

超マルチビーム技術の検討とビーム形成実験

織笠光明 藤野義之

STICS に用いられるアンテナは展開鏡面とフェーズドアレー給電部から構成され、素子数とビーム数が 100 程度のマルチビームを形成する。筆者らは DBF チャネライザの機能を確認するために部分モデルを開発した。DBF /チャネライザは柔軟にビーム形成をすることができる機能を有している。給電素子の部分モデルと反射鏡及び DBF /チャネライザを組み合わせることでアンテナの放射パターンを測定し、超マルチビーム形成機能について検討する。

1 まえがき

STICS の通信システムでは、ビーム数が 100 程度のマルチビームアンテナを検討している。そのとき周波数の有効利用のため周波数再利用を基本としている。これを実現するアンテナは開口径が 30 mφ クラスの反射鏡アンテナで、打ち上げ時に収納し、軌道上で展開するメッシュ展開反射鏡アンテナが想定される。アンテナの給電部は 100 素子クラスのアレイ給電部で Digital Beam Former (DBF) により制御されているので、励振ウェイトに対する自由度が高く、容易に多くのビームを作ることが可能である。STICS では部分モデルとして、デジタルビームフォーマ/デジタルチャネライザ (DBF /チャネライザ) を開発した。また 16 素子のアレイ給電系を開発している。ここでは超マルチビームを実現するための技術として、開発した DBF /チャネライザを用い 100 ビーム同時にビームを形成する実験の結果と評価について述べる。

2 超マルチビーム形成技術の検討

検討するアンテナのビーム数が 100 クラスと多く、通常のマルチビームアンテナ (アナログ方式) ではビームフォーミングネットワーク (BFN) が非常に複雑となり、衛星搭載を考慮すると質量、消費電力増大及び排熱量増大で技術的に課題が大きい。

STICS で検討している衛星搭載アンテナは技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII)^{[1][2]} と同じ方式であるが、アレイ給電部のビームフォーミングネットワーク (BFN) を DBF としている。DBF は自由度が高く、ビーム設定も容易で給電回路も簡素化され、質量の軽減化も期待される。

試験には STICS で開発した小規模受信 DBF /チャネライザを使用した。このモデルは入力ポートが 16 で、ビーム出力ポートは 16 である。またアレイ給電部の素子が 16 となっており、実験は 16 素子アレイ給

表 1 検討するパラメータ

パラメータ	設定値
軌道位置 [° E]	136.0
周波数 [MHz]	1995.1
開口径 [m]	27.0
F/D	0.6
離焦点距離 [m]	1.0
ポアサイト方向 [経度 ° E]、[緯度 ° N]	東経 135.0、北緯 35.0
ビーム数	83
ビーム径 (エリア) [°]	0.45
素子数	127
素子間隔 [mm]	150.0

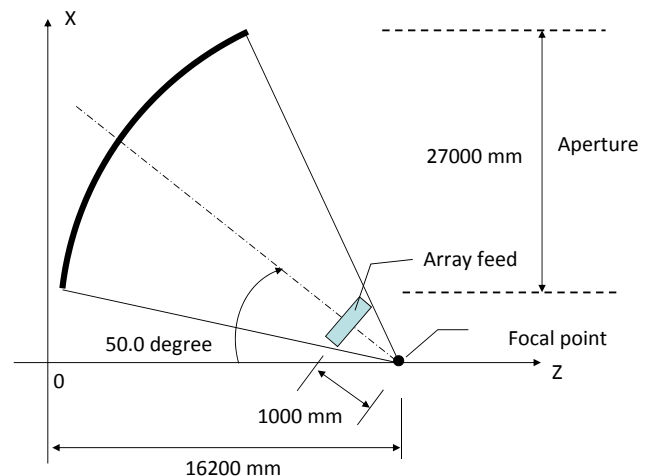


図 1 検討するアンテナパラメータ

3 地上／衛星間干渉回避及び周波数割当技術

電部を基本に DBF／チャネライザのビーム形成機能確認を実施した。

検討項目は以下の2つである。

- (1) ビーム形成機能試験
- (2) 超マルチビーム形成試験

2.1 衛星搭載面とビーム形成に関する検討

想定されるサービスエリアとアンテナを考慮し、3-2で想定した給電部ベースラインを元に、具体的にパラメータを設定して特性を確認する。設定した値を表1に示す。表を元にしたアンテナパラメータを図1に示す。

これらのパラメータからビームを日本本土及び近海を考慮してビームを配置することを検討する。通常アンテナを衛星に搭載する際は東西面となる可能性が高いので両ケースについてビームを形成することを検討した。結果を図2、3に示す。

図の赤線の円は設定するビーム位置を示しており、これに基づき励振ウェイトを求めてパターン計算をした。結果を白線のコンタ図で示す。表2に静止軌道から見た検討するビーム位置のアジマス、エレベーション角を示す。

図の結果を比較すると、東面搭載時のパターンは東側のパターンの特性が良く、対称性も良いことがわかる。一方西面搭載時のパターンは西側のパターン特性が良くなっている。サイドローブを含めたパターンを図4、5に示す。ビーム③の場合西面搭載のパターンはサイドローブレベルが東面搭載に比べ高くなっており、西方のビームであるビーム④では東面搭載のパターンのサイドローブレベルが高くなっていることがわかる。これはビームごとにパラボラの使用している箇所が異なり、給電部の近いところは離れたところより曲率が大きくなっている。たとえば西面にアンテナを搭載すると、東側のビームは曲率の大きな箇所の面を主に使用し、西方ビームは鏡面の先端の曲率の小さな箇所を主に使用している。パターン特性の違いは使

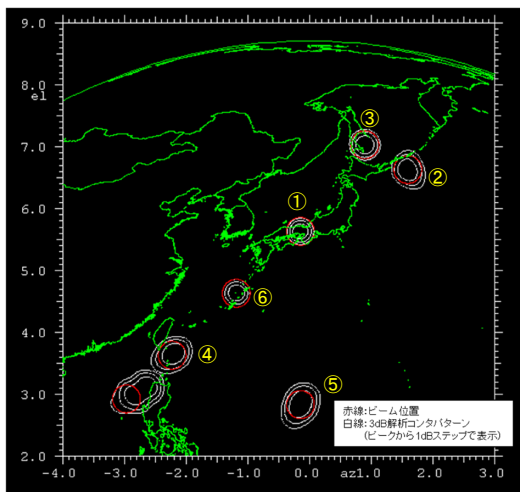


図2 東面搭載時の放射パターン

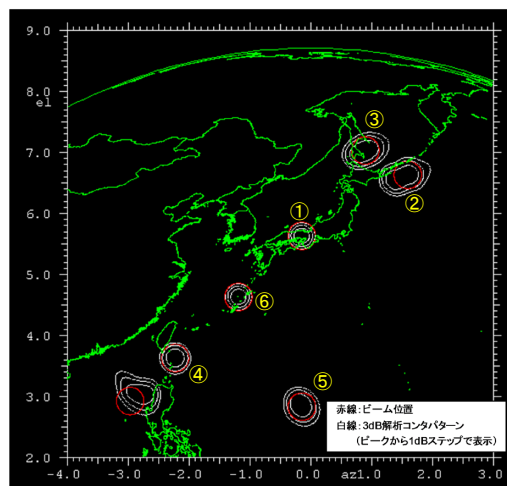


図3 西面搭載時の放射パターン

表2 検討するビームと位置

ビーム番号	Az [deg]	El [deg]
①	-0.14	5.63
②	1.59	6.62
③	0.89	7.03
④	-2.22	3.63
⑤	-0.14	2.83

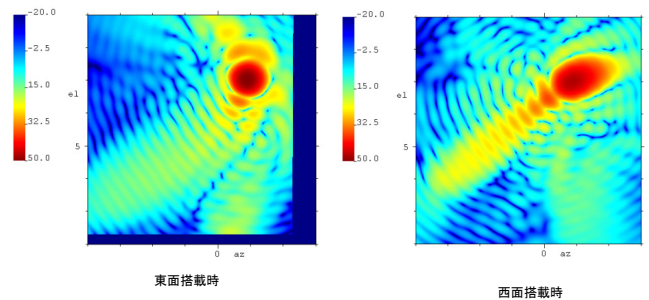


図4 ビーム③の放射パターン

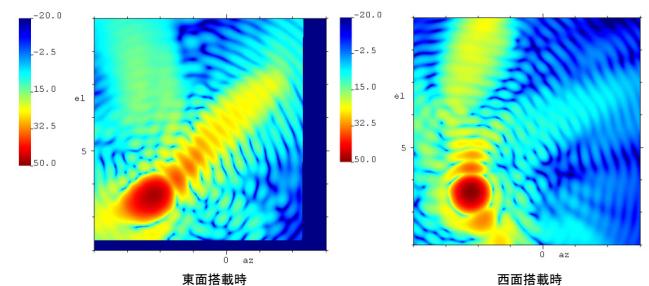


図5 ビーム④の放射パターン

用鏡面の曲率の違いの影響と考えられる。

以上の検討から、搭載面により東西ビームの形成のしやすさが異なることがわかった。実際の設計ではアンテナを搭載する際に

- 西方ビーム特性を良くしたい：アンテナを西面に搭載する。
- 東方ビーム特性を良くしたい：アンテナを東面に搭載する。

ことを配慮する必要があると考えられる。

2.2 ビーム形成機能確認

開発した DBF / チャネライザが 100 素子クラスのアレーアンテナに対しビーム形成機能を有していることを確認するために、16 素子アレー給電部と組み合わせ、NICT 鹿島宇宙技術センターにあるニアフィールドアンテナ測定装置 (NFM 装置) でパターンを測定する。そのパターン測定結果と反射鏡を組み合わせ、27 mφ の開口の 127 素子アレー給電反射鏡アンテナ特性を評価する。

給電部の素子数は 16 で、DBF / チャネライザは 16 素子対応であるため、127 素子のアレー給電を評価す

るために、小規模給電部部分モデルで実現可能なサブアレーに分割して測定を行う。図 6 は想定するアレー給電部とサブアレー化の説明をする図で、最大 16 素子で色ごとにサブアレーのグループを示している。測定は色ごとのグループごとに複数回実施してそれぞれサブアレーとしてのパターンを得る。図 7 は実際の測定するアレー給電部とサブアレーを対比した図である。必要に応じて、励振素子の選定とウェイトを設定する。

検討のフローを図 8 に示す。測定する素子は最大 16 素子のアレーであるため、図 6 に示すようにサブアレー化する。サブアレー化したグループに属する素子の励振分布は 127 素子アレーと同じウェイトとしてサブアレーのパターンを測定する。そのためグループごとに 16 素子アレー給電部の励振ウェイトを変えて、各グループのウェイトとして設定して測定する。各サブアレーのパターン測定結果を 1 つの素子パターンとし、これをサブアレー素子パターンとする。これらサブアレー素子パターンを合成して 127 素子アレー給電部の放射パターンを求めるのであるが、合成の際グループ素子間結合は考慮していない。合成の際各サブアレー素子の中心は測定時のサブアレー素子パターンの中心となっている。この中心がサブアレー素子の位置となっている。この給電部パターンと 27 mφ のパラボラ反射鏡を組み合わせたパターンを計算して、元の計算のみのパターンと比較する。このときの鏡面は図 1 に示すパラメータの理想パラボラを仮定して計算した。

実験結果については **3** で述べる。

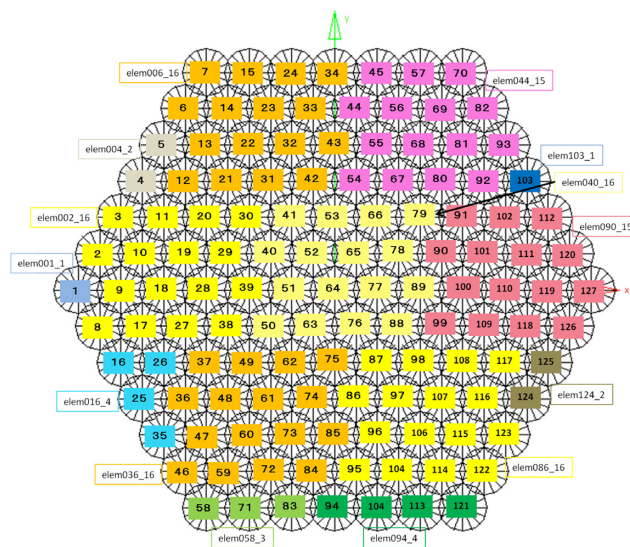


図 6 想定するアレー給電部とサブアレー

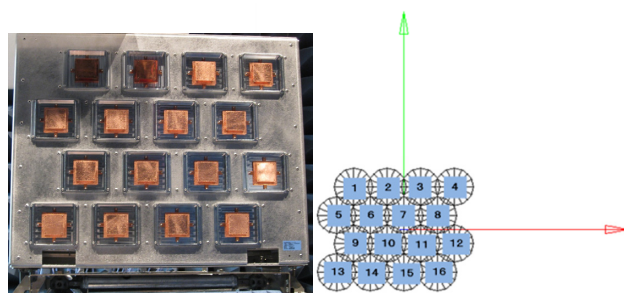


図 7 試作 16 素子アレー給電部とサブアレー

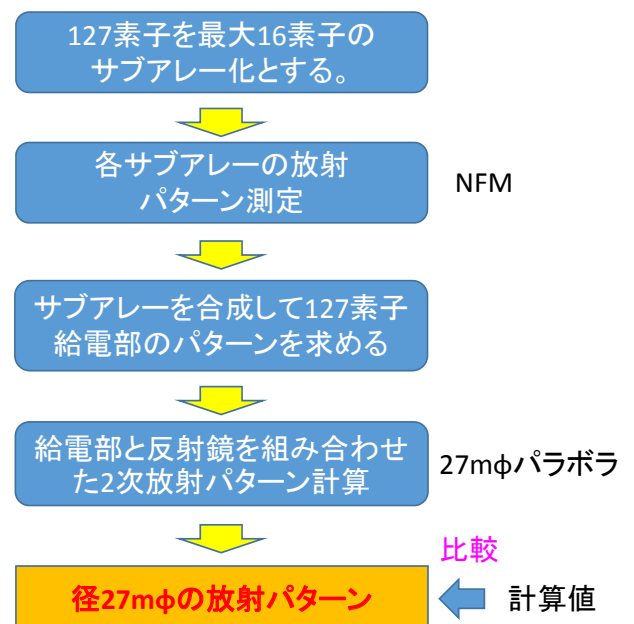


図 8 ビーム形成機能評価フロー

2.3 超マルチビーム形成機能確認

STICS では 100 のマルチビームを想定している。開発した DBF / チャネライザの基本機能が同時に 100 ビームを作れる機能を有しているかどうかを確認するために、16 素子アレー給電部とメッシュ反射鏡を組み合わせ、DBF / チャネライザのチャネライザ機能を用いて 100 ビームを作る実験を行った。測定は京大生存圏研究所のプレーンポーラニアフィールドアンテナ測定装置を用いた。

素子 16 で 16 ビーム対応の開発した受信用 DBF / チャネライザを用いて 100 ビームを形成できる機能を確認するために、測定装置の機能を用いて 7 周波数同時測定を行い確認する。ここでいう 7 周波同時測定とは高速に周波数を切り替えて同期させて信号を受信する機能である。図 9 にパターン測定時のアレー給電部と DBF / チャネライザの機能系統図を示す。実験は受信用 DBF / チャネライザを用いたため、ここでは受信系に沿って説明をする。

アレー給電部には周波数 f_1, f_2, \dots, f_7 の信号が入ってくる。これを各素子で受信し、信号をそれぞれデジタルチャネライザに送る。チャネライザでは各素子の信号をフィルタで帯域分割し、周波数ごとに時系列で各素子からの信号をまとめる。周波数ごとの信号を DBF では素子ごとにあらかじめ与えられた DBF 係数を用いて処理することで、Beam1 から Beam7 の信号として出力する。一方 100 ビームを作るためには DBF 係数を 100 種類準備する必要があるが、開発した DBF / チャネライザでは 16 ビーム分のメモリしかないため、100 ビームを同時に形成することはできない。これは単にメモリを増加し、ポートを増やせば済むことになるので、100 ビーム同時形成機能としてはメモリの値を変えて、複数回の測定で評価しても十分機能を確認したことになる。DBF / チャネライザのポートは 16 あり、16 の出力(ビーム)が可能であるが、パターン測定装置の制約からビームごと

に周波数を変えて測定している。なお DBF / チャネライザでは周波数が同じでも DBF 係数を変えることで DBF 処理後の出力は別のビームが取り出せる。たとえば周波数 f_1 の Beam1 を “Beam1-a, Beam1-b, Beam1-c . . .” と同じ周波数で異なるビーム出力を得ることができる。

ここでは最大ビーム数 7、すなわち 7 周波数を同時測定し、DBF 係数を変えて十数回の測定を繰り返して 100 ビームパターンを得た。

3 実験結果と考察

ここでは超マルチビーム形成技術に関わる 2 つの項目の実験結果と考察についてまとめる。実験は 2 種類実施し、測定場所が異なる。それぞれ、

ビーム形成機能確認実験：鹿島宇宙技術センター

(平面ニアフィールドアンテナ測定設備)

超マルチビーム形成機能確認実験：京大生存圏研究所

(プレーンポーラニアフィールドアンテナ測定設備)

で実施した。特に超マルチビーム形成機能確認実験では口径 3.3 m のメッシュ反射鏡と 16 素子給電部及び DBF / チャネライザを組み合わせ実施した。

3.1 ビーム形成機能確認実験

開発した DBF / チャネライザのビームを形成する機能の確認実験を鹿島の平面 NFM 装置を用いて放射パターン測定を行って実施した。手順は、2.2 で述べたように最大 16 素子のサブアレーとして測定する。サブアレーの測定した値をもとに 27 mφ の反射鏡の 2 次放射パターンを計算してパターンと計算のみのパターンを比較して評価した。

図 10 に平面 NFM 装置を用いた実験の系統図を示す。青枠で囲った箇所が電波暗室内に設置した機器で主に給電部が設置されている。それ以外はほぼ暗室外

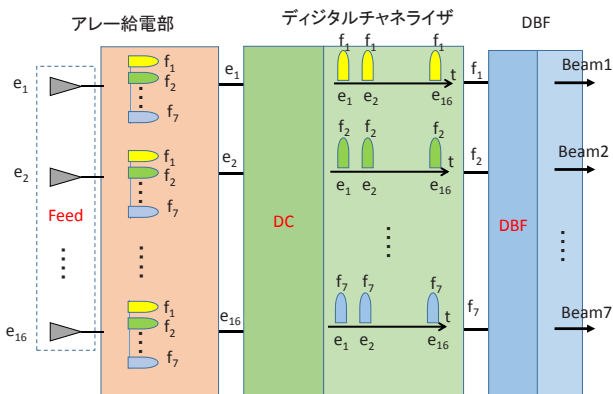


図 9 アレー給電部と DBF / チャネライザの機能系統図

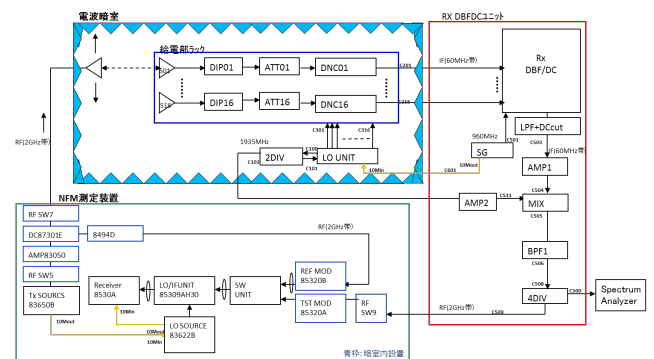


図 10 ビーム形成機能確認実験系統図

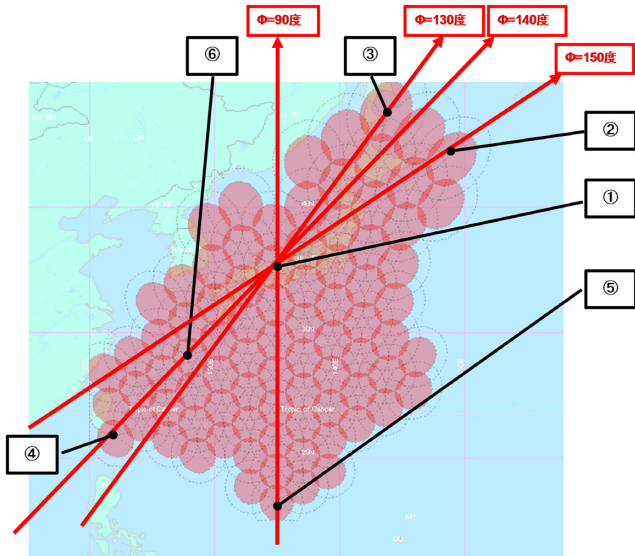
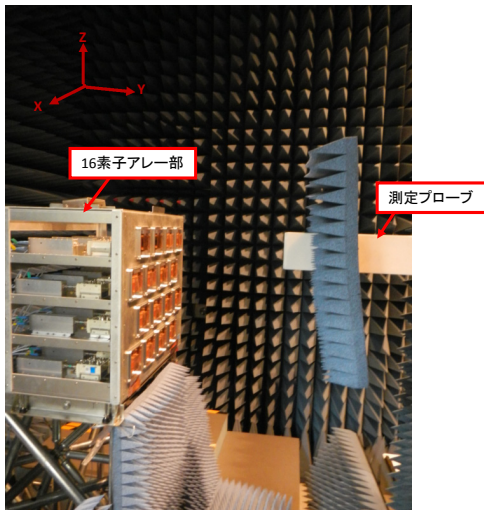


図 11 ビーム配置とビームのカット面

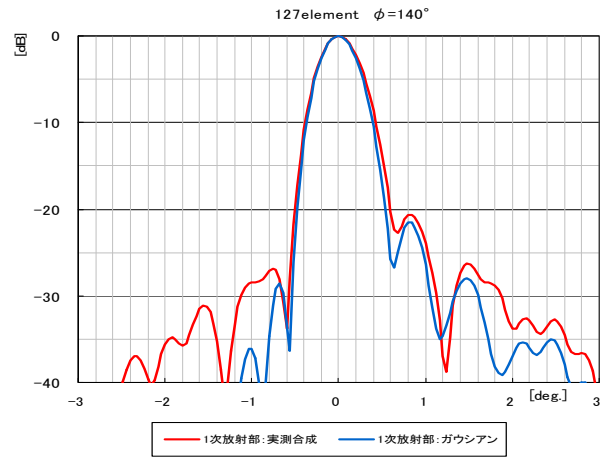


受信DBF/DCIは暗室外に設置

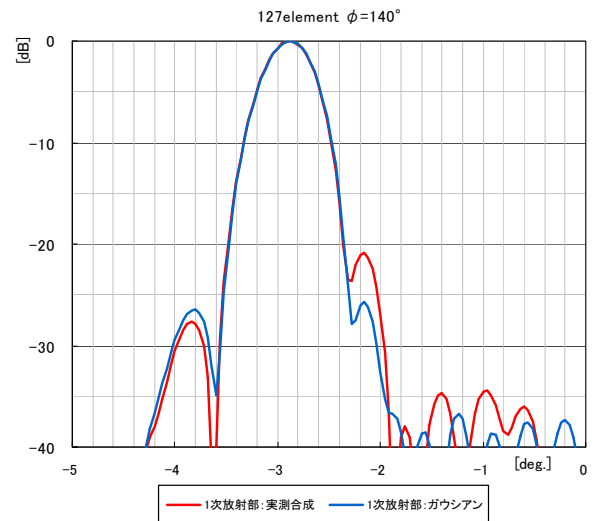
図 12 サブアレーパターン測定風景

で、赤枠が DBF / チャネライザで緑枠が測定設備機器である。検討したビームは図 2、3 で示した 6 ビームである。図 11 に検討しているビーム配置と着目するビームの位置及びビームのカット方向を示す。図 12 は NFM 装置でサブアレーのパターンを測定している様子を示している。

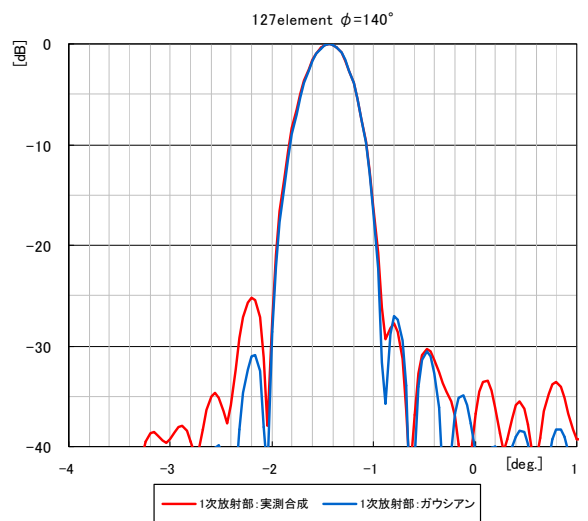
図 13 に測定結果と計算結果の比較を示す。ここではビーム①、④、⑥の $\phi=140^\circ$ 方向のカット面の結果について示す。青線が計算値で、赤線が測定結果を示す。メインビームは計算値と測定値が良く合っている。またサイドローブについても -20 dB 以下でもほぼ合っており、ビームが形成できている。本実験結果から DBF / チャネライザが 127 素子の励振ウェイトを設定できることを確認した。



(a) Beam ①のカットパターン



(b) Beam ④のカットパターン



(c) Beam ⑥のカットパターン

図 13 2次放射パターン評価結果

3.2 超マルチビーム形成機能確認実験

DBF／チャネライザが100ビームクラスのビームを形成できる機能を確認するために16素子アレー給電部とメッシュ反射鏡を組み合わせ、DBF／チャネライザのチャネライザ機能を用いて京都大学のアンテナ測定設備を利用して実験を行った。測定系構成を図14に示す。設備はプレーンポラニアフィールド装置であるため天井にプローブがついて1軸に駆動し、床面の設置されたアンテナを回転させてスキャンする。この装置は周波数を高速に切り替えて測定することで1回のスキャンで多周波同時測定ができる機能を有している。この機能を利用して、1回の測定で最大7周波数の測定を実施した。実際の測定系構成の外観を図15に示す。

測定は実際にDBF／チャネライザのDBF係数を変えて異なったアレーの励振ウェイト与えて100ビーム相当のパターン測定を実施した。図16にビームの配置を示す。○はビーム位置を示しており、○の内部の数字はビーム番号を示している。ビームはb001～b100までの赤枠で囲まれた領域の円、○の色は周

波数を示し、7周波数、7ビームを同時測定している。ビーム間隔は0.35°としている。図17にアンテナのパラメータを示す。

給電部位置は図の焦点位置から反射鏡中心方向に向かって1.0mオフセットさせて配置している。

測定結果を図18に示す。測定結果から想定されたビーム位置とほぼあっている結果が得られている。図の縦軸の振幅の値は、間隔0.35°でビームを配置しており、開口3.3mφのアンテナではビーム幅は広すぎるため、見やすくするために、1dBの損失までを拡大して示している。見る角度は図16に示す30°方向

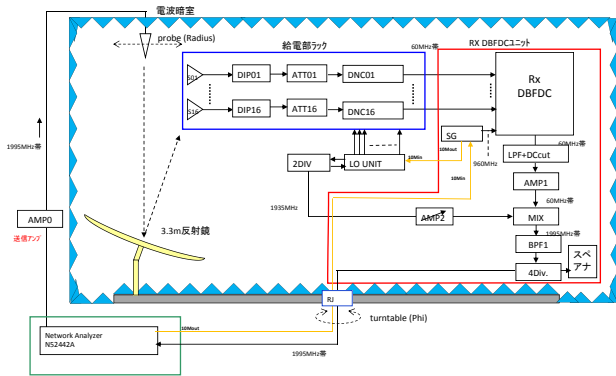


図14 超マルチビーム形成機能実験系統図

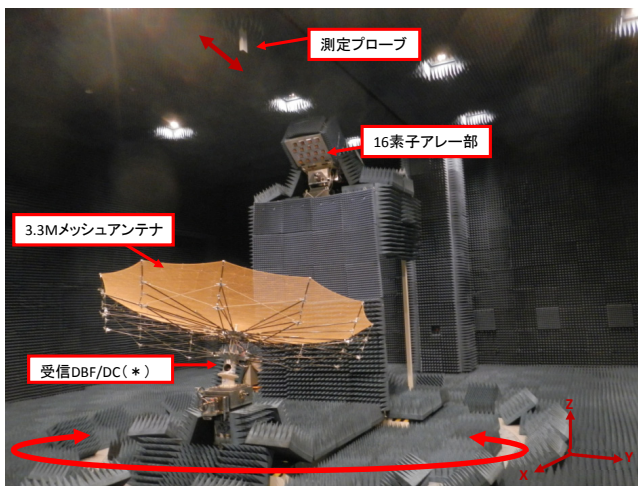


図15 超マルチビーム形成機能実験風景

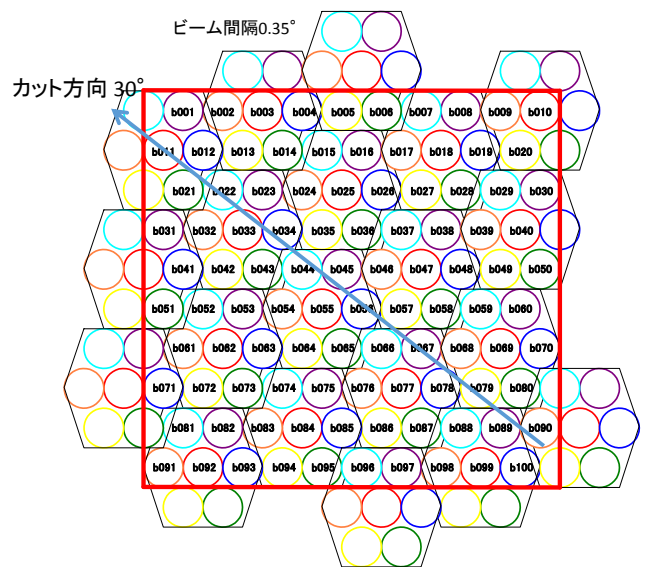


図16 測定したビーム配置とカット面

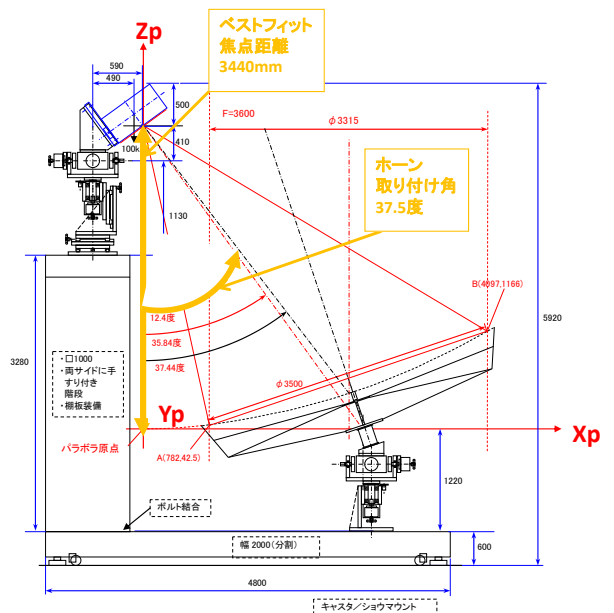


図17 測定したアンテナの外観とパラメータ

で選択したビームカットを図 18 に示している。選択したビームのうち、カットパターンを計算値との比較のため Beam11, 22, 79 についてサイドローブを含めて比較評価を行った結果を図 19 に示す。ほぼサイドローブについても合っており、所望の励振ウェイトが設定できていることがわかった。他のビームについてもほぼ同様の結果が得られており、開発した DBF / チャネライザがビーム数 100 クラスのビームを形成で

きることが確かめられた。

4 まとめ

開発した DBF / チャネライザを用いて 100 素子・100 ビームの機能確認を実験により行った。その結果 DBF / チャネライザが 100 素子に対応してビームを形成できること、並びに 100 ビームを同時に形成できる機能を有することが確認された。今後はさらに搭載化をめざし、小型化、低消費電力化を考慮しつつ、広帯域化を検討していく予定である。

謝辞

本研究にあたり、京都大学 生存圏研究所の高度マイクロ波エネルギー伝送装置の設備を利用させていただいた、篠原先生、三谷先生をはじめ関係各位に感謝する。

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の研究開発」により実施した。関係各位に感謝する。

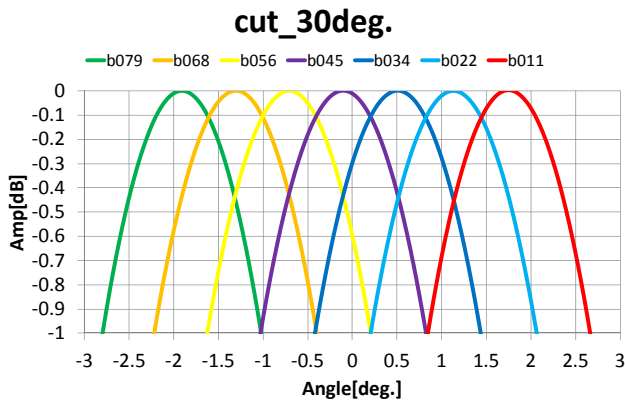
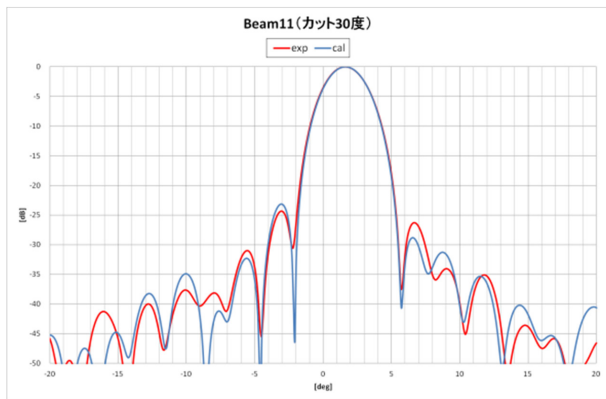
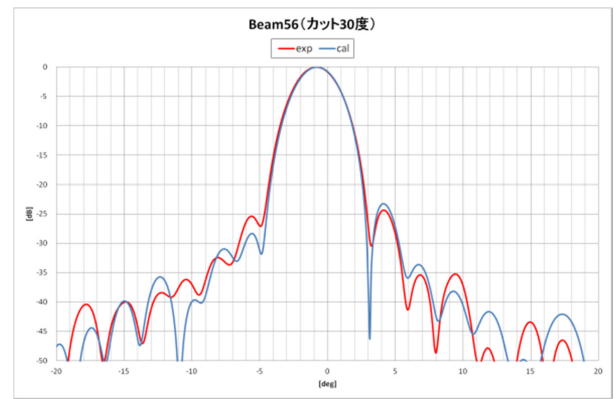


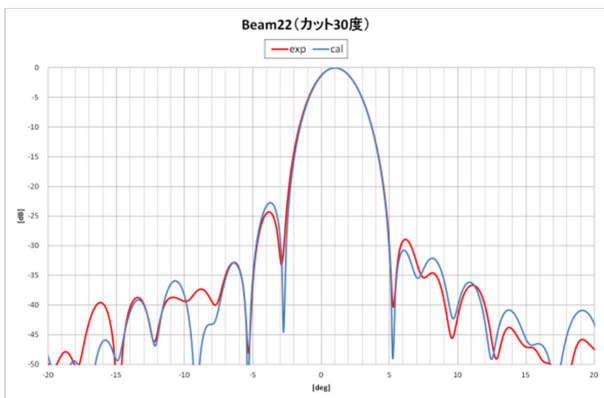
図 18 パターン測定結果 ビームとビーム位置 カット角 30°



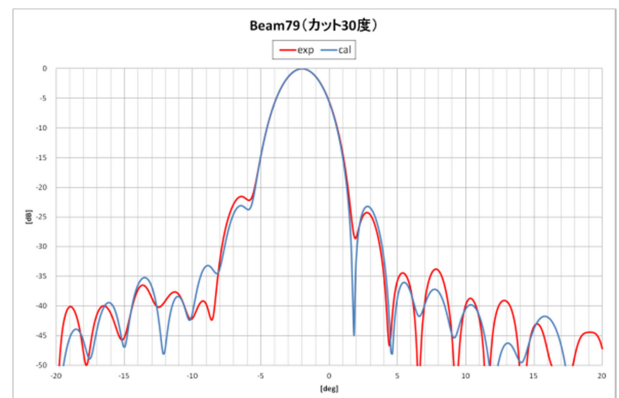
(a) Beam11



(c) Beam56



(b) Beam22



(d) Beam79

図 19 パターン測定結果 カット角 30°の放射パターン

【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,” 信学論 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 pp344-352, 2011-3.
- 3 織笠光明, 佐藤正樹, 山本伸一, 川崎和義, 藤野義之, “大型反射鏡アンテナの放射パターン補正実験,” 情報通信研究機構研究報告, Vol.60, No.1, pp73-85, 2014.
- 4 T. Orikasa, Y. Fujino, M. Satoh, and H. Tsuji, “Measurement experiment and evaluation of radiation patterns of the mesh reflector antenna mounted on communication satellite for hybrid mobile communication system,” 63rd International Astronautical Congress, IAC-12-B2.2.6, Oct. 2012.
- 5 織笠光明, 藤野義之, 辻宏之, “地上衛星共用携帯電話システム用搭載アンテナの反射鏡と DBF/チャネライザ組み合わせ試験,” 電子情報通信学会無線電力伝送研究会, WPT-2012-45, May 2013.



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)

東洋大学理工学部電気電子情報工学科教授／
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
(～2013年4月)
博士(工学)
衛星通信、アンテナ、無線電力伝送