

衛星放送受信用リフレクトアレーアンテナ

吉田 幸弘[†] 岡田 幸祐[†] 佐々木秀輔[†] 牧野 滋[†] 別段 信一[†]
伊東 健治[†] 野口 啓介[†] 廣田 哲夫[†] 高橋 徹^{††}

[†] 金沢工業大学 〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

^{††} 三菱電機株式会社情報技術総合研究所 〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1

E-mail: [†y.yoshida@venus.kanazawa-it.ac.jp](mailto:y.yoshida@venus.kanazawa-it.ac.jp)

あらまし 本稿では、ほぼ最適な厚さの誘電体基板を用い、各共振素子の大きさの決定において入射角及び入射偏波を考慮し設計した。設計の妥当性を確認するために、衛星放送受信用として試作したアンテナを市販のパラボラアンテナと比較したところ利得差が小さく、受信映像も良好であった。その結果、共振素子の形状が単純なリング型でも共振素子の大きさを変化させるだけで十分な反射位相の制御が可能であることを示した、また今回の測定においては、測定環境、測定設備が無かったため放送衛星からの受信電波を用いて簡易的に測定した。今後は測定設備の整った環境でアンテナの利得及び放射特性を評価する必要がある。

キーワード リフレクトアレー, アンテナ, 衛星放送, 共振素子, 入射角

Reflect-array Antenna for Receiving of Satellite Broadcasting

Yukihiro YOSHIDA[†], Kosuke OKADA[†], Shusuke SASAKI[†], Shigeru MAKINO[†], Sin-ichi BETSUDAN[†], Kenji ITOH[†], Kesuke NOGUCHI[†], Tetsuo HIROTA[†], and Toru TAKAHASHI^{††}

[†] Kanazawa Institute of Technology Ogigaoka,7-1,Nonoichi-machi,Ishikawa-gun, Ishikawa,921-8501 Japan

^{††} Information Technology R&D Center,Mitsubishi Electric Corporation Ofuna,5-1,Kamakura,Kanagawa, 247-8501 Japan

E-mail: [†y.yoshida@venus.kanazawa-it.ac.jp](mailto:y.yoshida@venus.kanazawa-it.ac.jp)

Abstract In design of a reflectarray antenna, we considered the thickness of a dielectric substrate and an incident angle on the reflectarray surface. In the result, even if shapes of the resonant elements are simple ring type, the reflection phases can be controlled only by varying the size of resonant elements. To verify the design method, we manufactured and measured a reflectarray antenna model for receiving of satellite broadcasting. And compared the received RF level with parabola antenna of the marketing product. The difference of the received level was small and the received vision was good. As a result, the proposed design method was confirmed to be adequate.

Key words Reflectarray,antenna,Satellite broadcasting,Resonate element,Incident angle

1. ま え が き

現在、衛星搭載用の大型展開アンテナとしては、主にパラボラ型アンテナが用いられている。しかし、パラボラ型アンテナは曲面反射鏡で形成されるため、展開構造が非常に複雑である。そのため、宇宙での展開の信頼性を向上させることが重要となる。その方法の一つとして、リフレクトアレーアンテナと呼ばれる技術を用いて鏡面を平面化し展開構造を簡単化する方法がある。リフレクトアレーは、FSR(Frequency Selective Reflector:周波数選択板)[1]に誘電体を介して金属板を装荷したものである。共振素子の位置によってその大きさ、形状を変化

させることにより、平面でもパラボラアンテナと同等の性能を実現できるものである。従来のリフレクトアレーアンテナの設計においては、共振素子の大きさや形状を決定する際に入射角や偏波を考慮しておらず、共振素子の形状も複雑であった[2]。また、入射角が変化したときの共振素子の特性を考慮している文献もあるが、各共振素子の入射角を考慮せず設計している[3]。

本稿では、共振素子の形状がスロットリング[4]や2重リング[5]に比べ単純なリング型であっても、その大きさを変化させるだけで十分な反射位相の制御が可能であることを示す。また、入射角と偏波を考慮すると、誘電体の厚さに最適値がある

ことを明らかにする．最適な厚さの誘電体基板を用い，入射角及び入射偏波を考慮して共振素子の大きさを決定した衛星放送受信用リフレクタレーアンテナを設計，試作し，市販のパラボラアンテナと比較することにより設計法の妥当性を確認した．

2. 設計法

2.1 入射角 θ, ϕ 所望の反射位相 Φ の導出

図 1 にリフレクタレーアンテナの外観を示す．これは一次放射器から鏡面に空間給電するアンテナである．図 2 に座標系と記号を示す．一次放射器 O を原点とし，アンテナから放射されるビーム方向を z 軸，紙面に垂直な方向を y 軸， x 軸は yz 平面に直交する方向とする． x 軸， y 軸， z 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ i, j, k とする．また，鏡面の中心を P とする．そのときの鏡面を構成する平面の法線方向を z' 軸，紙面に垂直な方向を y' 軸， y' z' 平面に直交する方向を x' 軸とし鏡面の座標系とする．そして， x' 軸， y' 軸， z' 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ i', j', k' とする． P' は共振素子の位置を表しており，位置ベクトル P' は式 (1) で与えられる．

$$P' = P + mdi' + ndj' = |P'|v \quad (1)$$

ここで P は鏡面の中心の位置ベクトル， d は共振素子の間隔， m, n は整数である．このとき，各共振素子に対する入射角 θ, ϕ は式 (2) に示すように P' の単位ベクトル v の極座標表示であり，式 (3)，式 (4) より求めることができる．

$$v = \sin\theta\cos\phi i' + \sin\theta\sin\phi j' + \cos\theta k' \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1}(k' \cdot v) \quad (3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{v \cdot j'}{v \cdot i'} \quad (4)$$

また，点 P' の共振素子における所望の反射位相 Φ は z 軸に垂直な平面波をつくるための光路長一定の条件により式 (5) のように導出できる．

$$\Phi = k(|P'| - P' \cdot k) + C \quad (5)$$

2.2 設計パラメータの決定法

図 3 に設計パラメータを示す．(a) にリフレクタレーアンテナの正面図，(b) に断面図，(c) に共振素子を示す．リフレクタレーアンテナにおいて，すべての共振素子に共通の設計パラメータは，誘電体の厚さ l ，共振素子の素子間隔 d ，比誘電率 ϵ_r ，リングの幅 w の 4 つである．これに対して各共振素子に固有の設計パラメータは半径 r である．共通の設計パラメータは，共振素子の半径 r を変化させたとき，設計に必要なすべての入射角 θ に対して， $0 \sim 360 \text{deg}$ の任意の反射位相が実現できるように決める必要がある．また，リフレクタレーアンテナにいかなる偏波が入射されても対応できるように設計するため，TM，TE 波を考慮して設計する必要がある．

図 4 にリングの半径の変化に対する反射位相の一例を示す．周波数 $f=12.0 \text{GHz}$ ，素子間隔 $d=13.0 \text{mm}$ ，誘電体の厚さ

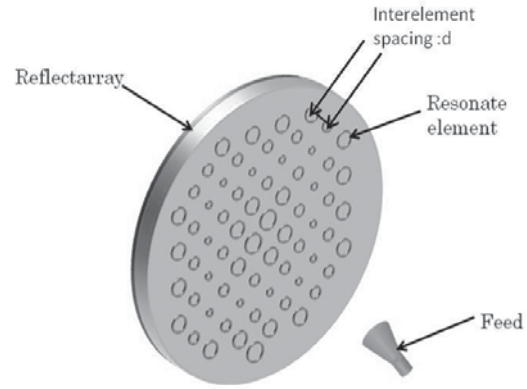


図 1 リフレクタレーアンテナの外観
Fig. 1 Reflectarray antenna.

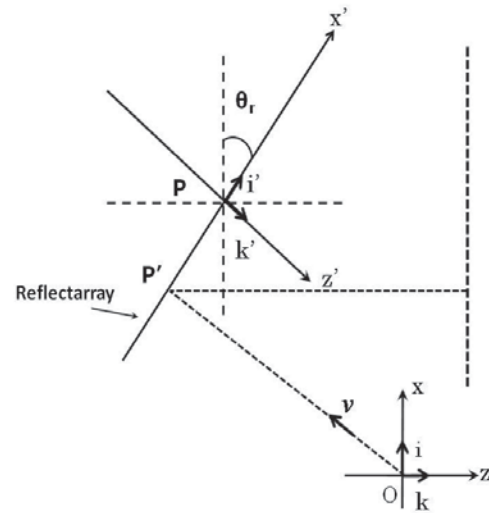


図 2 座標系と記号
Fig. 2 Coordinat system and symbols.

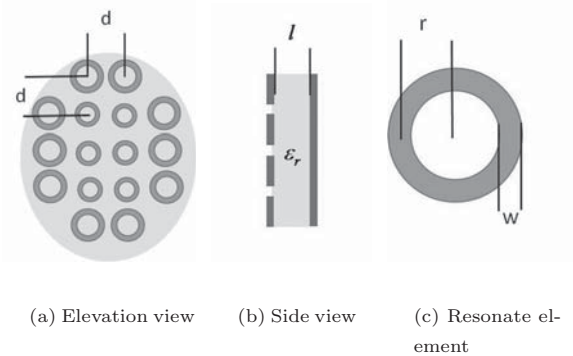


図 3 設計パラメータ
Fig. 3 Design parameters.

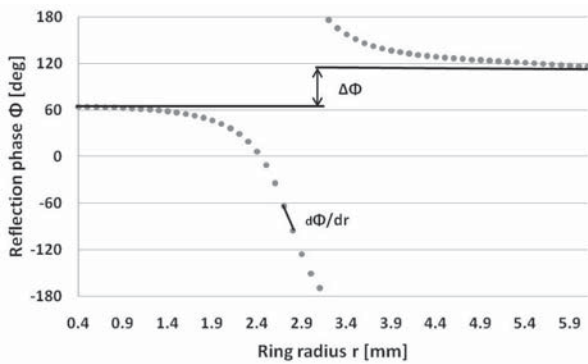


図4 リングの半径 r の変化に対する反射位相 Φ (入射角 $\theta=0\text{deg}$)
 Fig.4 Reflection phase Φ vs. Ring radius r (Incident angle $\theta=0\text{deg}$).

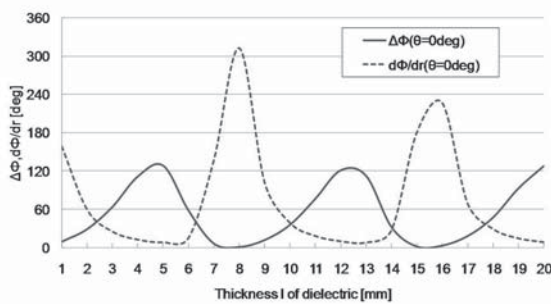


図5 誘電体の厚さ l に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ (入射角 $\theta=0\text{deg}$)
 Fig.5 $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ vs. Thickness l of dielectric substrate (Incident angle = 0deg).

$l=3.0\text{mm}$, 比誘電率 $\epsilon_r=2.65$, リング幅 $w=0.4\text{mm}$, 入射角 $\theta=0\text{deg}$ とし, リングの半径 r を 0.4mm から 6.1mm まで変化させた時の反射位相の変化を示している. 図4より, リングの半径 r を変化させたとき約 $60\sim 120\text{deg}$ までの 60deg は実現できない反射位相であり, これを $\Delta\Phi$ と表わす. また, リフレクタレーアンテナを製作する際の精度を考慮し, リングの半径 r が 0.1mm 変化したときの最大位相変化量を $d\Phi/dr$ と表わす. 図4では約 30deg である. この $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ を評価パラメータとする. 2つの評価パラメータは, ともに小さい値が望ましい.

図5に誘電体の厚さの変化に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ の一例を示す. 周波数 $f=12.0\text{GHz}$, 素子間隔 $d=13.0\text{mm}$, 比誘電率 $\epsilon_r=2.65$, リング幅 $w=1.0\text{mm}$, 入射角 $\theta=0\text{deg}$ のとき誘電体の厚さ l を $1.0\text{mm}\sim 20.0\text{mm}$ まで変化させたときの $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ である. 図より, 誘電体の厚さ l が変化すると $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ が変化していることがわかる. また, $\Delta\Phi$ と $d\Phi/dr$ はトレードオフの関係にあることがわかる. よって, $\Delta\Phi$ と $d\Phi/dr$ の交わる点が最適な誘電体の厚さ l となる.

3. 衛星放送受信用リフレクタレーアンテナの設計

3.1 設計パラメータ

本設計では衛星放送受信用アンテナであるマスプロ電気(株)製 BS・110度CSアンテナ BSC45Rの鏡面を取り替えて使用

表1 設計パラメータ
 Table 1 design parameter.

設計パラメータ	
Frequency f	12.0GHz
Relative permittivity ϵ_r	2.65
Thickness of dielectric substrate l	3.2mm
Element d	13.0mm
Center of mirror surface (x,y,z)	(224.7,0,-127.5)
Gradient of mirror surface θ_r	30.7deg
Ring width w	0.4mm

することを想定して, リフレクタレーアンテナを設計した. そのとき, 反射鏡の大きさは, 長径 494mm , 短径 442mm の楕円となる. 鏡面の中心 $P(x, z)=(224.7,-127.5)$ となり鏡面の傾き $\theta_r=30.7\text{deg}$ となる. また, 衛星放送受信用アンテナへの適用を想定して周波数 $f=12.0\text{GHz}$ としている.

2章に沿って設計を行った. 解析方法はモーメント法を使用し, 解析プログラムは研究室で自作したリフレクタレーアンテナ専用解析プログラムを使用した.

3.2 共通パラメータの設計

図6に, TE波およびTM波に対して入射角 $\theta_0\sim 60\text{deg}$ を考慮したときの $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ を示す. なお, 本鏡面系においては入射角 θ の最大値は約 59.3deg である. 図6より, 誘電体の厚さ l は約 2.8mm のときが最適値であることがわかる. しかし, 誘電体基板の入手性を考慮し, 厚さ 3.2mm , 比誘電率が 2.65 の誘電体基板(パナソニック電気 ガラスフッ素樹脂銅張積層板)を使用することとした.

図7に, 誘電体の厚さ l が 2.8mm および 3.2mm としたとき, 素子間隔 d の変化に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ ときの最大値を示す. 図より, 誘電体の厚さ l を 3.2mm とすることにより $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ が $20\text{deg}\sim 30\text{deg}$ 劣化することがわかる. また, 素子間隔 d が大きくなると $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ が小さくなることがわかる. 一方, グレーティングロブが発生しないための条件が式(6)であり, 素子間隔 d は 13.4mm 以下である必要がある. 製作誤差を考慮し, 素子間隔 d は 13.0mm とした.

$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{1 + \sin\theta} \quad (6)$$

図8にリング幅 w の変化に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ の最大値を示す. 図6, 図7より最適化した誘電体の厚さ $l=3.2\text{mm}$, 比誘電率 $\epsilon_r=2.65$, 素子間隔 $d=13.0\text{mm}$ を固定し, リング幅 w に対する特性を解析した図8より, リング幅 w は 0.4mm が最適値であることがわかる.

表1にリフレクタレーアンテナの設計パラメータを示す.

3.3 共振素子 r の大きさの設計

すべての座標配置における共振素子の大きさを求める. 衛星放送受信用であるため円偏波にて設計した. すべての座標において入射角を考慮して TE, TM波それぞれの複素反射係数 R_{TA}^{TA} を解析した. TAは入射偏波, TBは反射偏波でありそれ

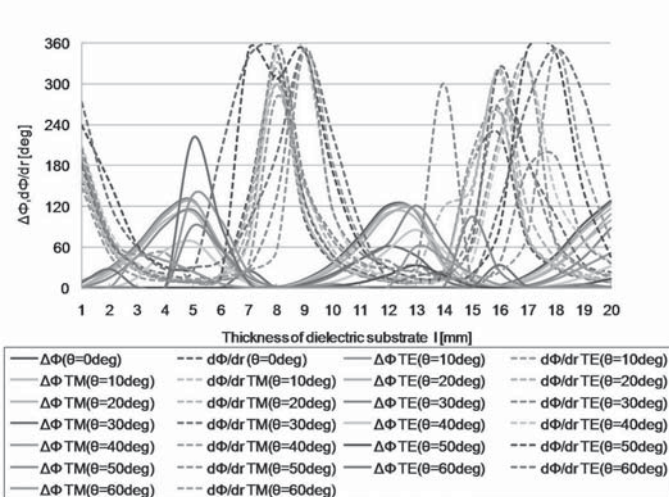


図6 誘電体の厚さ l の変化に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ (入射角 $\theta=0 \sim 60\text{deg}$)
 Fig. 6 $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ vs. Thickness l of dielectric substrate (incident angle $\theta=0 \sim 60\text{deg}$).

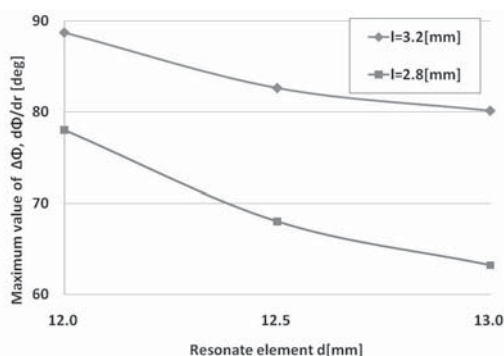


図7 素子間隔 d の変化に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ の最大値
 Fig. 7 Maximum value of $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ vs. Element spaced.

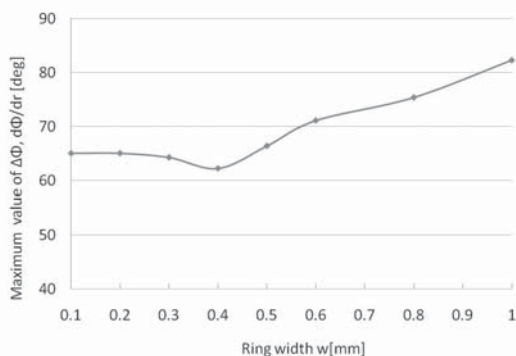


図8 リング幅 w の変化に対する $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ の最大値
 Fig. 8 Maximum value of $\Delta\Phi, d\Phi/dr$ vs. Ring width w .

ぞれ TE, TM を表す. この複素反射係数 R_{TA}^{TE} を円偏波の複素反射係数にし, 反射位相求める. なお, 式 (7) は主偏波 R_{co} , 式 (8) は交差偏波 R_{cr} の式である.

$$R_{co} = \frac{1}{2}((R_{TM}^{TM} + R_{TE}^{TE}) - j(R_{TM}^{TE} - R_{TE}^{TM})) \quad (7)$$

$$R_{cr} = \frac{1}{2}((R_{TM}^{TM} - R_{TE}^{TE}) - j(R_{TM}^{TE} + R_{TE}^{TM})) \quad (8)$$

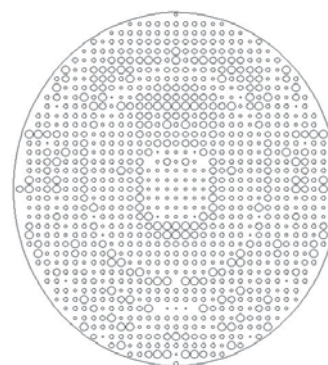


図9 設計した共振素子の配置

Fig. 9 Arrangement of designed resonant elements.

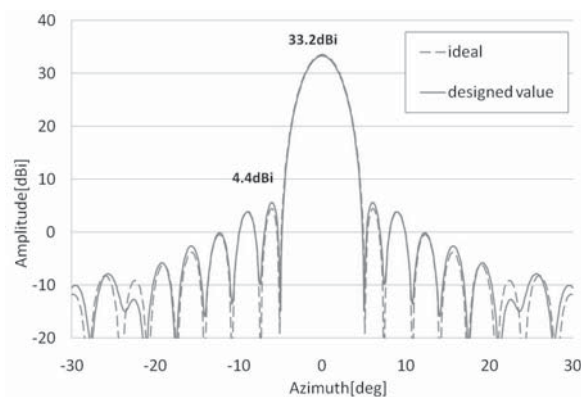


図10 12.0GHzにおける放射パターン

Fig. 10 Calculated radiation patterns (12GHz).

図9に設計した共振素子の配置を示す. 図9はすべての座標配置において式(7)より, 共振素子の大きさを变化させたときの反射位相を求め, 理想の反射位相となるよう挿し設計した.

3.4 放射特性計算結果

共振素子各点での12.0GHzにおける反射位相を求め, 電流分布法により計算した放射パターンを図10に示す. ただし, 一次放射器の諸元が不明であったため一次放射器の放射パターンを $\cos^m \theta_p$ と仮定した. ここで θ_p は, 一次放射器の中心軸と単位ベクトル v とのなす角である. 利得が33.2dBあり, 主ローブを基準にしたサイドローブレベルの最大値は-29.4dBで低サイドローブを実現している. 図11に12GHzにおける開口面上の位相分布を示す. 図11では, ほぼすべての開口面上において $\pm 45\text{deg}$ 以内の位相差を現した.

4. 試作評価

4.1 リフレクタレーアンテナの測定方法

図12にパラボラアンテナと試作したリフレクタレーアンテナを示し, 図13に測定系を示す. 設計したリフレクタレーアンテナを試作し, BSC45Rと比較した. 試作したリフレクタレーアンテナの一次放射器にはBSC45Rについているもの

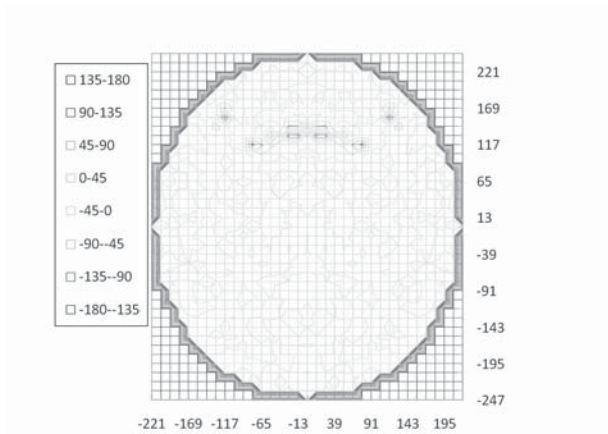


図 11 12.0GHz における開口面上の位相分布
Fig. 11 Calculated phase distribution (12GHz).



図 12 パラボラアンテナと試作したリフレクタレーアンテナ
Fig. 12 Manufactured reflectarray and parabola antenna of marketing product.

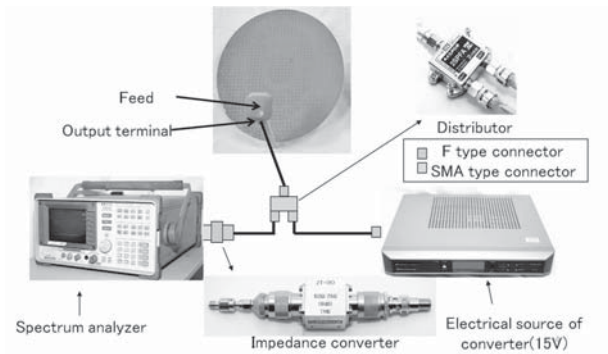


図 13 測定系
Fig. 13 Measurement system.

を使用した。また測定には、スペクトラムアナライザーを用い、同じケーブルを切り替えることにより両アンテナを比較した。

4.2 リフレクタレーアンテナの測定結果

図 14 にスペクトラムアナライザーによる受信レベル比較を示す。スペクトラムアナライザーの受信帯域は BS-IF、CS-IF 中心周波数を受信帯域とした。BS チャンネルの受信レベルは放送波の変動が激しいため 3 度計測を行い、その受信レベルの

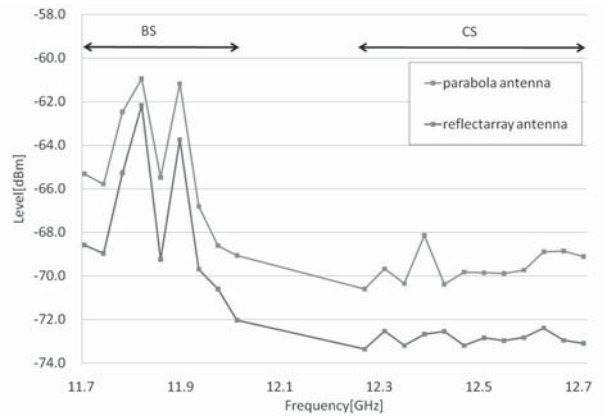


図 14 受信レベル比較
Fig. 14 Comparison of received RF level.

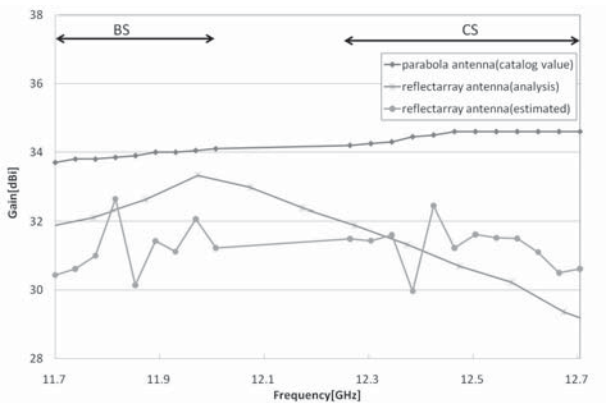


図 15 利得比較
Fig. 15 Comparison of estimated antenna gain.

平均値を示した。図 14 よりリフレクタレーアンテナとパラボラアンテナの受信レベル差を求め、その値をパラボラアンテナの利得(カタログ値)より引くことでリフレクタレーアンテナの利得を推定した。図 15 にこうして求めた利得を示す。図 15 より、設計値である 12.0GHz の利得は約 2.0dB の差異がみられた。一方、最大利得が得られる周波数は約 11.8GHz となり、約 0.2GHz 低い方にシフトした。また、CS チャンネルの場合、利得の理論値は低下しているが、測定値はあまり低下しない結果となった。

5. むすび

本稿では、ほぼ最適な厚さの誘電体基板を用い、各共振素子の大きさの決定において入射角及び入射偏波を考慮し設計した。設計の妥当性を確認するために、衛星放送受信用として試作したアンテナを市販のパラボラアンテナと比較したところ利得差が小さく、受信映像も良好であった。その結果、共振素子の形状が単純なリング型でも、共振素子の大きさを変化させるだけで十分な反射位相の制御が可能であることを示した。また、今回の測定においては、測定環境、測定設備が無かったため放送衛星からの受信電波を用いて簡易的に測定した。今後は測定設備の整った環境でアンテナの利得及び放射特性を評価する必要

がある。

文 献

- [1] 佐藤他, “ 方形金属格子による準光学分波器, ”信学論 (B) , Vol.J-67-B, No.4, pp.447-454, Apr. 1987.
- [2] 井戸川 貴志, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, 高木 信雄, “ 単層マイクロストリップオフセットリフレクタレーの簡易設計, ” 信学論 (B), Vol.189-C, No.5, pp.321-328, May 2006.
- [3] Hiroyuki Deguchi, Nobuo Takagi, Mikio Tsuji and Hiroshi Shigesawa, “ Microstrip reflectarray with offset feed for improving effective aperture area, ”IEEE Int. Symp. Antennas Propagat., Vol. 3, pp.290-293, June 2003.
- [4] Alexander E. Martynyuk, Jose I. Martinez Lopez, and Ninel A. Martynyuk, “ Spiraphase-Type Reflectarrays Based on Loaded Ring Slot Resonators, ”IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 52, No.1, pp.142-152, Jan. 2004
- [5] C. Han, S. Hsu, K.Chang and J.Huang, “ A Ku/Ka-Dual Band Reflectarray to Emulate a Cylindrical Reflector for Titan Cloud Precipitation Radar and Altimeter, ”IEEE Int. Symp. Antennas Propagat., pp. 1445-1448, Jun. 2007
- [6] D.M.Pozar, S.D.Targonski, H.D.Syrigos, “ Design of millimeter wave Microstrip Reflectarrays, ”IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol.45, pp.287-296, Feb.1997.
- [7] John Huang, José A.Encinar, “ Reflectarray Antennas, ”Wiley, New Jersey, 2007.