

# Linearly Polarized Reflectarray and Circular-Polarization Conversion Reflectarray Suppressing Beam Shift

Hiroki YAMADA,\* Kotaro SAKAGAWA,\* Hiroyuki DEGUCHI,\* and Mikio TSUJI\*

(Received January 16, 2023)

We propose here a design method in which the beam shift of the main lobe radiated from a reflectarray can be suppressed within the specified frequency band. To realize the uniform phase distribution on the aperture plane, the resonant-conductor shape of each element with phase property depending on both the frequency and the position on the reflectarray plane is individually designed by the GA-optimized method. By using the optimized elements, two kinds of the reflectarray for a linearly polarized wave and with conversion into a circularly-polarized wave are constructed, and the beam shift characteristics are investigated numerically and experimentally.

**Key words** : Reflectarray, beam shift, circular polarization conversion, resonant element, genetic algorithm.

**キーワード** : リフレクトアレー, ビームシフト, 円偏波変換, 共振素子, 遺伝的アルゴリズム.

## ビームシフトを抑制する直線偏波及び円偏波変換リフレクトアレー

山田 裕貴, 坂川 幸太郎, 出口 博之, 辻 幹男

### 1. はじめに

リフレクトアレーとは反射鏡アンテナの一種であり、地導体と誘電体の基板上に配列された共振素子により構成され、その共振素子の反射位相量によって開口面上の位相量を制御し、任意の方向にビームを反射するアンテナである<sup>1-3)</sup>。反射鏡アンテナでよく用いられているパラボラアンテナとは違い、平面構造という簡単な構造で開口面アンテナを構成でき<sup>4, 5)</sup>、幅広い応用が期待されている<sup>6-9)</sup>。また、偏波面の設定が不要な円偏波も用いられていることから、一次放射器から入射した直線偏波を円偏波に変換して放射する偏波変換素子について報告され<sup>10, 11)</sup>、筆者らも $\Omega$ 型素子を用いた直交偏波共用素子<sup>12, 13)</sup>、偏波変換素子<sup>14, 15)</sup>を提案している。また、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用い

た任意形状素子の最適化手法<sup>16, 17)</sup>により、直線偏波素子<sup>18, 19)</sup>や偏波変換素子<sup>20)</sup>を提案してきた。しかしながら、リフレクトアレーは素子の共振現象を利用しているため、狭帯域特性となる欠点があり、これに対しては、複数の共振現象を利用した広帯域化<sup>21-23)</sup>、さらに広帯域な交差偏波成分の低減<sup>24, 25)</sup>について検討してきた。そのとき、オフセット給電リフレクトアレーにおいて鏡面反射方向以外の方向、例えばリフレクトアレーに垂直な方向に主ビームを形成する場合、周波数の変化に伴い主ビーム方向のビームシフトが発生する<sup>20, 26)</sup>。

そこで本論文では、リフレクトアレー開口面に配列される共振素子の最適化設計において、設計周波数以外にも開口面の位相分布を一様にするように、素子に与える反射位相特性の目標値を開口面上の各座標ごとに与え、設計帯域内において周波数変化に伴うビームシフトを抑

\* Department of Electronics, Doshisha University, Kyoto  
Telephone: +81-774-65-6371, E-mail: {hdeguch, mtsuji}@mail.doshisha.ac.jp

制する素子の設計を行う。加えて、ビームシフトを抑制しつつ直線偏波を円偏波に変換する素子の設計も行う。そして、それぞれ設計した素子を用いてX帯でオフセット給電リフレクトアレーの試作、測定を行い、提案した設計手法の有効性について評価を行う。

## 2. 設計法

### 2.1. 遺伝的アルゴリズム (GA) による設計手法

任意形状素子を用いたリフレクトアレーアンテナの基本的な構造を Fig. 1 に示す。同図に示すように、その構造は共振素子が配列された誘電体基板と地導体から構成される。共振素子の反射特性の解析は、素子単体が無限に周期配列されている場合を想定し、モーメント法を用いて行う。共振素子は Fig. 2 に示すように、単位セルの形状を  $16 \times 16$  のサブセルにより表現する。このように任意の素子形状を格子状に分割し、未知電流分布を基底関数を用いて展開することにより導体上の電流分布が定められ、共振素子の反射特性が決定される。

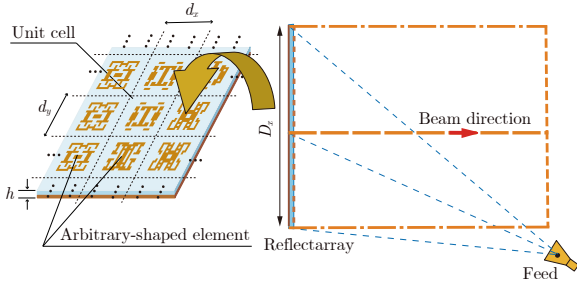


Fig. 1. Basic geometry of offset reflectarray antenna using arbitrarily-shaped elements.

また、形状は離散値で表せることから、最適化手法として GA を採用する。GA 設計においては、導体が存

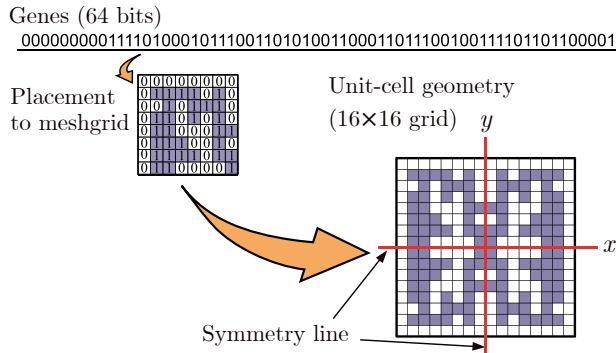


Fig. 2. Unit cell for GA design with symmetry about both  $x$  and  $y$  axes.

在するサブセルには”1”，そうでない場合には”0”をもって表す。得られたバイナリデータを最適化変数として扱うが、最適化対象は単位セルの  $1/4$  領域のみとし、他の領域に対しては  $x$  軸と  $y$  軸に関して対称となるものを配置する。これにより、対称構造による低交差偏波性の実現と GA における探索領域の低減を行う。そのようにして得られた最適化変数に対して、選択、交叉、突然変異を実行していくことにより素子形状の最適化を行うこととする。しかし、GA によって得られた素子形状の中には、実際の製作において実現不可能な導体接点を持つ形状も生成され得るため、それを除去する形状整形法 (Geometry Refinement Method, GRM) を適用する<sup>16)</sup>。次に、素子の位相特性の評価には、以下に示す適合度関数を用いる。

$$fitness = F_1 + F_2 + \dots + F_n \quad (1)$$

ここで、 $F_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) は、

$$F_i = \begin{cases} |P_i - P(f_i)| & (|P_i - P(f_i)| > \alpha) \\ 0 & (|P_i - P(f_i)| \leq \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $P_i, P(f_i)$  はそれぞれ、 $i$  番目の周波数点における反射位相量の設計目標値および計算値であり、 $\alpha$  は設計における裕度とする。上式より所定の周波数点において設計目標値を満足した場合、適合度が 0 となり、その際の解を設計値とする。なお直線偏波の設計に関して、簡易な方法として TE 入射時のみを考えることにする。

また、円偏波変換を実現する素子の設計を行う際には、上記の適合度関数に TM 入射での目標値として、その素子が持つ TE 入射での反射位相量に対して  $90^\circ$  遅らせたものを新たに加える。以下にその式を示す。なお、式 (4)、式 (5) においては、式 (2) 同様に設計目標値を満たした場合は適合度を 0 とする。

$$F_i = F_{TEi} + F_{TMi} \quad (3)$$

$$F_{TEi} = |P_{TEi} - P_{TE}(f_i)| \quad (4)$$

$$F_{TMi} = |P_{TE}(f_i) - 90 - P_{TM}(f_i)| \quad (5)$$

### 2.2. ビームシフトを抑制する素子

リフレクトアレーでは、鏡面反射方向以外に主ビームを形成する場合、周波数変化に伴う電気長の違いによりビームシフトが発生する。これまで提案してきたリフレクトアレー<sup>26)</sup>の放射特性の計算結果では、8 GHz~12 GHz の周波数帯域において、 $-6.8^\circ \sim 5.3^\circ$  の範囲で主

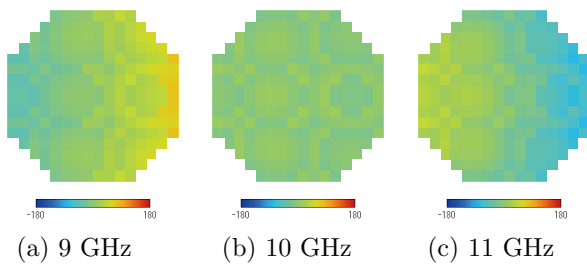


Fig. 3. Aperture phase distribution of reflected wave for conventional reflectarray.

ビーム方向のビームシフトが発生している。なお、計算には開口面法<sup>29)</sup>を用いている。Figure 3 に示すように、設計周波数である 10 GHz においては開口面上の位相分布は一様となっており、設計方向である  $0^\circ$  方向に主ビームが形成されていたが、それ以外の周波数では、開口面の左端から右端にかけて徐々に位相が変化し、一様な分布が実現できておらず、ビームシフトが発生していた。また、周波数が設計周波数から離れるにつれて開

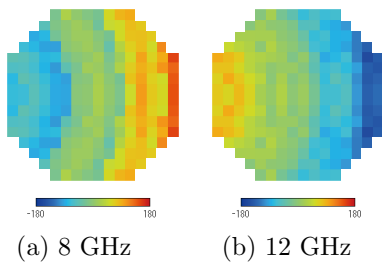


Fig. 4. Aperture phase distribution of reflected wave for conventional reflectarray at lower and higher frequencies.

口面両端の位相差は広がり、ビームシフトは大きくなっていく (Fig. 4 参照)。

正面方向に主ビームを形成するリフレクタレーにおいて、ビームシフトを発生させないためには、設計帯域内の全ての周波数で開口面の反射位相分布を一様にする必要がある。そこで、本論文で設計するリフレクタレーでは、従来のものとは異なり、共振素子の設計を開口面上の配置される各座標ごとに個別で行う。共振素子の設計方法は、まず基準とする開口面上の座標と、その座標に配置される素子が持つ反射位相特性の目標値を定める。次に、残りの各座標に対し、一次放射器からその座標までの距離とリフレクタレーの放射方向から、理想の開口面位相分布の実現に必要な位相量を算出し、残りの素子の目標値を決定する。そのため、基準とする

開口面上の座標と、そこに配置される素子に与える反射位相特性の傾きの選定が重要となる。その他の設計条件は従来と同様である。上記の設計条件において、ビームシフトが発生しないリフレクタレーに用いる共振素子の目標値について検討を行う。まず、Fig. 5 においてリフレクタレー開口面の中心付近を基準座標とし、その座標上の素子の位相特性の傾きを 1 GHz あたり  $-30^\circ$  とした場合を考える。

このとき、各座標上の素子に要求される反射位相特性の一例を Fig. 6(a) に示す。同図より、この目標値では、周波数に対して反射位相特性が正の傾きを持つ素子が必要となり実現不可能となる。次に、傾きが最大となった開口面の端の点 (一次放射器からの距離が最長の点) を基準の座標とし、規格化を行う。このときの各素子に要求される反射位相特性を Fig. 6(b) に示し、このようにすれば、全ての素子に要求される反射位相特性の傾きが負となり、実現可能である。本論文ではこれらの特性を目標値として、リフレクタレーの設計を行う。

### 3. ビームシフトを抑制するリフレクタレー

#### 3.1. 素子の最適化結果

全ての素子が設計可能な傾きに収まるよう基準点の傾きを  $-15^\circ$  として、設計周波数を 10 GHz、周波数帯域は 8 GHz~12 GHz とし、素子が配置される位置に応じて  $12^\circ \sim 43^\circ$  の入射角において所望の位相特性を持つ任意形状素子の設計を行う。設計する素子の種類は 108 種類となる。その他の設計条件は、評価周波数を 5 ポイント (1 GHz 間隔)、裕度  $\alpha = 10^\circ$ 、 $x$  方向、 $y$  方向周期  $d_x, d_y$  はともに 12 mm、メッシュ数を  $16 \times 16$ 、誘電体基板の厚み  $h = 3$  [mm]、比誘電率  $\epsilon_r = 1.67$  とする。

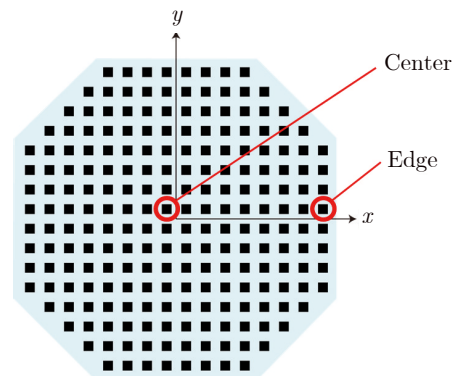
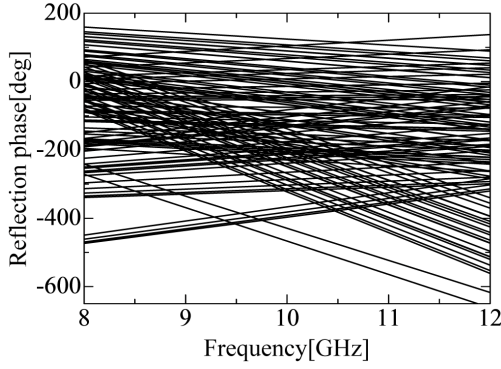
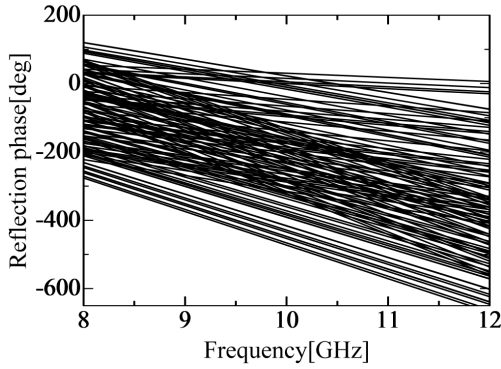


Fig. 5. Two kinds of reference points on reflectarray.



(a) Case choosing center cell as a reference element.



(b) Case choosing edge cell as a reference element

Fig. 6. Target values of reflection phase property.

最適化によって得られた任意形状素子の中から, Fig. 7 に示す素子について TE 入射時の反射位相特性をそれぞれ Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 に示す. ここで, 同図における  $Y = 1, Y = 4, Y = 6$  の素子はそれぞれ, Fig. 7 の赤, 緑, 青で示し, また, #1, #2, #3, #4 は,  $X = -6, -3, 3, 6$  のときの  $x$  座標が  $x = (X - \frac{1}{2})d_x (X \geq 1), x = (X + \frac{1}{2})d_x (X \leq -1)$  となる素子である. 反射位相は破線が目標値, 実線が計算値を示し, 設計帯域内で概ね目標値に沿った特性が得られている.

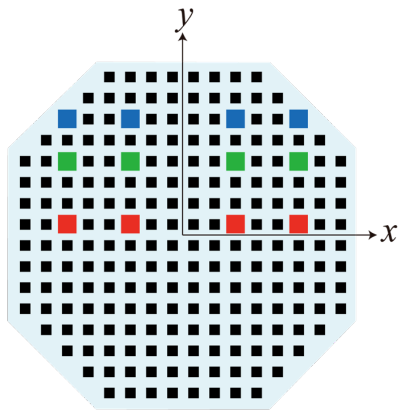
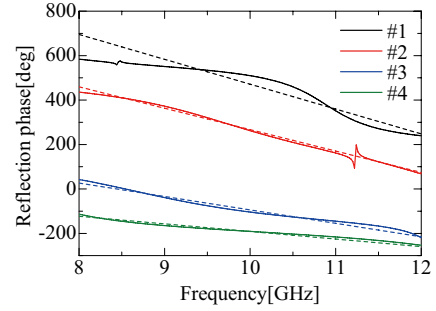


Fig. 7. reflectarray elements.

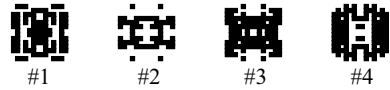


(a) Geometry of design elements.

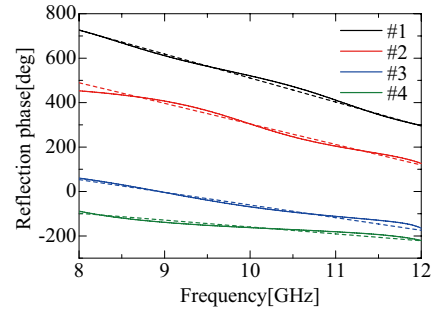


(b) Reflection phase properties.

Fig. 8. Designed four elements at  $Y = 1$ .



(a) Geometry of design elements.

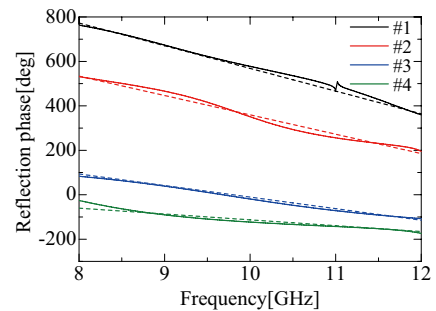


(b) Reflection phase properties.

Fig. 9. Designed four elements at  $Y = 4$ .



(a) Geometry of design elements.



(b) Reflection phase properties.

Fig. 10. Designed four elements at  $Y = 6$ .

### 3.2. リフレクタレーの設計

設計した共振素子を用いて、X帯で動作するオフセット給電リフレクタレーの設計を行う。設計したリフレクタレーと1次ホーンの配置をFig. 11に示す。各パラメータは図に示す通りであり、前節で設計した216種類の共振素子を配列するとFig. 12に示すようになる。

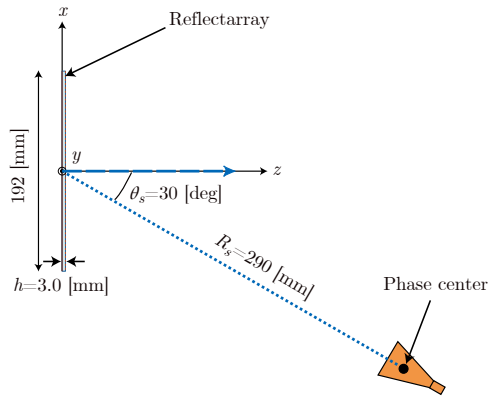


Fig. 11. Designed offset reflectarray configuration with primary horn.

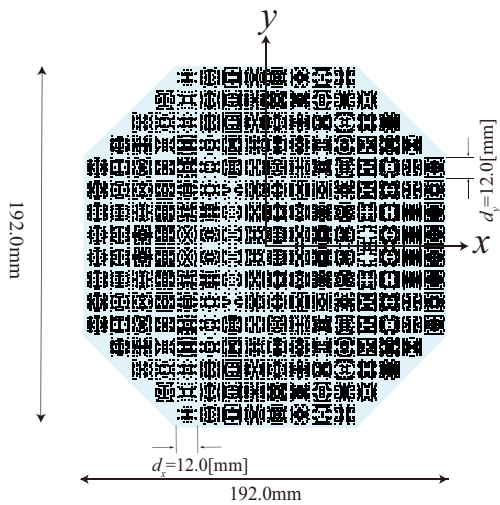


Fig. 12. Designed reflectarray for orthogonally linear polarization use.

### 3.3. リフレクタレーの放射特性

開口面法により計算したリフレクタレーの放射特性をFig. 13に示す。また、主ビームの放射方向のビームシフト量を比較したものをFig. 14に示す。提案するリフレクタレーにおいて、ビームシフト量が $0.0^\circ \sim 0.5^\circ$ と十分小さくなるのは、9 GHz~11 GHzの周波数範囲であり、従来のリフレクタレー<sup>26)</sup>のシフト量に比べ $\frac{1}{10}$ 以下に抑えられている。また、その際のリフレクト

アレーの開口面の位相分布をFig. 15に示す。同図より一様な位相分布が実現できていることが確認できる<sup>27)</sup>。

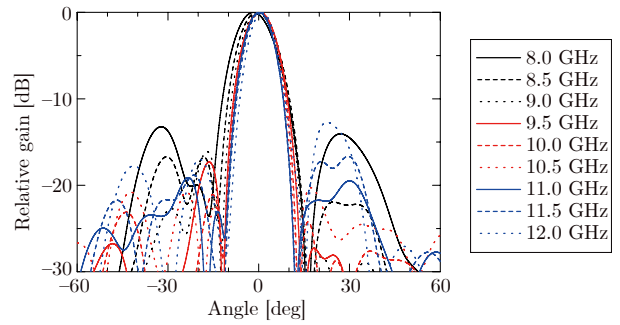


Fig. 13. Radiation patterns of proposed reflectarray.

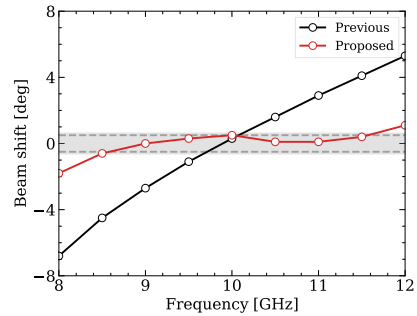


Fig. 14. Comparison of beam shift between proposed reflectarray and previous one for linear polarization.

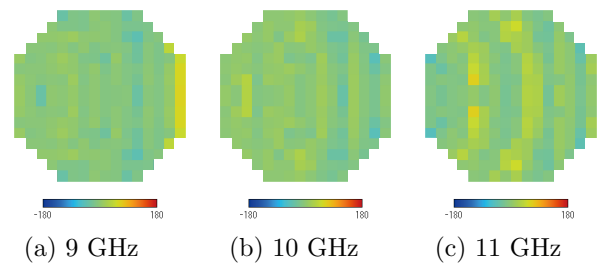


Fig. 15. Aperture phase distribution of reflected wave.

### 3.4. 実験的検討

設計したリフレクタレーを試作し、電波暗室において放射特性の評価を行った。試作したリフレクタレーの写真をFig. 16に示す。Figure 17に利得および開口能率、Fig. 18に9, 10, 11, 12 GHzにおける測定により得られたTE入射での放射特性と計算値の比較を示す。放射パターンの主ビーム形状について、測定値と計算値はよく一致している。



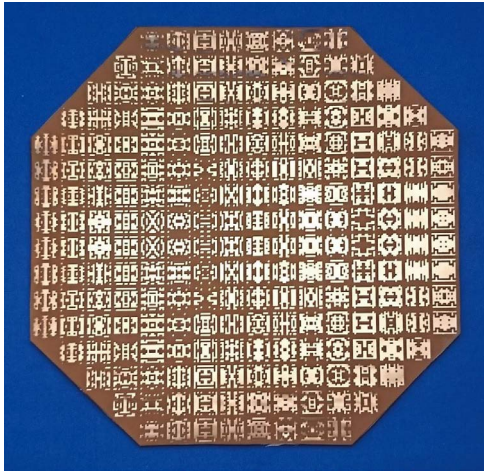
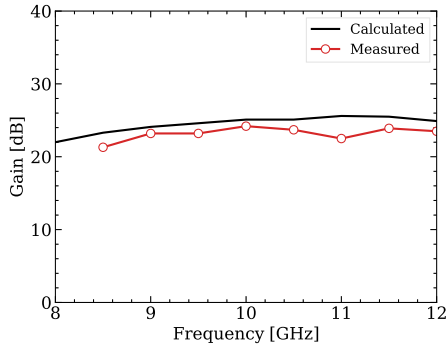
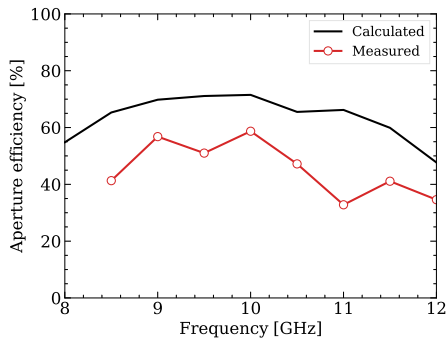


Fig. 16. Fabricated reflectarray for orthogonally linear polarization use.

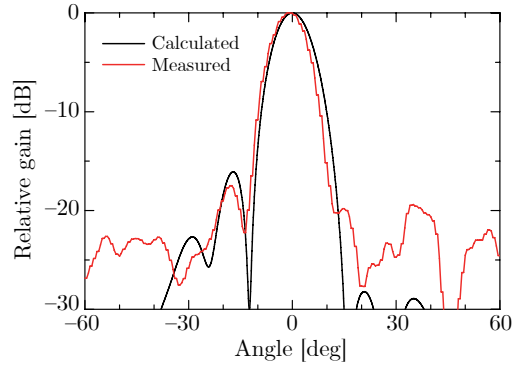


(a) Gain

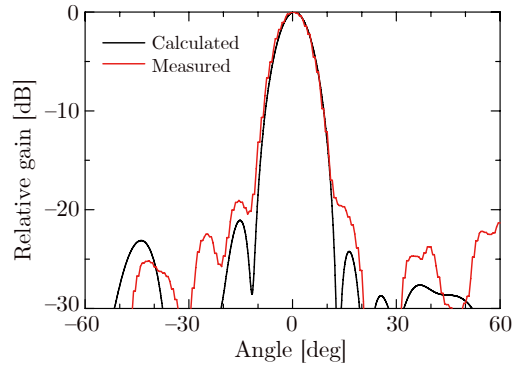


(b) Aperture efficiency

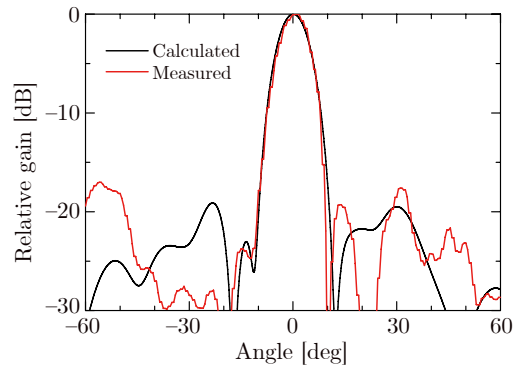
Fig. 17. Comparison between measured and calculated frequency characteristics for the proposed reflectarray antenna.



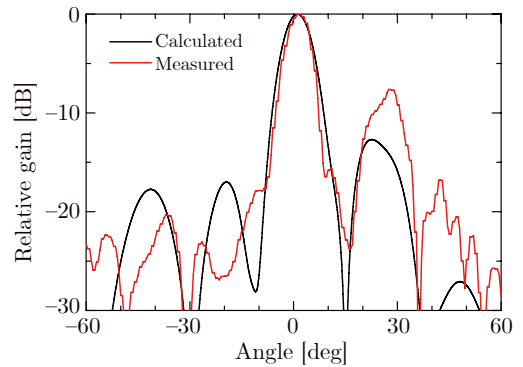
(a) 9 GHz



(b) 10 GHz



(c) 11 GHz



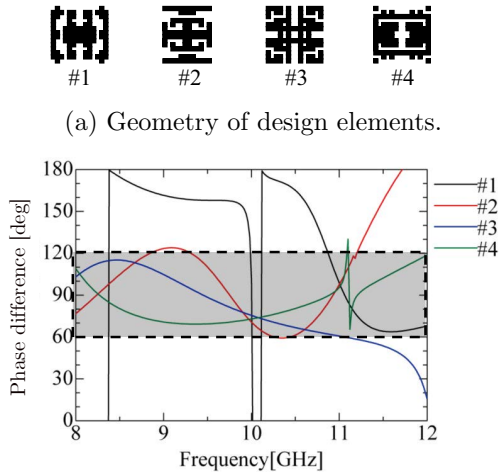
(d) 12 GHz

Fig. 18. Comparison between measured and calculated radiation patterns for linearly polarized reflectarray antenna.

#### 4. ビームシフトを抑制する円偏波変換リフレクタレー

##### 4.1. 任意形状素子

ビームシフトを抑制する特性に加え、前述したように TM 入射での目標値として、その素子が持つ TE 入射での反射位相量に対して  $90^\circ$  遅らせたものを新たに設定し、円偏波変換素子の設計を行う。Figure 19 に設計した素子の一例として、 $Y = 1$  で  $X = -6, -3, 3, 6$  の座標における素子 #1, #2, #3, #4 の形状と TE, TM 入射時の反射特性の位相差を示す。各偏波の位相差差により一部乱れが見られるものの、概ね位相差を  $90 \pm 20^\circ$  に抑えることができています。



(b) Phase difference between TE and TM.

Fig. 19. Circular polarization conversion elements and phase difference.

##### 4.2. リフレクタレーの設計

直線偏波のリフレクタレー同様に、設計した共振素子を用いて X 帯で動作するオフセット給電リフレクタレーの設計を行う。Figure 20 に設計したリフレクタレーを、また、Fig. 21 に設計したリフレクタレーの直線偏波を合成式によって円偏波に合成した放射特性、利得と開口能率の計算値を Fig. 22 に示す<sup>28)</sup>。これより、主ビームの放射方向のビームシフト量を従来の円偏波変換リフレクタレー<sup>26)</sup>と比較したものを Fig. 23 に示す。目標値を満たさない素子も存在するため若干のビームシフトが発生しているが、円偏波に合成した放射特性において、9 GHz~12 GHz の周波数帯域でビームシフトは  $-0.5^\circ \sim 0.6^\circ$  となっており、十分な抑制が確認できる。

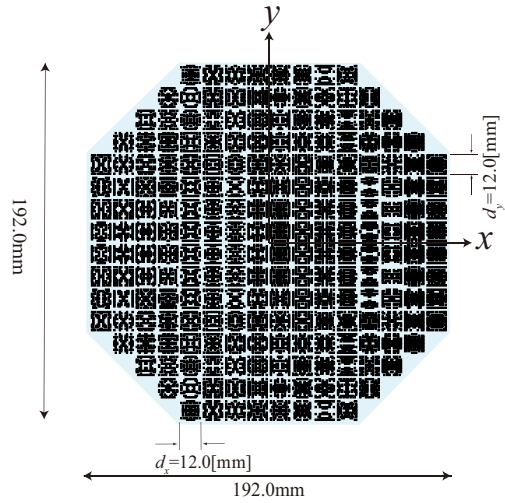


Fig. 20. Designed reflectarray for circular polarization conversion.

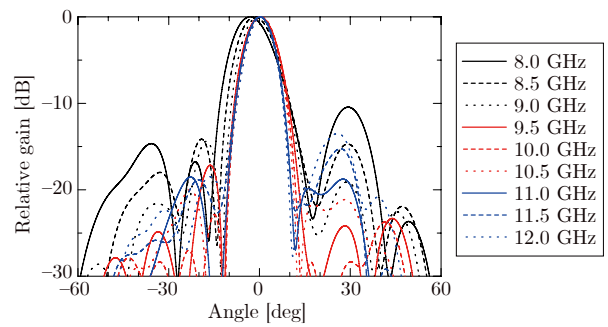
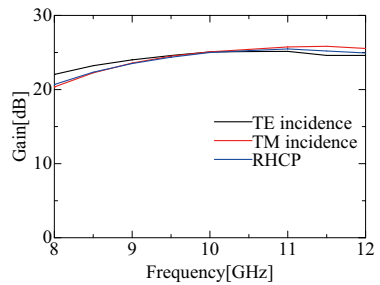
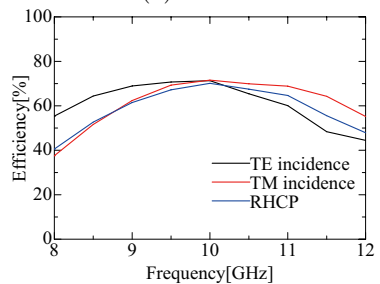


Fig. 21. Circularly polarized radiation patterns.



(a) Gain.



(b) Aperture efficiency.

Fig. 22. Frequency characteristics.

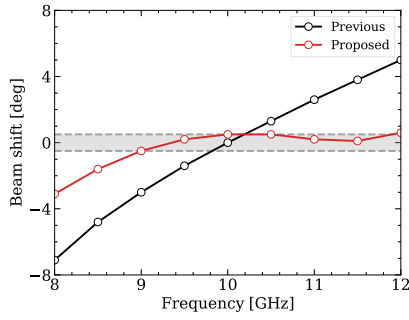


Fig. 23. Comparison of beam shift between proposed reflectarray and previous one for circular polarization.

4.3. 実験的検討

設計したリフレクトアレーを試作し、放射特性の評価を行った。試作したものを Fig. 24 に示す。Figure 25 に軸比, Fig. 26 に測定により得られた値から円偏波に合成した放射特性と計算値の比較を示す。計算値と測定値の放射パターンは概ね一致しており、広帯域にわたって軸比が2以下となっている。

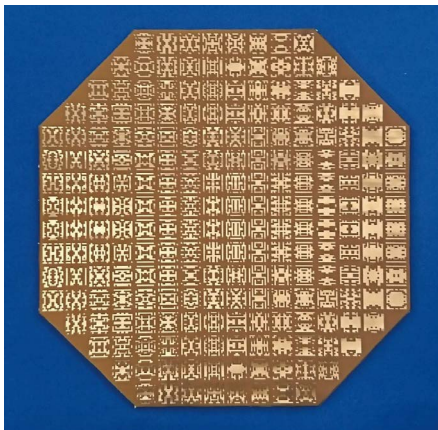


Fig. 24. Fabricated reflectarray for circular polarization conversion.

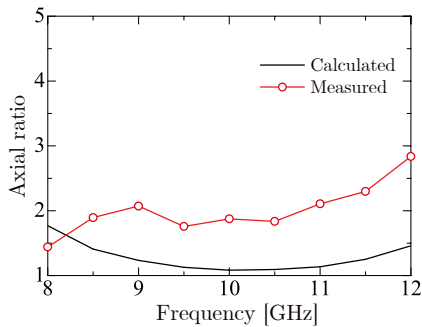
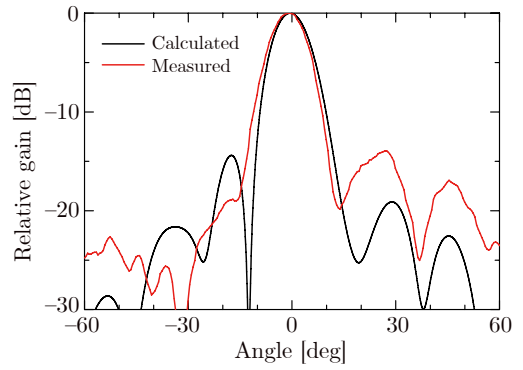
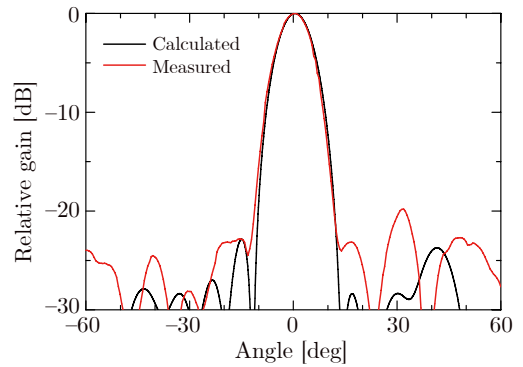


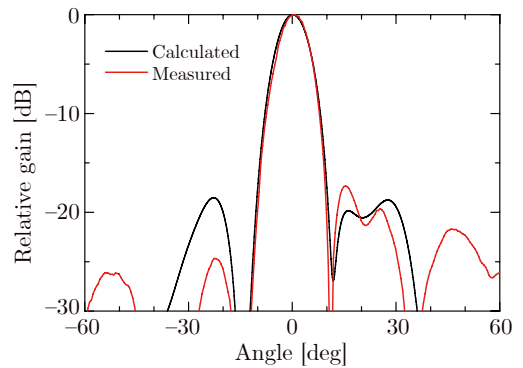
Fig. 25. Comparison between measured and calculated frequency characteristics of axial ratio.



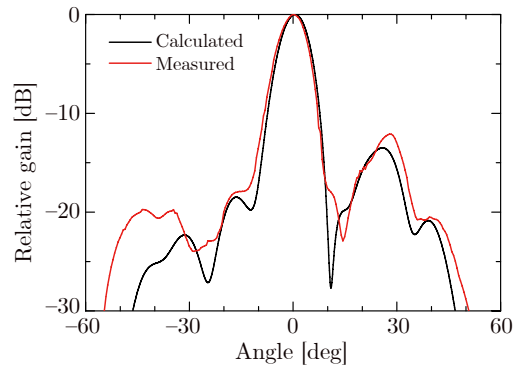
(a) 9 GHz



(b) 10 GHz



(c) 11 GHz



(d) 12 GHz

Fig. 26. Comparison between measured and calculated co-polar radiation patterns for circularly polarized reflectarray antenna.



## 5. まとめ

本論文では、鏡面反射方向以外に主ビームを形成するリフレクトアレーにおいて、課題となる主ビーム方向の周波数変化に伴うビームシフトの抑制についても検討を行い、GAを用いた最適化設計による任意形状の共振素子の設計例について述べた。共振素子の設計において、各素子の配置される位置に応じて適切な傾きを持つ直線を設計目標値として与えることで、設計帯域内でビームシフト抑制が可能なることを示した。加えて円偏波変換を実現する素子の設計も行った。また、それらの素子を用いて実際に設計したリフレクトアレーの数値的検証を行った。その後、提案した設計手法の有効性を確認するため、オフセット給電リフレクトアレーを試作し、電波暗室において放射特性の評価を行った。その結果、主ビーム形状は計算値との良い一致が確認できた。主ビーム方向のビームシフトは、9 GHz~11 GHzの周波数帯域で $0.0^\circ \sim 0.5^\circ$ の範囲に収まっており、従来の $\frac{1}{10}$ 以下に抑制することができた。以上より、提案した設計手法は、ビームシフトを抑制したリフレクトアレーの設計に有用であることが示せた。また、円偏波変換リフレクトアレーにおいても、同様にビームシフトを抑制し、かつ軸比を2以下に抑えることができた。

## 参考文献

- 1) J. Huang, "Microstrip reflectarray," *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* **2**, pp. 612–615 (1991).
- 2) J. Huang and J. A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, (Wiley, New Jersey, 2007).
- 3) J. Shaker, M. R. Chaharmir and J. Ethier, *Reflectarray Antennas Analysis, Design, Fabrication, and Measurement*, (Artech House, Boston, 2014).
- 4) 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トアレーの簡易設計," *信学論*, **J89-C**[5], pp. 321–328 (2006).
- 5) 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, "衛星放送受信用リフレクトアレーアンテナ," *信学論*, **J95-B**[9], pp. 1114–1123 (2012).
- 6) 藤本 優生, 若島 慎一郎, 出口 博之, 辻 幹男, "Ω型共振素子を用いたカーペットクロッキング及び偏波依存イリュージョンクロッキング," *信学論*, **J101-C**[2], pp. 489–497 (2018).
- 7) S. Abulgasem, F. Tubbal, R. Raad, P. I. Theoharis, S. Lu and S. Iranmanesh, "Antenna Designs for CubeSats: A Review," *IEEE Access*, **9**, pp. 45289–45324 (2021).
- 8) P. I. Theoharis, R. Raad, F. Tubbal, M. U. A. Khan and A. Jamalipour, "Wideband Reflectarrays for 5G/6G: A Survey," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, **3**, pp. 871–901 (2022).
- 9) A. J. Rubio, A. -S. Kaddour, H. Pruetz, S. Magleby, L. L. Howell and S. V. Georgakopoulos, "A Deployable Volume-Efficient Miura-Ori Reflectarray Antenna for Small Satellite Applications," *IEEE Access*, **11**, pp. 119313–119329 (2023).
- 10) R. Orr, G. Goussetis, V. Fusco, and Elena Saenz, "Linear-to-Circular Polarization Reflector with Transmission Band," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **63**[5], pp. 1949–1956 (2015).
- 11) G. Wu, S. Qu, S. Yang, and C. Chan, "Broad-Band Single-Layer Dual Circularly Polarized Reflectarrays with Linearly Polarized Feed," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **64**[10], pp. 4235–4241 (2016).
- 12) D. Higashi, H. Deguchi and M. Tsuji, "Omega-shaped resonant elements for dual polarization and wideband reflectarray," *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* **1**, pp. 809–810 (2014).
- 13) D. Higashi, H. Deguchi and M. Tsuji, "Omega-shaped geometries of reflectarray resonant elements with low cross-polarization for wideband and dual-polarization use," *Progress In Electromagnetics Research M (PIERM)*, **63**, pp. 217–225 (2018).
- 14) D. Higashi, H. Deguchi, and M. Tsuji, "Reflectarray Resonant Elements for Linear to Circular Polarization Conversion," *IEICE Communications Express (ComEX)*, **5**[7], pp. 199–202 (2016).
- 15) 東 大智, 出口 博之, 辻 幹男, "複数共振素子を用いた広帯域直線-円偏波変換リフレクトアレー," *信学論*, **J100-B**[10], pp. 880–887 (2017).
- 16) M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji and H. Shigesawa, "Multiband Single-Layer Frequency Selective Surface Designed by Combination of Genetic Algorithm and Geometry-Refinement Technique," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **52**[11], pp. 2925–2931 (2004).
- 17) 出口 博之, 東 大智, 辻 幹男, "遺伝的アルゴリズムを用いたマイクロ波・ミリ波素子の最適化設計," *信学論*, **J104-C**[5], pp. 157–165 (2021).
- 18) T. Asada, H. Deguchi, M. Tsuji and Y. Aoki, "Reflectarray with Arbitrary Shape Elements Suppressing Their Mutual Coupling," *Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, **1**,

- pp. 1116–1119 (2012).
- 19) S. Wai, H. Deguchi and M. Tsuji, “Optimization Design Method of Arbitrarily Shaped Elements for Wideband Reflectarrays,” *IEICE Communications Express (ComEX)*, **7**[5], pp. 1–4 (2018).
  - 20) H. Deguchi, D. Higashi, H. Yamada, S. Matsumoto and M. Tsuji, “Arbitrarily-Shaped Reflectarray Resonant Elements for Dual-Polarization Use and Polarization Conversion,” *IEICE Trans. Commun.*, **E101-B**[2], pp. 277–284 (2018).
  - 21) S. Sakita, H. Deguchi and M. Tsuji, “Single-Layer Microstrip Reflectarray Based on Dual-Resonance Behavior,” *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* **1**, pp. 1290–1293 (2007).
  - 22) K. Mayumi, H. Deguchi and M. Tsuji, “Wideband Single-Layer Microstrip Reflectarray Based on Multiple-Resonance Behavior,” *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* **1**, no.s432p4 (2008).
  - 23) T. Toyoda, H. Deguchi, M. Tsuji and T. Nishimura, “Reflectarray elements based on two-resonance behavior for dual-polarization use,” *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, FrP2-15 (2011).
  - 24) D. Higashi, S. Sasaki, H. Deguchi and M. Tsuji, “Low cross-polarization reflectarray elements with four axial symmetry for dual-polarization and wideband use,” *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* **1**, pp. 2171–2172 (2015).
  - 25) D. Higashi, H. Deguchi and M. Tsuji, “Low cross-polarization reflectarray elements with four axial symmetry for dual-polarization use,” —it *IEICE Communications Express (ComEX)*, **4**[3], pp. 85–88 (2015).
  - 26) Y. Sunaga, K. Takeshima, S. Makino, T. Shiode and M. Takikawa, “Multi-Beam Design Method for Reflectarray Antenna using Aberration Theory,” *Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, **1**, pp. 1–2 (2017).
  - 27) H. Yamada, K. Sakagawa, H. Deguchi and M. Tsuji, “A Linearly Polarized Reflectarray Suppressing Beam Shift,” *Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, **1**, pp. 447–448 (2018).
  - 28) H. Yamada, K. Sakagawa, H. Deguchi and M. Tsuji, “Circular Polarization Conversion Reflectarray Suppressing Beam Shift,” *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* **1**, pp. 299–300 (2019).
  - 29) S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, (McGraw-Hill, New York, 1949).