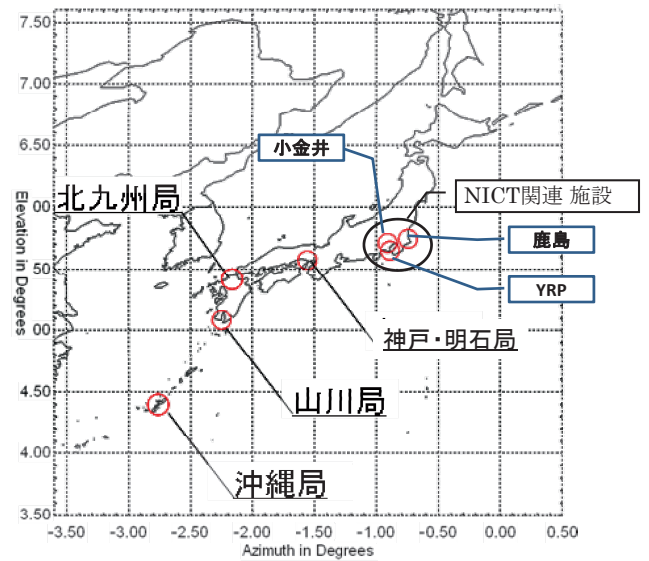


図8 地上局の配置

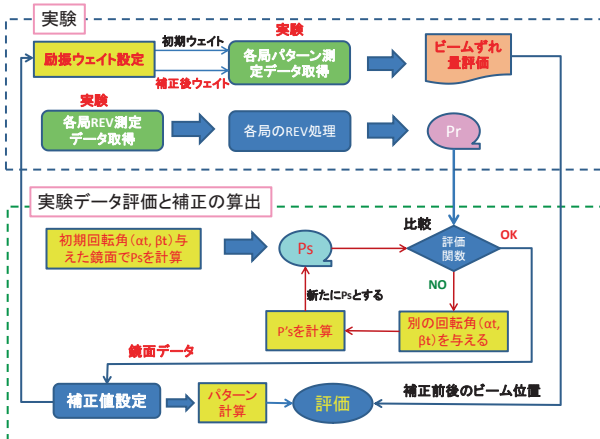
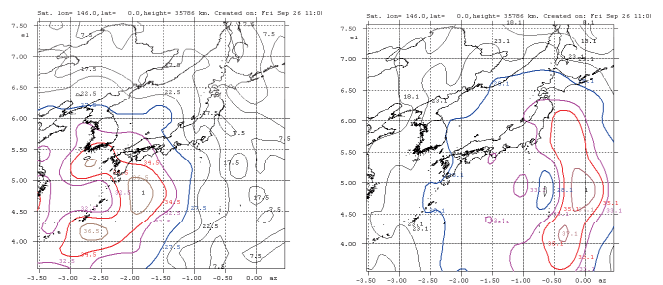


図7 鏡面形状推定フロー



素子9の放射パターン

素子13の放射パターン

図9 素子のパターン例

4 通信応用実験

図の横軸はアジマス方向の角度、縦軸はエレベーション方向の角度である。コンタに示す数値は絶対利得を示している。九州地方の地上局（北九州、山川局）に着目すると、素子9では九州地方に高い利得があり、受信レベルが高いことが予想される。一方素子13のパターンでは九州地方では利得が低くなっており、受信レベルが小さく、関東地方の受信レベルが高くなることがわかる。

またREVを実施する場合、ビームをたとえば九州ビームとすると関東地方の局の受信レベルが低くなり受信が難しく、逆に関東ビームを用いると九州地方の局の受信が困難となる。従ってビームにより地上局が受信する寄与のばらつきが大きいのでREVを実施すると変動が読み取れない（変動が小さいため）ことが生じる。これはたとえば九州ビームにおいて、北九州の地上局で受信するとき、ビームの受信レベルは非常に高くなっている。一方その時たとえば素子13のREVを測定しようとした場合、図9に示すように素子単体のパターンは北九州局に対して利得が低く、位相を変えても変動がほとんど見えないことが生じる。すなわち式(1)の C_0 は大きい C_1 が小さく変動が見えにくい（変動レベルが0.05dB以下）ためである。

そこで励振振幅を図3のものから図10に示す励振ウェイトに変更し、各素子のSSPAから給電される励振振幅値とした。振幅の設定は2段階に設定した。またこの振幅で位相を均一にしたパターンを図11に示す。このビームを純均一ビームと呼ぶ。九州から関東まで広い範囲で利得が高く得られている。実験ではこのビームを元の合成電界 E_0 としてREV法を実施した。

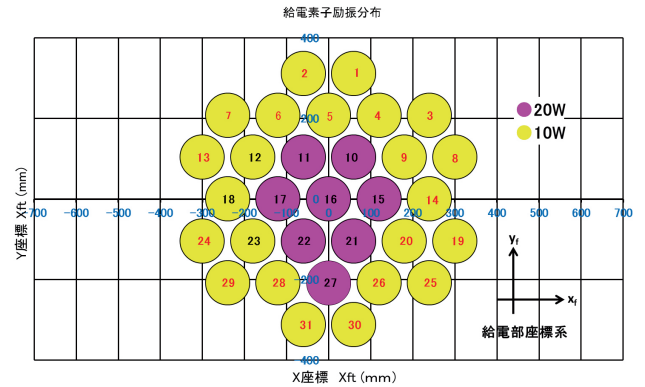


図10 給電部の励振ウェイトの設定 (REV用)

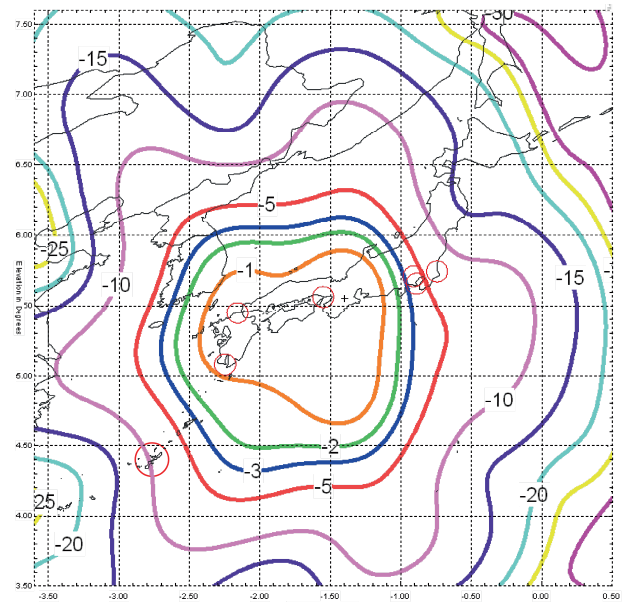


図11 REVで用いた放射パターン

4 実験結果

ここでは実験結果について述べる。

4.1 実験項目

実験はETS-VIIIのパターン測定結果から以下の2項目について実施した。

(1) ビーム指向方向補正実験

ETS-VIIIにおいてビーム指向方向変動が観測され、基本実験ではビーム指向方向を推定した補正実験も実施している^[2]。これはビーム指向方向の変動する方向を予測して相対的ビームを走査するものである。ここでの実験は実際のビーム位置が想定値に対してずれているものを反射鏡形状誤差と給電部励振誤差を補正して、ビームを所望の位置に設定する実験である。

(2) 低サイドロー化実験

これは3で述べたように、測定した初期のサイ

ドロップレベルからモジュールごとに回転と並進誤差（アンテナ座標系のZ軸方向の移動）を与え、新たな励振ウェイトを与えてその値を下げる実験である。

4.2 地上局

地上局は図8に示すようにNICT関連の施設を利用したが、ビーム指向方向補正実験と低サイドロー化実験は実施した時期が異なり、時期に応じて利用する局も若干変えている。各実験で用いた局を以下に示す。

ビーム指向方向補正実験：関東NICT関連施設（小金井、鹿島、YRP）、明石、山川

低サイドロー化実験：関東NIXT（鹿島、YRP）、神戸、北九州、山川、沖縄

4.3 ビーム指向方向補正実験^{[5]-[8]}

(1) 実験概要

実施項目はパターン測定とREV法による測定で、初

めにパターンを測定して現状を確認し、次にREV法で相対励振振幅・位相を測定した。次にこのREVデータをもとに反射鏡形状を推定し、新たな給電部の素子励振ウェイトを設定してパターン測定を実施した。まずREVを実施するため準均一ビーム(3.4.2参照)を用いてデータが得られるかどうかを確認し、その後ビーム指向方向補正実験を実施した。実験は2回に分けて実施した。

- 確認試験(夏期:2010年7月13・14日)

各局のREV測定が可能かどうかを確認する試験である。REVの本実験は2010年の12月ごろの冬期に実施する計画であった。図8に示すように地上局を配置して衛星からの電波を受信して冬期に実験を実施するために、冬期と同じ構成で地上局を配置して各局で得られた測定結果の比較を実施した。図12に構成を示す。

ETS-VIIIではオンボードプログラム(給電部制御する搭載コンピュータに組み込まれたプログラム)にREV用のコマンドが準備されており、REV実施の対象とする素子の番号、位相を変える位相ステップ量、位相切り替え後の保持時間がコマンドにより設定できるようになっている。実験はこの機能を用いて31素子全て実施している。

その際、以下の事項を考慮した。

- 各局の受信条件により受信レベルが異なるため、各局に同じレベルで電波が照射できるブロードなビームであるHACアンテナ(高精度時刻基準装置アンテナ)で電波を照射し、各局で受信したレベルを比較して、レベルを校正できるようにした。HACアンテナは衛星測位実験のためにETS-VIIIに搭載されているが、周波数が2.5GHz帯にも対応している。ビーム幅は 7° 以上あり、日本本土ではほぼ均一な利得を有している。
- 短時間で測定できるようにコマンドを31素子分自動的に送信できるようにした。これは時刻とともに太陽の照射方向が変わるため、熱歪量が変化するのでその影響を少なくさせるためである。

- ビーム指向方向補正実験(冬期:2010年12月6~10日)
地上局を夏期と同じ位置配置しREV測定を実施した。REV測定には準均一ビームを用い、評価のために九州ビームと関東ビームを作り、パターン測定を実施した。

(2) ビームシフトの確認

本実験はREV法で測定したデータをもとに実際の反射鏡の形状予測をして、パターンがずれていることを確認するものである。複数局を用いてREV測定を行い、反射鏡の変形を予測した。その形状をもとに再計算するとビームがシフトしていることが確認された。関東ビームで(Az: 0.35° , El: 0.11°)、九州ビームで(Az: 0.30° , El: 0.10°)東北東にずれている。このことから反射鏡の形状をもとに励振位相を新たに求めることでビームが補正可能であることが確認できた。結果を図13に示す。図の実線はREVデータをもとに予測した鏡面データで計算した結果で、ビームがずれている。破線はこの鏡面データをもとに励振ウェイトを再設定してビームを所望位置に向けた計算結果である。ここで、各角度の極性は

アジマス角: +が東方向、-が西方向

エレベーション角: +が北方向、-が南方向

である。

図14、15にREV測定結果の例を示す。この図は測定した処理前の生データを示している。ここで示しているのはそれぞれ山川局と鹿島局の2局での値であるが、いずれの局も、受信電力は横軸を設定位相としたcosineカーブ(パラメータを位相値とした)を描いている。図の受信電力値は対数で示されているのでわかりにくいだが、真値ではcosineカーブとなっている。図の位相が 180° の地点で受信利得が等しくなっているように見られるのはビーム設定時の励振位相をすべての素子に対して 180° に設定しており、各素子のREV測定時に設定位相が 180° になった時が設定ビームの位相値と同じになるので、受信レベルが同じ値を示す

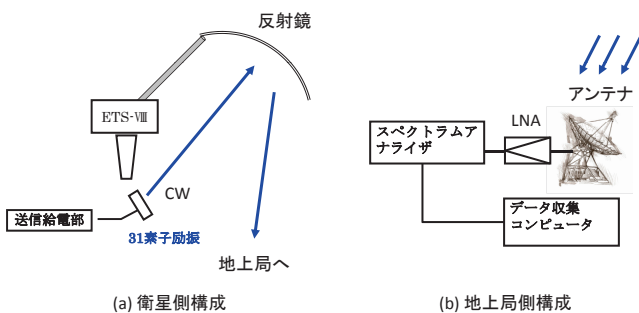


図12 衛星と地上局の構成

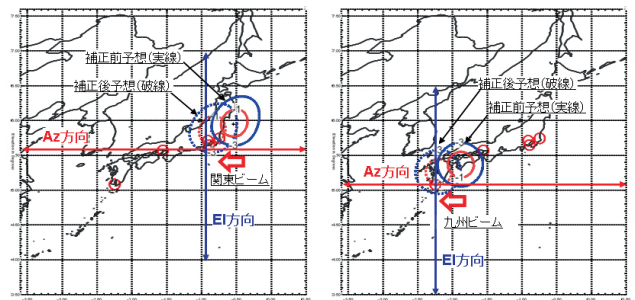


図13 ビームシフトの確認と補正

4 通信応用実験

ためである。すなわち、REV 測定時に、ある素子に着目して位相を回転させている時に、素子の位相を 180° にした時が、元の設定ビームとなるからである。REV 測定を開始するとオンボードのプログラムが指定したステップと時間で位相器の位相を変化させる。その時の開始の移送器の位相設定値は 0° となっている。実験では開始点をわかりやすくするために、設定位相を -180° とした。位相ステップ 11.25° すると REV 開始の位相は 0° から 348.75° まで 32 ステップで変化する。

STICS にて開発したソフトウェア「大型アンテナ指向変動等模擬ソフトウェア」の開発時の検討で、地上局が 4 局以上であることが必要であるとの結果が得られていた^[7]。実際に ETS-VIII のアンテナを用いて実施

した結果、4 局以上あることが望ましいことがわかった。結果を図 16 に示す。図は反射鏡回転角に対する評価関数の値の変動について地上局数を変えて比較したものである。評価関数がゼロまたは極小となる点が推定される回転角となる。Ya 軸回りの角度 βt についてはビームの移動角に対する回転角の感度が高いため推定が 4 局以下でも可能と思われるが、オフセット軸回りについては感度が鈍いので、4 局以上ある方が推定可能であることがわかる。回転軸については ETS-VIII の反射鏡設置の条件を考慮して選定したが今後はよりビーム移動角に対して回転角の感度が高く、軸もなるべく直交した回転軸を検討していく必要がある。各軸の回転方向を図 5 に示す。

(3) ビーム指向方向補正実験

REV 法を用いてビームの指向方向補正の実証実験を実施した。本実験では給電素子の補正量を設定するために (2) の結果を用いた。

関東ビーム：アジマス $+0.35^\circ$ 、エレベーション $+0.11^\circ$
 九州ビーム：アジマス $+0.3^\circ$ 、エレベーション $+0.1^\circ$
 と与えられる。このシフトした値をもとに戻すことでビームが補正できる。このシフト量の極性を反転したものが推定ビーム補正量である。

REV 結果を用いて補正実験を実施した結果を図 17～20 に示す。その結果、

ビームシフト量は補正前のビーム位置に対し、
 関東ビーム：アジマス -0.30° 、エレベーション -0.05°
 九州ビーム：アジマス -0.17° 、エレベーション -0.01°
 となり、推定補正量に近い値となった。なお、ビームシフト量を評価したカット面を図 21、22 に示す。

STICS にて開発した「大型アンテナ指向変動等模擬ソフトウェア」を用いてビーム指向方向の補正に関する検証実験を実施した。その結果ビーム指向方向補正に関しては複数の地上局で受信して得られた REV 法のデータを用いてビーム指向方向を推定して補正することが可能であることがわかった。

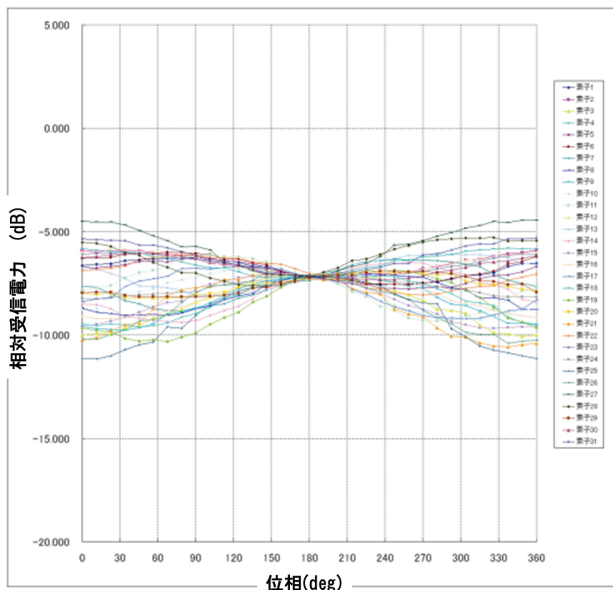


図 14 REV 測定例 (山川局)

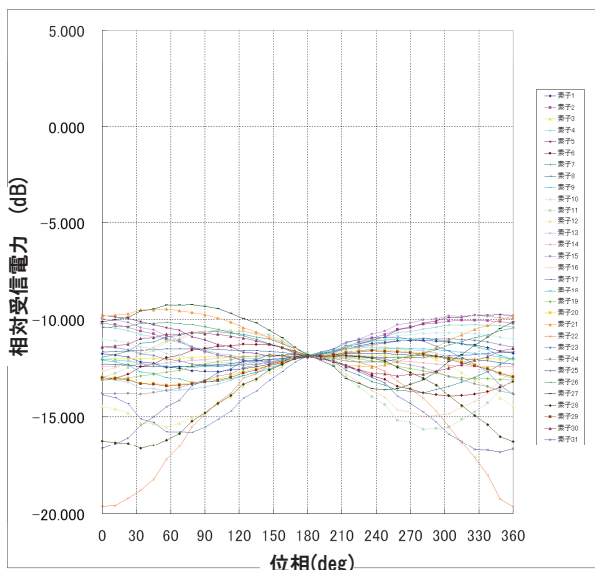


図 15 REV 測定例 (鹿児島局)

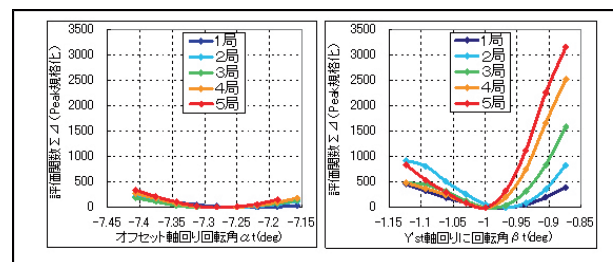


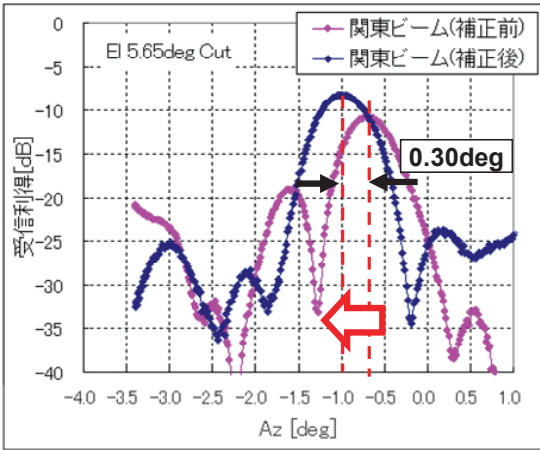
図 16 地上局数と評価関数

4.4 低サイドローブ化実験

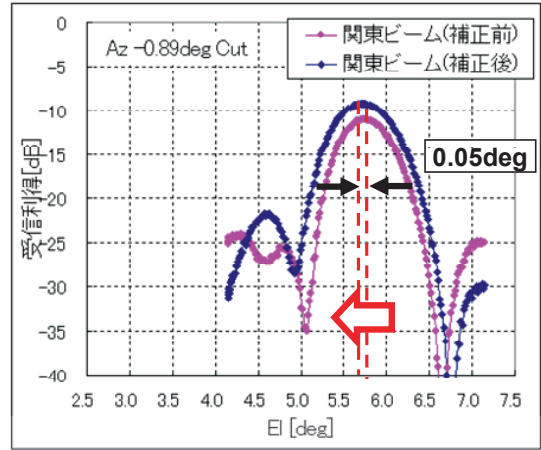
(1) 実験概要

実験はパターン測定と REV 測定を実施した。基本

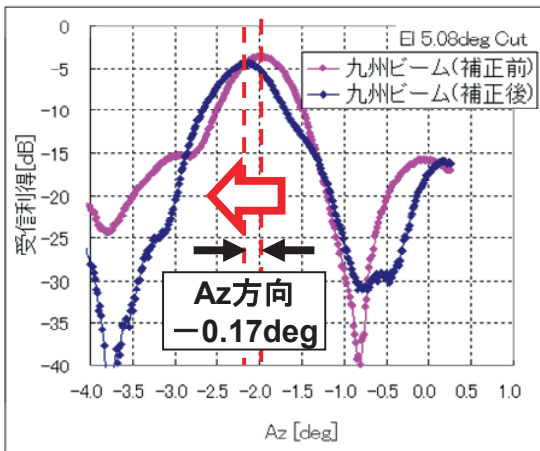
的に実験の流れと内容はビーム指向方向制御実験と同じであるが、同じ時期のなかで、前半に測定した REV の結果を反映した補正データを用いて励振ウェイトを



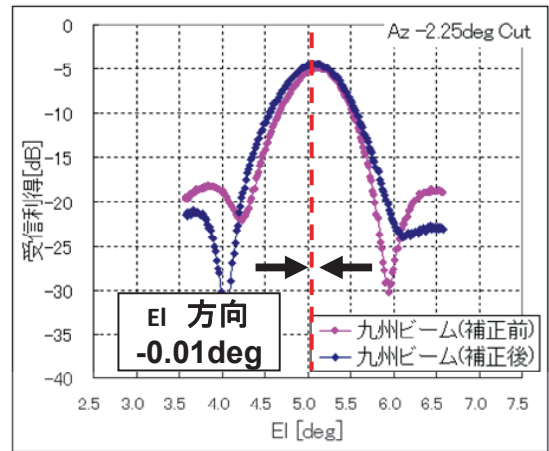
(a) アジマス方向補正結果
図 17 関東ビーム指向方向補正結果



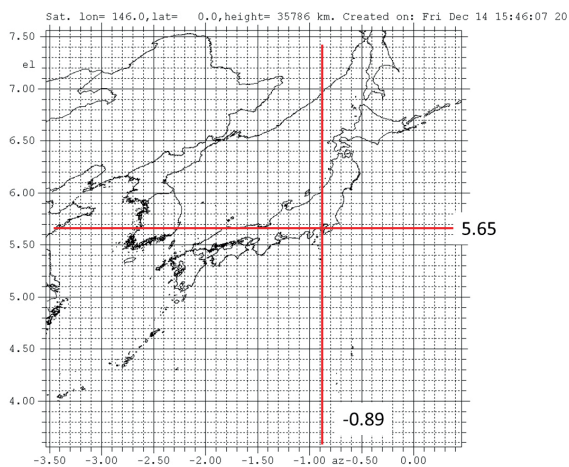
(b) エレベーション方向補正結果
図 18 関東ビーム指向方向補正結果



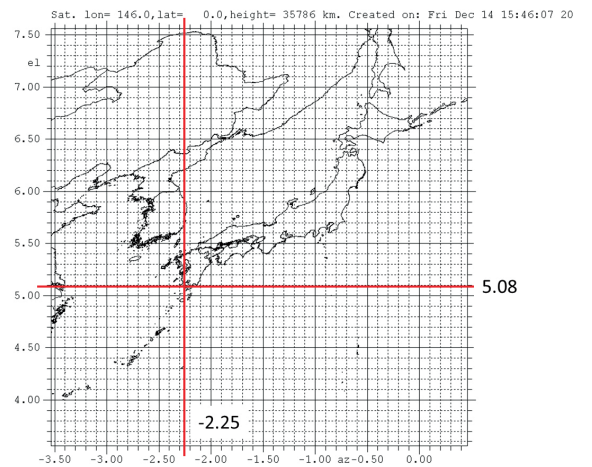
(a) アジマス方向補正結果
図 19 九州ビーム指向方向補正結果



(b) エレベーション方向補正結果
図 20 九州ビーム指向方向補正結果



(a) 関東ビームのカット面
図 21 評価したカット面



(b) 九州ビームのカット面
図 22 評価したカット面

4 通信応用実験

再設定して最後にパターン測定をしている。実施時期は夏期と冬期の2回である。

- ・夏期実験: 2011年6月4～8日
- ・冬期実験: 2011年12月5～9日

複数の地上局を用いて衛星からの電波を同時に受信して複数局のREVデータをもとに励振誤差を推定した。推定した誤差をもとに鏡面形状を推定して新たな励振分布を求め、ウェイトを再設定してパターンと比較検討を実施した。

(2) 実験結果

実験は九州ビームが最も対称性が良く、南北方向に地上局を、北九州、山川、沖縄と配置でき、精度の高い結果を得ることができるので九州ビームについて着目して評価を実施した。実験は夏期と冬期の2回実施しており、それぞれ実験時のビーム形成方向が、ETS-VIIIの軌道が変動するため異なっている。比較すると夏期はやや北側で冬期はやや南側となっている。実験では

これを考慮して評価しなければならない。実際には時刻と衛星位置を計算して、夏期となるべくビームが離れていない時刻に測定するように検討した。図23、24に結果を示す。

アジマス方向のカットパターンを見ると、計算値(理想値)に比べサイドローブが高くなっていることがわかる。ここでいう計算値はビーム設定時のもので、このパターンが望むパターンである。このパターンでは鏡面形状については実際の軌道上の熱歪みが考慮されていない。実験では所望の値より高いサイドローブを下げることを目的としている。図の星印は北九州局の位置を示している。ビームの実測値と計算値(理想値)の差は次の値となった。

- アジマス : 夏期、冬期でほぼ同じ +0.2°
- エレベーション: 夏期 +0.2°, 冬期 -0.2°

実験は夏期と冬期の両時期とも初めにパターン測定とREV測定を実施し、そのデータを用いて鏡面形状を推定して給電部の励振振幅・位相の補正值を求めた。

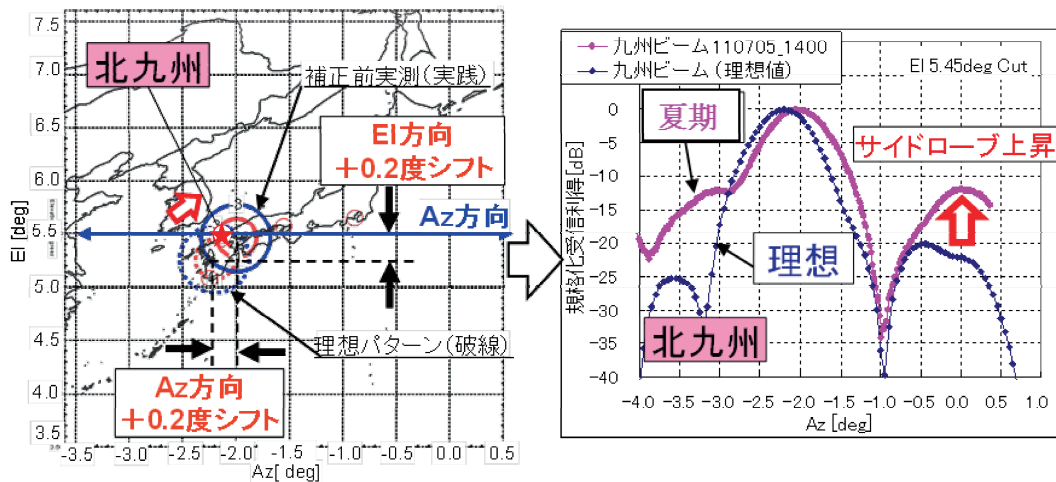


図23 九州ビームのビーム配置 夏期

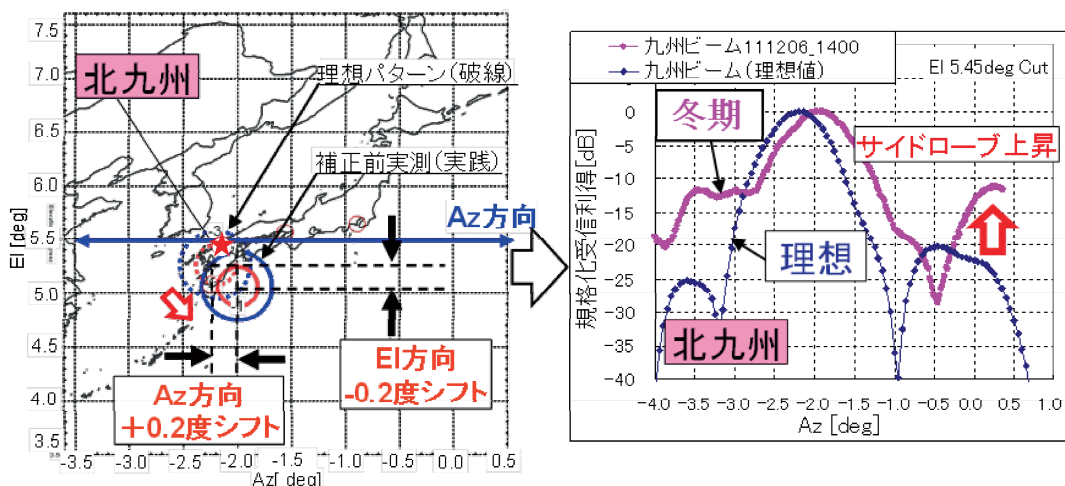


図24 九州ビームのビーム配置 冬期

その後、給電部励振位相・振幅を再設定し、最後にパターン測定を実施して初めのパターンとの比較を行い、補正の妥当性を検証した。評価するビームとして九州ビームを選定している。

図 25 に夏期の結果を示す。図の左のコンタ図は計算値で、所望のパターンを示している。しかし、図の丸内部のサイドローブが実測値では高くなっていた。そこでこの付近のサイドローブを下げるために、複数局で受信する REV 法を用いて鏡面形状を推定して補正值を求め、給電部の励振・位相を再設定して得られたパターン（補正後）と比較した。北九州での測定結果を右図のカットパターンに示す。カットパターンを見ると補正前後でサイドローブが改善されているのがわかる。ここでコンタ図の矢印方向がカット方向で、星印は北九州局の位置である。

次に冬期における結果を図 26 に示す。夏期と同様にサイドローブが抑圧されているのがわかる。

(3) 実験結果のまとめ

複数の地上局を用いた REV 法による低サイドローブ化の補正実験を実施し、九州ビームでサイドローブを抑圧することができた。また、夏期と冬期で同じ条件、すなわち地上局、測定系構成、測定手順等が同じ実験を実施し、同じ箇所のサイドローブ低減化に関する補正実験から同様の結果が得られた。図 27 は夏期と冬期の比較を示したもので、メインローブおよびサイドローブともほぼ同じパターンとなっている。このことから、複数局 REV による反射鏡形状予測により形状が推定できることがわかり、この推定形状をもとにサイドローブの低減化が可能であることがわかった。

ここでの結果は九州ビームのみであり、実用に供するためには他ビームを含めた総合的な検討が必要である。九州ビームは形状も比較的対称で利得も高く、地上局もそれに合わせて比較的適切な配置をすることができた。また鏡面形状を推定するためにはさらに詳細な反射鏡特性を考慮した評価プログラムを開発する必

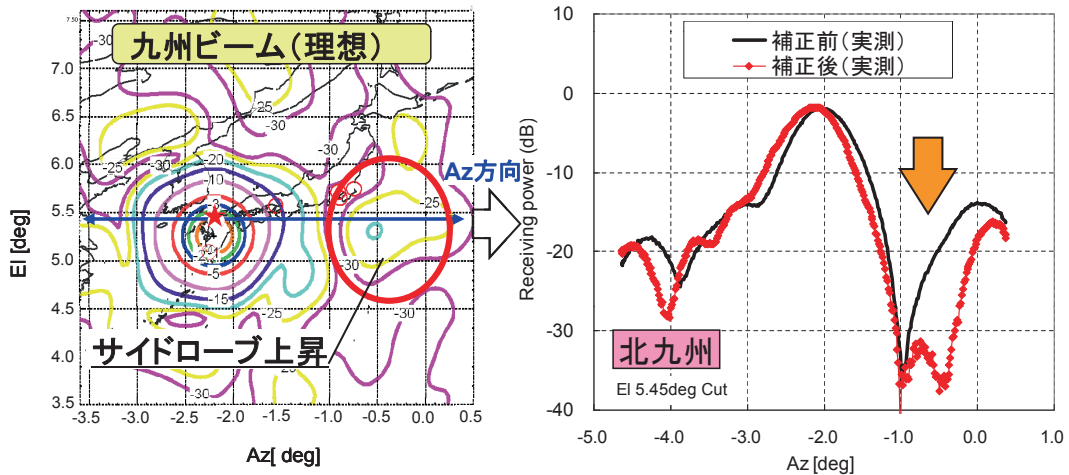


図 25 九州ビームのパターン補正結果 (夏期)

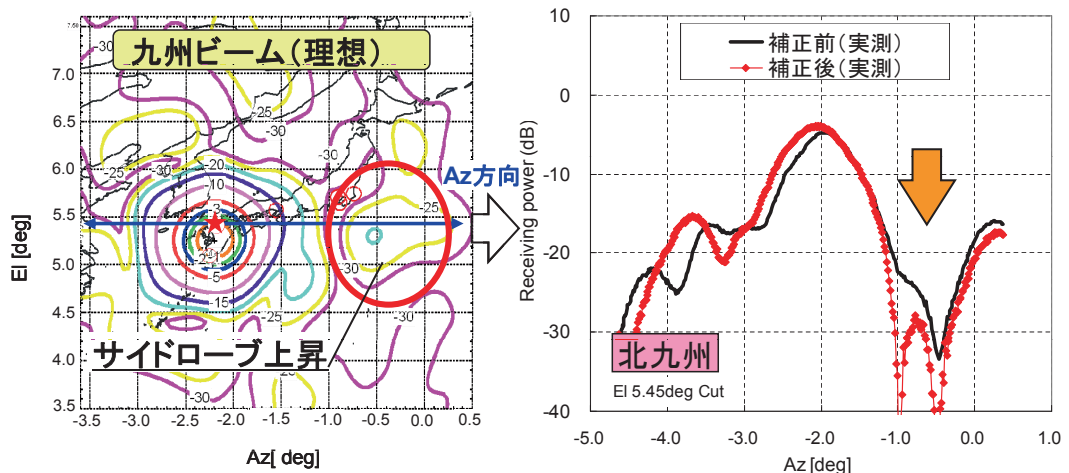


図 26 九州ビームのパターン補正結果 (冬期)

4 通信応用実験

要があると考えられる。

REV 測定時間が30分と長く、得られたデータを処理する時間がかかるため、現状はリアルタイムでサイドローブを制御することはできない。実用化時にはこれらの課題についても考慮して開発する必要がある。

4.5 衛星の南北制御の停止の影響について

実験を実施した時期においては、ETS-VIIIは南北制御をしておらず、本来の軌道位置からずれた軌道位置となっていた。実験は軌道位置のずれによるビーム位置を考慮して比較検討している。図28は九州ビームの例で夏期と冬期で約0.37°異なっていることが確認された。アジマス方向のずれには北九州局と山川局の受信信号を比較して評価した(図29参照)。その結果0.14°ずれていることがわかった。ここでも比較のために給電部励振ウェイトは夏冬同じ設定としている。

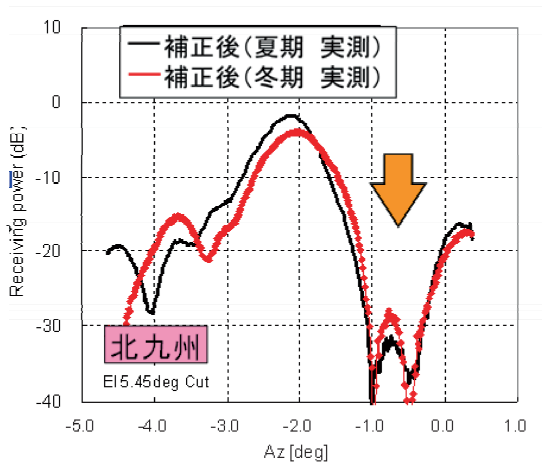


図 27 九州ビームのパターン補正の夏期と冬期の比較

4.6 課題

複数の地上局を用いたREV法による軌道上鏡面形状の推定実験を実施し、鏡面形状推定が可能であることが実験により確かめられた。しかしこれは鏡面形状の変形が限定されたものであり、鏡面の形状パラメータとして、ビーム指向方向補正実験では反射鏡の回転角 (α , β)、低サイドローブ化実験ではモジュールごとの回転角と平行移動を選定することで実施した。これらのパラメータはパターンの寄与に大きな影響を与えるもので、実際の鏡面変形を特徴づけたものである。より詳細なビーム制御をするためには反射鏡形状パラメータ選定に対する検討も必要である。

STICSでは地上試験において、反射鏡の鏡面形状の歪を推定し放射パターンを補正する確認実験を実施している^[9]。今回実施した実験はREV法を応用したもので、さらに他の手法で軌道上の反射鏡形状を知る手法について検討が必要である。

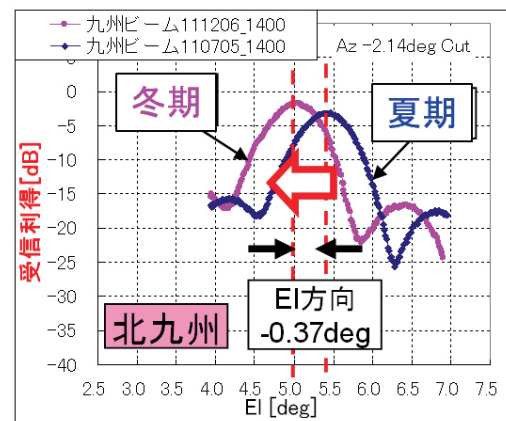


図 28 九州ビームの夏期と冬期のエレベーション方向の差異

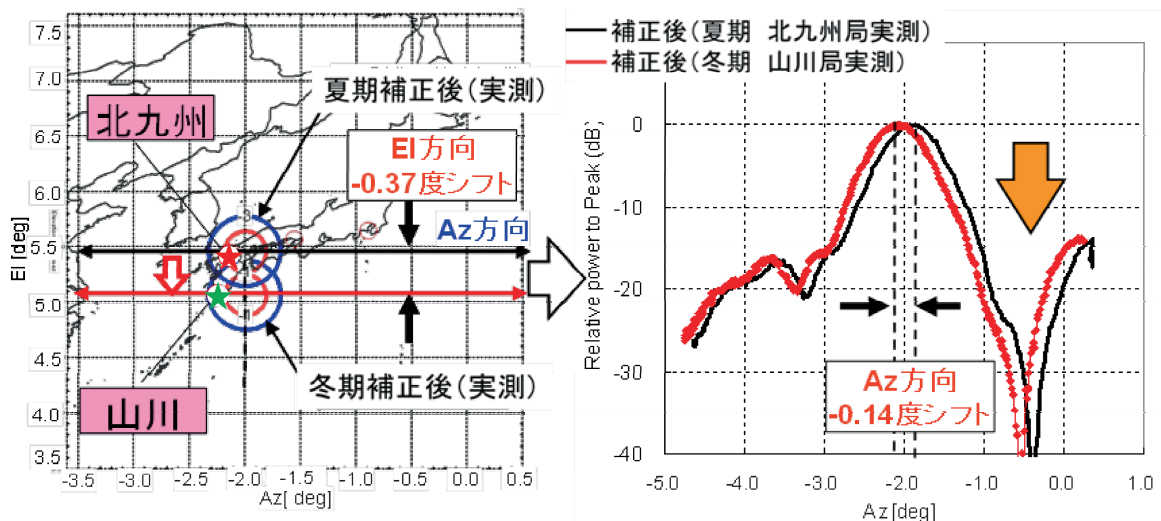


図 29 九州ビームの夏期と冬期の再現性 (アジマス方向)

5 まとめ

将来アンテナの技術課題を確認するため、ETS-VIIIを用いた応用実験を実施した。実験は各地方に設けた複数の地上局で信号を受信してREV法を適用して評価した。実験の結果、複数の局を用いることで、REVにより鏡面形状を推定することが可能であることがわかった。ただし、複数の地上局の準備、迅速な測定結果の評価と鏡面パラメータの選定、励振ウェイトの再設定と迅速な確認等非常に難しい評価手順であるため、将来のアンテナ設計時にはリアルタイム制御が必要となり、迅速に鏡面形状推定と励振ウェイト設定が可能のように軌道上において迅速な鏡面形状測定、給電部励振ウェイト誤差の測定等、検討する必要がある。

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研究開発機構の皆様へ感謝致します。

参考文献

- 1 佐藤正樹, 藤野義之, 織笠光明, “軌道上における技術試験衛星VIII型(ETS-VIII)搭載大型アンテナのパターン特性測定,” 研究速報B, Vol. J91-B, No. 12, pp. 1641-1643 2088-12.
- 2 佐藤正樹, 織笠光明, 藤野義之, “軌道上におけるETS-VIII衛星の大型アンテナ放射パターンの評価,” 信学論, B, Vol. J94-B, No. 3 pp. 344-352, 2011-3.
- 3 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, “安心・安全のための地上/衛星統合移動通信システム,” 信学論B, Vol. J91-B, No. 12, pp. 1629-1640, 2008-12.
- 4 真野清司, 片木孝至, “フェイズドアラレーアンテナ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. J65B, No. 5, pp. 555-560, May 1982.
- 5 織笠光明, 佐藤正樹, 川崎和義, 藤野義之, 三浦周, “REV法による技術試験衛星VIII型搭載大型アンテナの電気性能評価実験,” 信学技法, SAT2010-16 pp. 31-36, AP2010-55, pp. 99-104, 2010年07月.
- 6 織笠光明, 藤野義之, 三浦周, 佐藤正樹, 浜本直和, 鈴木龍太郎, 大嶺裕幸, 井上貴裕, “衛星搭載大型展開アンテナ指向変動等補正模擬ソフトウェアの開発,” 信学ソサエティ大会, B-3-4, 2010年9月.
- 7 大嶺裕幸, 井上貴裕, 織笠光明, 佐藤正樹, 藤野義之, 浜本直和, “REV法を用いた衛星搭載大型展開アンテナのビーム指向補正,” 信学ソサエティ大会, B-3-2, 2011年9月.
- 8 T. Orikasa, Y. Fujino, M. Satoh, A. Miura, N. Komiyama, and H. Ohmine, “Experimental Study of on-Orbit Correction for Beam Direction Variation of Large Reflector Antenna,” 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011), AIAA 2011-8049, 28 Nov.- 01 Dec. 2011, Nara, Japan.
- 9 T. Orikasa, A. Miura, H. Tsuji, and Y. Fujino, “Study of Large Reflector Antenna mounted on Communication Satellite for Satellite /Terrestrial Mobile Communication System,” 31th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2013), AIAA 2013-10827, Oct. 14-17 Oct. 2013, Florence, Italy.



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

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



山本伸一 (やまもと しんいち)

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
移動体衛星通信



川崎和義 (かわさき かずよし)

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
衛星通信



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