

リフレクトアレーアンテナのゾーニングにおける位相誤差の 周波数特性への影響

琴浦 葵[†] 牧野 滋[†] 竹島 健飛[†] 須永 諠[†]
瀧川 道生^{††} 中嶋 宏昌^{††}

[†] 金沢工業大学 〒921-8501 石川県野々市市扇が丘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: [†]b1403455@planet.kanazawa-it.ac.jp

あらまし ゾーニングは大口径のリフレクトアレーを設計する際に必須な技術である。本論文では、マルチレイヤおよびシングルレイヤのリフレクトアレーアンテナにおける位相誤差の周波数特性について検討し、また、ゾーニングがシングルレイヤのリフレクトアレーアンテナに与える影響について検討した。結果として、ゾーニングするとシングルレイヤおよびマルチレイヤで概ね同等の位相誤差が発生し、また、シングルレイヤではゾーニングごとに位相誤差上でリップルが発生することが判明した。

キーワード リフレクトアレーアンテナ、共振素子、ゾーニング、位相誤差

Influence on the Frequency characteristic phase error in zoning of reflect array antenna

Aoi KOTOURA[†], Shigeru MAKINO[†], Kento TAKESHIMA[†], Yoshimi SUNAGA[†], Michio
TAKIKAWA^{††}, and Hiromasa NAKAJIMA^{††}

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

^{††} Mitsubishi Electric Corporation Ofuna 5-1-1, Kamakura, Kanagawa 247-8501 Japan

E-mail: [†]b1403455@planet.kanazawa-it.ac.jp

Abstract Zoning is an essential technique for designing large arrays of reflect arrays. In this paper, we investigate the frequency characteristics of phase error in multilayer and single layer reflect array antenna, and also examined the effect of zoning on single layer reflect array antenna. As a result, it was found that when zoning, approximately the same phase error occurs in single layer and multilayer, and ripple occurs on phase error for each zoning in the single layer.

Key words Reflect array antenna, Resonant element, Zoning, Phase error

1. はじめに

リフレクトアレーアンテナ(以下、リフレクトアレー)は、誘電体基板上に金属素子を装荷した周波数選択板(FSR)の反射位相制御機能を反射鏡アンテナに適用したものである[1]。リフレクトアレーは平面構造の反射鏡面と一次放射器で構成されており、パラボラアンテナ(以下、パラボラ)と構造が類似していることから、この2つでアンテナ特性を比較することが多い。一般的に、パラボラは一次放射器から開口面までの光路長が一定となる条件を満たすように設計するため、リフレクトアレーと比較すると広帯域・高能率である。一方リフレクトアレーの

場合、設計周波数で反射位相を制御することによって平面波面が形成される。したがって、開口上の位相誤差は、設計周波数から周波数が変化するとビームシフトが発生し[2]、設計周波数外で利得が減少する傾向がある。リフレクトアレーにおいて、帯域幅を広げることは重要な研究課題であり、世界的に研究がなされている。しかし、それらの大部分は誘電体基板および金属素子に関するものである。誘電体については、厚さを増加させることで広帯域特性を得られると指摘されているが、その場合、設計周波数における効率が低下する[3][4]。また、金属素子に関しては、位相変化素子[5]や多層素子[6]など、広帯域化のために多くの素子が提案されている。これらは広帯域で滑ら

かな位相変化が実現できるが、2つ以上の層(以下、マルチレイヤ)を積層することによって得られる。単層素子(以下、シングルレイヤ)の場合、帯域幅が制限されており、位相の変動も $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ の範囲に制限されている [7]。

本研究の目的は、様々な素子を用いたリフレクタレーに対し、ゾーニングが位相誤差の周波数特性に与える影響について検討する。なお、ゾーニングとは、例えば一次放射器が作る球面波と所望の平面波の光路差(収差 Δ)のうち、波長の整数倍については反射位相を補正することなく、 $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ の範囲で反射位相を制御する技術であり、大口径リフレクタレーの設計に適用される。

2. 位相制御素子の分類

共振素子の構造には、シングルレイヤとマルチレイヤがあり、いずれも素子の寸法を変化させることで反射位相を制御する。図1に示すシングルレイヤでは、一般的に反射位相の制御範囲が $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ であり、実現できる反射位相は図2[1]のような特性を有する。素子の構造が単純であるため設計が容易であり、低コストで製作できる。図3[8]に示すマルチレイヤは、反射位相の制御範囲が $-2m\pi \leq \Phi_0 \leq 0$ であり、実現できる反射位相は図4[9]のような特性がある。反射位相の制御範囲は広いが、素子の構造が複雑であり、設計が困難である。そのため、製作の際は高コストとなる。なお、シングルレイヤでもマルチレイヤと同等な反射位相の制御範囲を有する素子が研究されている。この場合には、素子の寸法を変化させるのではなく、GA(遺伝的アルゴリズム)を用いて、最適な素子の形状を決定している [10]。

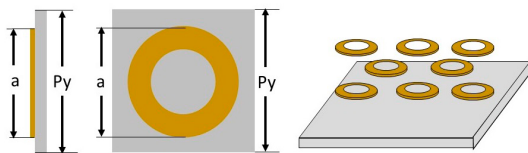


図1 シングルレイヤの素子構造例

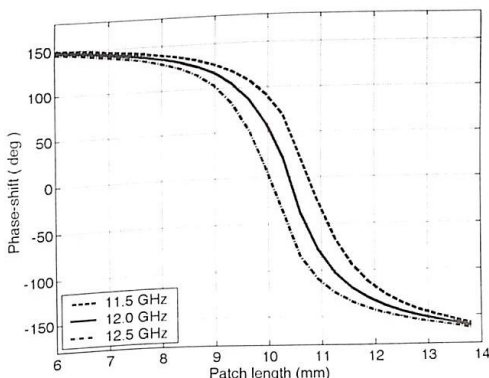
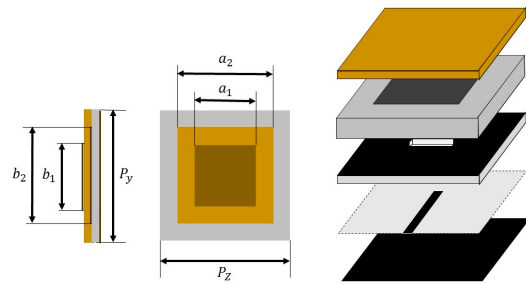


図2 シングルレイヤの反射位相例



(a) Stacked patch elements (b) Aperture-coupled patches

図3 マルチレイヤの素子構造例

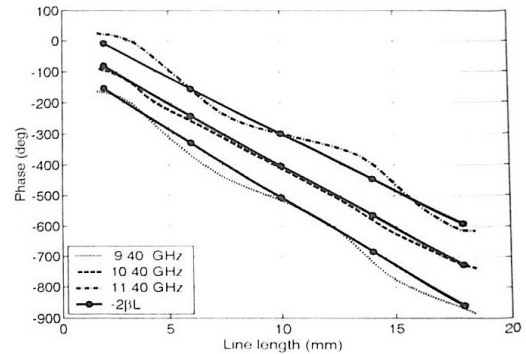


図4 マルチレイヤの反射位相例

3. 残留収差の導出

3.1 収差

図5を用いて収差 Δ について説明する。 r を一次放射器からリフレクタレー上の任意の素子に至るベクトルとすると、その素子が補正すべき収差は式(1)で表される。

$$\Delta = r_1 + r_2 - C = |r| - r \cdot k - C \quad (1)$$

この式において、 k は所望のビーム方向であり、この平面波面に直交する単位ベクトルである。また、 C は任意の定数であるが、一般的にはリフレクタレー中心にある素子において、収差 Δ が0となるように値を決定することが多い。

3.2 ゾーニング

ゾーニングは大口径のリフレクタレーを設計する際に必須な技術である。図6を用いてゾーニングについて説明する。ここで、青色の線が式(1)で決定した収差、オレンジの線が青色の線で示した収差から設計周波数における波長の整数倍を差し引いた収差を示している。補正すべき収差のうち、青の線で示す収差は反射位相では補正せず、オレンジの線で示す収差のみを反射位相で補正する。この技術をゾーニングと呼ぶ。開口径が大きくなるとゾーニングが繰り返され、ゾーン数が増加する。

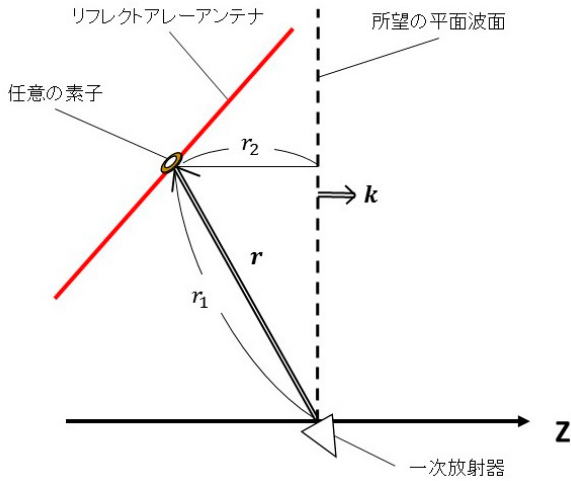


図5 収差

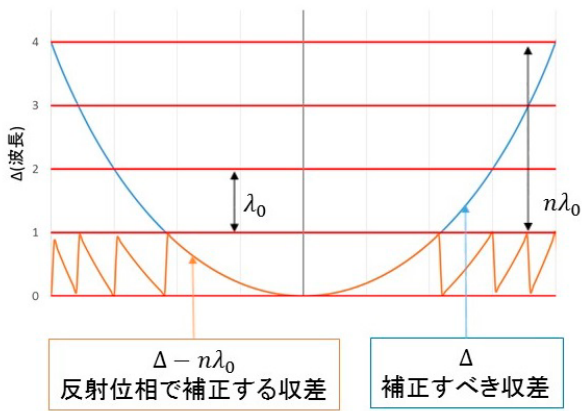


図6 ゾーニング

3.3 残留収差

$\Phi(f)$ を反射位相の周波数特性, Φ_0 を設計周波数 f_0 における反射位相とする. 一般的に, リフレクタレーは $-m\pi \leq \Phi_0 \leq m\pi$ の範囲で反射位相を制御する. n 個目のゾーンにおける反射位相 Φ_0 は式 (2) で決定する.

$$\Phi_0 = \frac{\lambda_0}{2\pi} (\Delta - mn\lambda_0) \quad (2)$$

周波数 f のとき, 反射位相 Φ によって補正される収差 Δ' は式 (3) である.

$$\Delta' = \frac{2\pi}{\lambda} \Phi \quad (3)$$

式 (2), (3) より, 周波数 f における位相誤差に対応する残留収差 $d\Delta$ は式 (4) となる.

$$d\Delta = \Delta - \Delta' - mn\lambda = \frac{1}{2\pi} (\Phi_0 \lambda_0 - \Phi \lambda) + mn(\lambda_0 - \lambda) \quad (4)$$

周波数にかかわらず残留収差が発生しない条件は式 (5) である.

$$d\Delta = 0 \quad (5)$$

ゾーニングをしないリフレクタレーの場合は $n = 0$ であるため, 式 (5) の条件は式 (6) となる.

$$\Phi(f) = \frac{f}{f_0} \Phi_0 \quad (6)$$

式 (6) は周波数にかかわらず残留収差が発生しない条件である.

3.4 マルチレイヤの残留収差

マルチレイヤのリフレクタレーは, 反射位相の制御範囲が $-2m\pi \leq \Phi_0 \leq 0$ である. 設計周波数 f_0 における反射位相を図7の青色の点で示す. それぞれの反射位相において, 式 (6) を満足する反射位相の周波数特性を青の実線で示す. また, 実現できる反射位相の一例を緑の点線で示しており, 所望の反射位相にかかわらず周波数特性の傾きは負である. 図7に示すように, ゾーニングしない場合は式 (6) の条件を近似的に実現できる. これに対し, ゾーニングを適用した場合には, 式 (6) の条件を満足するような反射位相を実現できたとしても, 式 (7) のような残留収差が発生する.

$$d\Delta = mn(\lambda_0 - \lambda) \quad (7)$$

すなわち, 開口中心部からゾーンが離れると, 設計周波数以外で位相誤差が階段状に増加する.

3.5 シングルレイヤの残留収差

一般的にシングルレイヤのリフレクタレーは, 図2に示すように反射位相の制御範囲は $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ である. 設計周波数 f_0 における反射位相を図8の青色の点で示し, 式 (6) で表される反射位相を青の実線で示す. また, 実現できる反射位相の一例を緑の点線に示す. 反射位相の周波数特性は負の傾きしか実現できないため, 反射位相が $-\pi \leq \Phi_0 \leq 0$ の場合はマルチレイヤと同様に近似的に実現することが可能である. しかし, 反射位相が $0 \leq \Phi_0 \leq \pi$ の場合は, 式 (6) で表される反射位相が正の傾きであるため, 実現不可能である. したがって, 近似的に実現できる理想の周波数特性を式 (8) と仮定する. これを赤の破線で示す.

$$\Phi(f) = \Phi_0 \quad (8)$$

式 (8) を式 (4) に代入すると, シングルレイヤにおける残留収差の式 (9) が得られる.

$$d\Delta = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \Delta - mn\lambda \quad (9)$$

式 (9) より, 位相誤差に対応した残留収差は式 (10) になる. これより, シングルレイヤの場合はゾーニングの有無にかかわらず, 位相誤差が連続的になめらかになる.

$$d\Delta = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \Delta \quad (10)$$

シングルレイヤの反射位相が $-\pi \leq \Phi_0 \leq 0$ の場合は, 式 (6) の必要条件である反射位相の周波数特性の傾きが負になる条件は満足している. そのため, 実現できる反射位相の傾きは, 赤の破線で示す反射位相よりも青の実線で示す理想の周波数特性に近くなり, 位相誤差は小さくなる. これに対し, 反射位相が $0 \leq \Phi_0 \leq \pi$ の場合, 青の実線の傾きは緑の点線よりも赤の破線の方が近くなるため, 位相誤差が大きくなる. これより, $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ の反射位相が変化する1つのゾーン内に1周期のリップルが発生する.

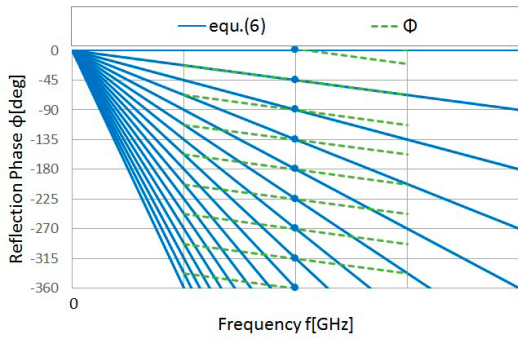


図7 式(6)および実現できる反射位相の周波数特性

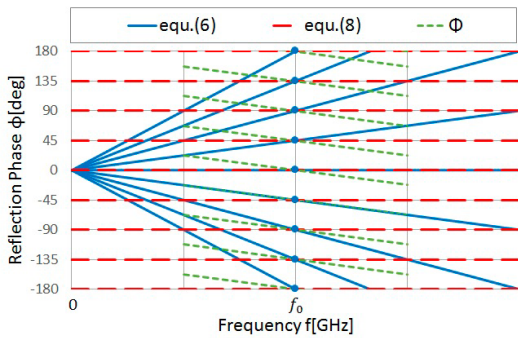


図8 式(6), 式(8)および実現できる反射位相の周波数特性

4. 解析結果

4.1 解析モデル

図9にリフレクタレーの鏡面系の構成を示す。リフレクタレーには4つの自由度がある設計パラメータが有り、ここではリフレクタレーの開口径 D 、一次放射器から鏡面までの距離 R 、一次放射器がブロッキングにならないためのクリアランス c 、リフレクタレーにおける一次放射器のイメージ F' の角度 θ を用いた。

また、図10にリフレクタレーの反射鏡面の設計パラメータを示す。ここで、反射素子はリング状のシングルレイヤを用いた。誘電体のパラメータとしては、誘電体基板の厚さを t 、比誘電率を ϵ_r とする。素子のパラメータとしては、共振素子の間隔を d 、リング径を r 、リング幅を w とする。

解析モデルで用いたパラメータを表1、この設計パラメータを用いて決定された素子の配列を図11に示す。

4.2 シングルレイヤおよびマルチレイヤの位相誤差の比較

マルチレイヤおよびシングルレイヤのリフレクタレーにおける位相誤差の一例を図12に示す。実線が式(10)を用いて計算したシングルレイヤの位相誤差、破線が式(7)を用いて計算したマルチレイヤの位相誤差である。前述したように、シングルレイヤの場合には位相誤差は連続的になめらかな曲線となり、マルチレイヤの場合はゾーニングごとに階段状の位相誤差が生じる。両者を比較すると、マルチレイヤは開口中心部で位相誤差が発生しないため開口径が小さいリフレクタレーでは位相誤差のない設計が実現できる。一方、開口径の大きいリフレクタレーでは、ゾーニングするごとにシングルレイヤと概ね同

等の位相誤差が発生するため、大口径のリフレクタレーを設計する際はどちらのレイヤを用いても位相誤差は同等となる。

4.3 解析結果との比較

シングルレイヤのリフレクタレーを設計し、位相誤差およびリップルについて検証した。図13に位相誤差の理論値および解析値を示す。実線が式(10)を用いて解析した位相誤差、破線が所望の反射位相を用いて解析した位相誤差である。図13より、式(10)を用いて解析した位相誤差と所望の反射位相を用いて解析した位相誤差の傾向が概ね一致していることから、ゾーニングはリフレクタレーの位相誤差に影響を与えないことが判明した。また、1周期に1つのリップルが発生することは前述したが、図11と図13のリップルを比較すると、ゾーニングの間隔とリップルが発生する間隔は同様である。また、ゾーニング数とリップルの発生数が一致していることから、位相誤差におけるリップルはゾーニングの影響で発生していることが判明した。

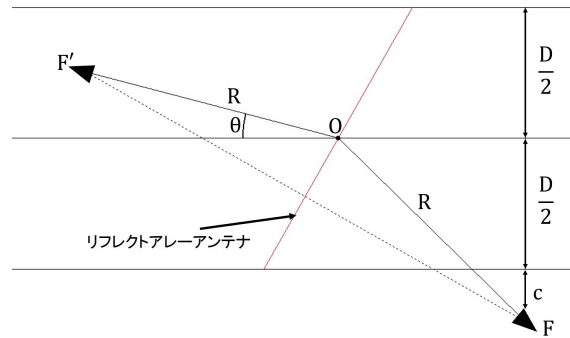


図9 リフレクタレーの鏡面構成

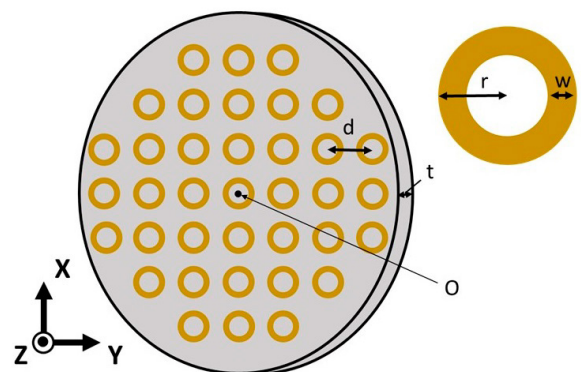


図10 設計パラメータに対応する鏡面図

表 1 リフレクタレーの設計パラメータ

設計周波数 f_0 [GHz]	12.0
開口径 D [mm]	1000.0
一次放射器から鏡面までの距離 R [mm]	1000.0
クリアランス c [mm]	200.0
イメージホーン角 θ [deg]	20
誘電体基板厚 t [mm]	3.2
比誘電率 ϵ_r	2.59
共振素子間隔 d [mm]	9.2
リング半径 r	0.3 4.3
リング幅 w [mm]	0.2

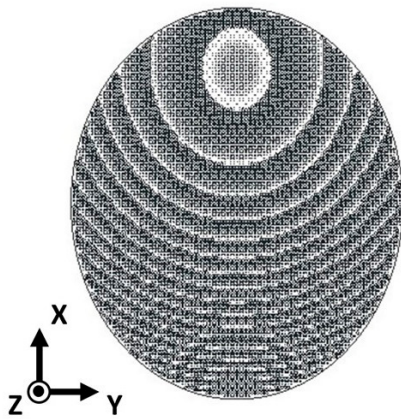


図 11 設計パラメータを用いて決定した素子配列

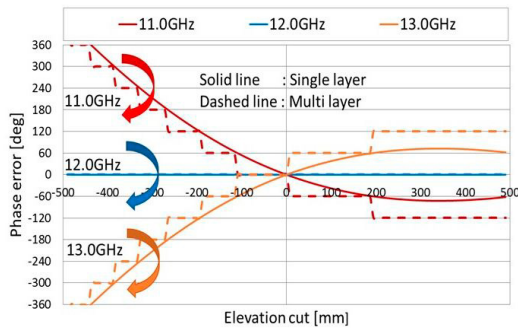


図 12 位相誤差の比較

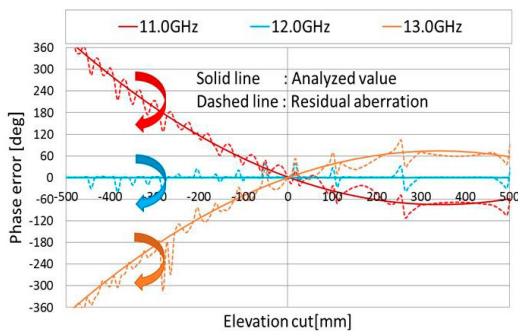


図 13 解析結果との比較

5. む す び

本論文では、シングルレイヤおよびマルチレイヤのリフレクタレーにおける位相誤差の周波数特性について検討し、また、ゾーニングがシングルレイヤのリフレクタレーに与える影響を検討・考察した。計算結果より、シングルレイヤの場合、位相誤差はなめらかな曲線となり、マルチレイヤの場合、ゾーニングごとにシングルレイヤと同等な位相誤差が階段状に発生する。これより、マルチレイヤでは開口径が小さいリフレクタレーの場合、位相誤差が発生しない条件を満足できる。しかし、開口径が大きい場合、ゾーニングごとにシングルレイヤと同等の位相誤差が発生する。

シングルレイヤのリフレクタレーにおいて、リフレクタレーの反射鏡面におけるゾーニングと解析結果における位相誤差上のリップルは同じ間隔である。また、ゾーニングとリップルの数が一致していることから、ゾーニングは位相誤差のリップルに影響を与えていることが判明した。

文 献

- [1] J.Huang, et al. , " Reflectarray antennas" , Wiley, New Jersey,2007.
- [2] E. Almajali, et al. , " On beamsquint in offset-fed reflect arrays," IEEE AWPL. ,vol. 11, pp. 937-940, 2012.
- [3] D. M. Pozar, " Wideband reflectarrays using artificial impedance surface," Electr. Lett., vol. 43, no, 3, 2007.
- [4] T. Shiode, et al. , " A Study of Wideband Reflectarray Antenna Using Ring-Style Resonator Elements," 2017 EuCAP, 2017.
- [5] E. Carrasco, et al. , " Reflectarray Element Basedon Aperture-Coupled Patches With Slots and Lines of Variable Length," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 55, No. 3, PP. 829-825, March 2007.
- [6] J. A. Encinar, " Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size," IEEE TAP. , Vol. 49, No, 10. PP. 1403-1410, Oct. 2001.
- [7] M. Bozzi, et al. , " Performance Comparison of Different Element Shapes Used in Printed Reflectarrays," IEEE AWPL. , vol. 2, pp. 219-222, 2003.
- [8] C.J.Sletten, " Reflector and Lens Antennas" , Artech House, 1988.
- [9] O.M.Bucch, et al, " Power synthesis of reconfigurable conformal arrays with phase-pnly control" , IEEP AP, 1998.
- [10] 山田 裕貴, 他, 信学総大, B-1-48, 2018.