

リフレクトアレーにおける残留収差の簡易評価法

琴浦 葵[†] 牧野 滋[†] 須永 誼[†] 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 従来の位相誤差周波数特性の評価法は、位相誤差と鏡面構成との関係が明確でなかった。本報告では、リフレクトアレーアンテナに入射する波面が、イメージの一次放射器から放射する球面波であると近似する。残留収差を一次と二次の収差に分けることで、設計周波数外で発生する残留収差の推定が容易になるため、鏡面を設計することなく簡易的な残留収差の推定が可能であることを示した。

キーワード リフレクトアレーアンテナ, 収差, 残留収差, 球面波, 簡易評価法

A simple evaluation method of residual aberration in reflect arrays

Aoi KOTOURA[†], Shigeru MAKINO[†], 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 In the conventional method of evaluating the phase error frequency characteristic, the relationship between the phase error and the mirror surface configuration was not clear. In this report, we approximate that the wavefront incident on the reflectarray antenna is a spherical wave radiating from the primary radiator of the image. By dividing residual aberration into primary and secondary aberrations, it is easy to estimate the residual aberration occurring outside the design frequency, and it is shown that it is possible to estimate simple residual aberration without designing a mirror surface. It was.

Key words Reflect array antenna, Aberration, Residual aberration, Spherical wave, Simple evaluation method

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]. 一般的に, リフレクトアレーは誘電体基板上に配置された金属素子で位相を制御し, 任意の収差を補正することによって設計周波数において平面波面を実現する.

従来の検討では, 金属素子の反射位相に実現可能かつ理想的な周波数特性を用いることで, 金属素子や誘電体基板などの鏡面設計をすることなく, 残留収差の周波数特性を推定することが可能であることを示した [2][3]. 反射位相の制御範囲が $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ で変化するシングルレイヤのリフレクトアレーにおいては, 位相誤差がゾーニングの有無に関わらずな

らかな曲線となることを示した. また, 反射位相の制御範囲が $-2m\pi \leq \Phi_0 \leq 0$ の範囲で変化する位相変化素子 [4] や多層素子 [5] といったマルチレイヤリフレクトアレーにおいては, ゾーニングがない場合は位相誤差が発生しないこと, また, ゾーニングをした場合は位相誤差が階段状に発生し, その包絡線はシングルレイヤの位相誤差と同等な曲線となることを示した. しかし, 位相誤差と鏡面構成との関係は必ずしも明確ではなかった [6].

本論文では, リフレクトアレーに入射する波面をイメージの一次放射器 (以下, イメージホーン) から放射される球面波と近似することにより, 残留収差を一次と二次に分けることが可能となり, 一次と二次の収差の発生量と鏡面構成の設計パラメータとの関係性を明確にした. これらのうち, 一次の収差はビームシフト, 二次の収差は利得低下に対応する.

2. 残留収差の定性的解釈

2.1 収 差

収差 Δ とは、一次放射器から放射され、リフレクタレーに反射した波面と、所望の平面波との光路差のことである。図 1 より、 \mathbf{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 Δ は次式で表される。

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

ここで、 \mathbf{k} は所望のビーム方向、 C は任意の定数である。

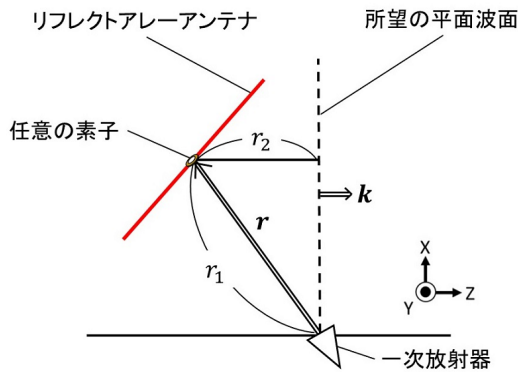


図 1 収 差

2.2 残留収差の導出

$\Phi(f)$ 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、 λ を任意の周波数における波長、 λ_0 を設計周波数における波長とする。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ため、 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。

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

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。

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

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。また、一般的にシングルレイヤのリフレクタレーにおける反

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 2 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で示す。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 (7) と仮定する。これを赤の破線で示す。

$$\Phi(f) = \Phi_0 \quad (7)$$

式 (7) を式 (4) に代入すると、リフレクタレーにおける残留収差の式 (8) が得られる。

$$d\Delta = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0}\Delta - mn\lambda \quad (8)$$

式 (8) より、位相誤差に対応した残留収差は式 (9) になる。

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

式 (1) および式 (9) によって残留収差を評価できるが、これらの式からどのような残留収差が発生しているかを推定することは困難である。

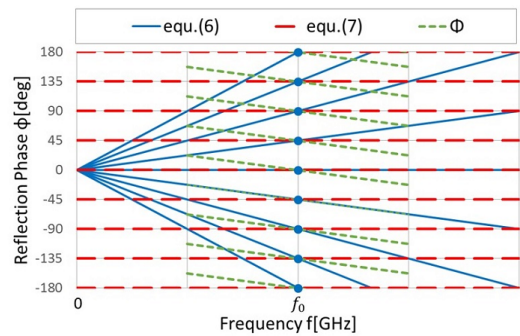


図 2 反射位相の比較

3. 残留収差の簡易評価法

3.1 簡易評価法における収差

図 3 にリフレクタレーの幾何学的な構造を示す。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存在し、ここではリフレクタレーの開口径 D 、一次放射器が位置する点 F から鏡面の中心である点 O までの距離 R 、イメージホーン的位置を点 F' としたときのビームシフト角 θ 、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 とする。図において、点 F から放射され、リフレクタレーで反射した波面は、点 F' から放射される波面に相当する。厳密には、補正すべき収差は式 (1) で示した収差であるが、図 4 の収差 Δ で示すように、簡易評価法に用いる収差は点 F' を中心とする半径 R の球面波面と所望の平面波面との差であると近似する。

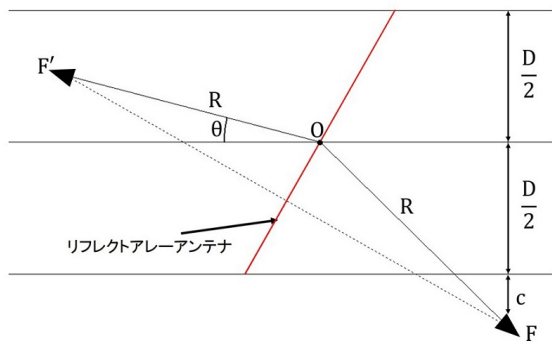


図3 リフレクタレーの幾何学的構造

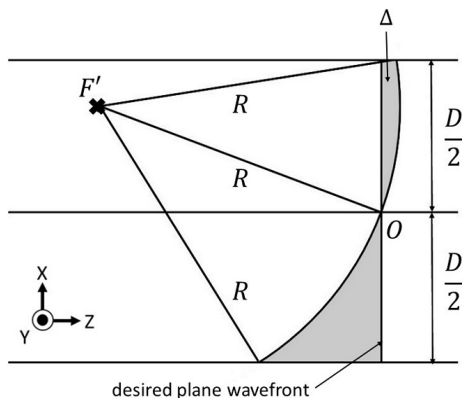


図4 簡易評価法における収差

3.2 残留収差の定性的解釈

式(9)はシングルレイヤリフレクタレーにおける残留収差周波数特性を示している。これより、 $\lambda = \lambda_0$ の場合は残留収差が発生しないため、所望の平面波面を実現することが可能である。一方、 $\lambda > \lambda_0$ の場合の残留収差は $d\Delta < 0$ となるため、リフレクタレーは残留収差を過剰に補正する。また、 $\lambda < \lambda_0$ の場合は残留収差が $d\Delta > 0$ となるため、補正は不十分となる。

図5より、一次の収差を考慮すると、図5の収差 Δ は一次の収差 Δ_1 と二次の収差 Δ_2 に分けられる。ここで、イメージホーンは開口面の中心に位置しているとする。

図6は $\lambda > \lambda_0$ の場合における残留収差が発生するメカニズムを示している。まず、一次の収差 Δ_1 について検討する。図中において、一次の収差 Δ_1 の波面 A は、周波数 f で過剰補正される。これより、一次の残留収差 $d\Delta_1$ は波面 B で表される。同様にして、二次の収差 Δ_2 の場合は、波面 C が過剰補正され、二次の残留収差 $d\Delta_2$ は波面 D によって表される。結果として、周波数 f における波面は波面 E となり、一次の残留収差によってビームシフト、二次の残留収差によって利得低下が起こる。図7はイメージホーン F' の位置が開口中心の上または下に位置する場合および、 $\lambda > \lambda_0$ または $\lambda < \lambda_0$ の場合に到達する波面をまとめたものである。

3.3 一次および二次の残留収差を考慮した簡易評価法

図8より、一次の残留収差 $d\Delta_1$ におけるイメージホーン角 θ_S は幾何学的に決定される。ここで、 L は一次の収差を推定するためのパラメータであり、以下の式で示される。

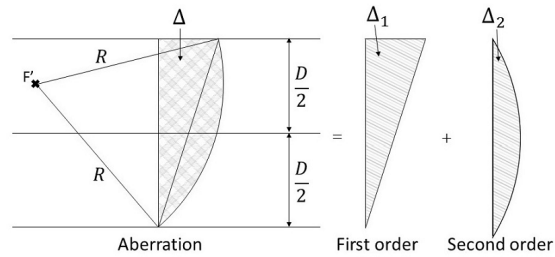


図5 一次と二次の収差

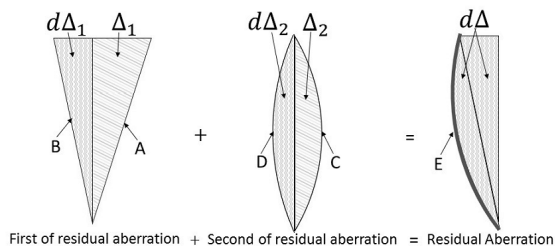


図6 残留収差が発生するメカニズム

Case	$\lambda > \lambda_0$	$\lambda < \lambda_0$

図7 到達する波面

$$L = D \tan \theta \quad (10)$$

式(9)で示した残留収差の式のうち、 Δ を式(10)で求めた L に置き換える。これより、一次の収差を推定するためのパラメータ ΔL は以下ようになる。

$$\Delta L = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} L \quad (11)$$

したがって、イメージホーン角 θ_S は以下のように求められる。

$$\theta_S = \tan^{-1} \frac{\Delta L}{D} \quad (12)$$

これらの式を整理すると、以下の式が得られる。

$$\tan \theta_S = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \tan \theta \quad (13)$$

したがって、イメージホーン角 θ_S はビームシフト角 θ に依存する。

また、二次の残留収差によって生じる位相誤差についても幾

何学的に決定される。図9より、イメージホーンは開口の中心に位置しているとする、残留収差は二次のみとなり、イメージホーン角は発生しない。図中において、 S は二次の収差を推定するためのパラメータであり、以下の式で表される。

$$S = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (14)$$

式(9)のうち、 Δ を S に置き換えることによって、二次の残留収差を推定するためのパラメータは次式となる。

$$\Delta S = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} S \quad (15)$$

二次の残留収差に起因する曲率半径 R' は以下の式で示される。

$$R' = \frac{\Delta S^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2\Delta S} \quad (16)$$

これより、二次の収差は開口面 D および曲率半径 R に依存する。二次の収差を減らすためには、曲率半径 R を大きくする必要がある。したがって、リフレクタレーにおいて R/D 比は非常に重要なパラメータであり、パラボラアンテナにおいて重要なパラメータである F/D 比と酷似している。

一次と二次の収差を考慮すると、残留収差は図10に示す点 F'_2 からの球面波面であり、 θ_s および R' によって決定される。つまり、残留収差はリフレクタレーの設計パラメータのうち、 D 、 θ および R によって決定されることがわかる。

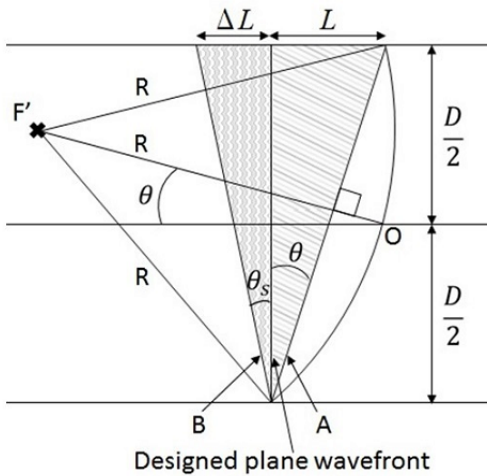


図8 一次の収差の幾何学的な構造

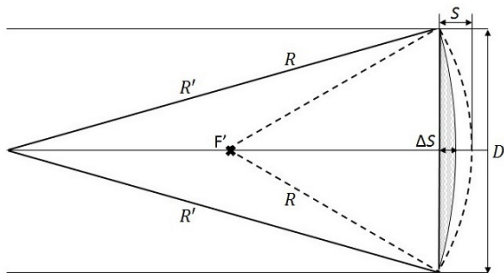


図9 二次の収差の幾何学的な構造

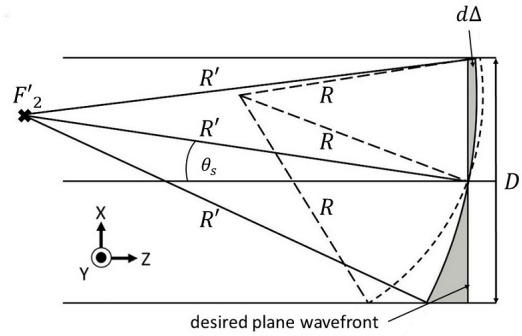


図10 簡易評価法における残留収差

4. 解析結果

4.1 解析モデル

図11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つの自由度があるパラメータがあり、今回の設計において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 、イメージホーン F' の角度 θ' を用いた。図12にリフレクタレー鏡面の設計パラメータを示す。金属素子はリング素子を用いた。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13に示す。

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

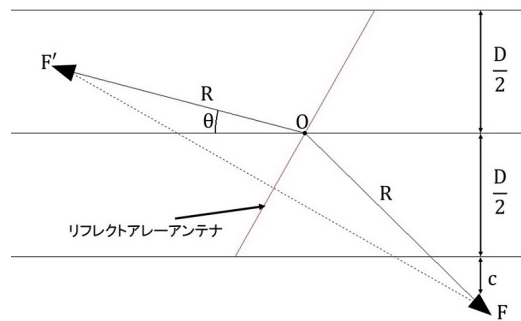


図11 リフレクタレーの鏡面構成

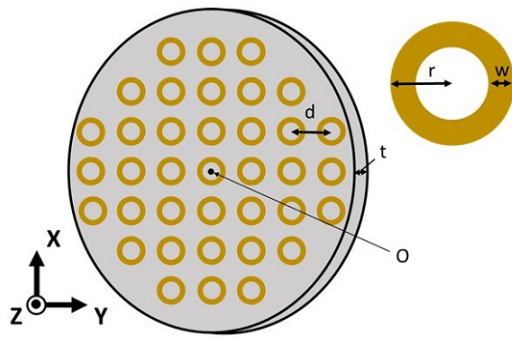


図 12 設計パラメータに対応する鏡面図

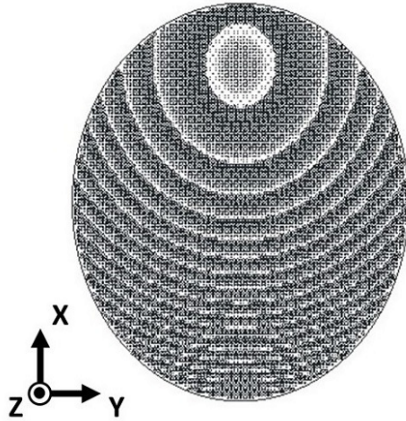


図 13 設計パラメータを用いて決定した素子配列

4.2 解析結果の比較

図 14 に残留収差周波数特性の解析結果を示す。グラフの縦軸および横軸はそれぞれ位相誤差と開口面の寸法を示しており、グラフ上の値については、緑が設計周波数 $f_0=12.0$ [GHz]、青が $f=11.0$ [GHz]、赤が $f=13.0$ [GHz] である。実線は実際に設計したリフレクタレーを解析し、その周波数特性より求めた位相誤差、破線は式 (1) を式 (9) に代入して得られた残留収差より求めた位相誤差、点線は簡易評価法を用いた位相誤差を示している。設計周波数外の残留収差において、破線で示した位相誤差は実線で示した位相誤差と概ね一致していることがわかる。一方、点線で示した位相誤差については、多少のずれはあるが、位相誤差の推定において妥当な結果が得られた。ここで示される位相誤差は理論限界値であり、金属素子の形状に関わらず適用される。

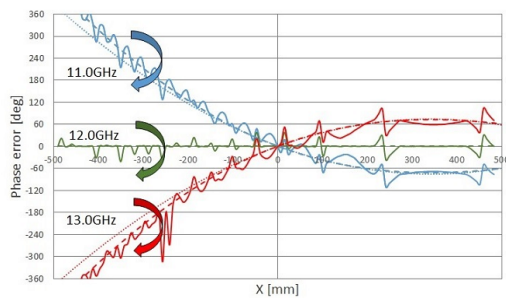


図 14 解析結果の比較

5. むすび

本論文では、リフレクタレーに入射する波面をイメージホーンから放射された半径 R の球面波と近似することにより、残留収差を一次と二次の収差に分けることが可能であることを示した。また、一次の収差と二次の収差の発生量と鏡面構成との関係性を明確にし、残留収差の簡易的な評価法について、その妥当性を検証した。結果として、位相誤差の解析結果において、設計モデルを用いた解析結果と簡易評価法を用いた解析結果の傾向が概ね一致していることから、鏡面を設計することなく、残留収差の評価が可能であることを示した。

文 献

- [1] J.Huang, et al. , " Reflectarray antennas" , Wiley, New Jersey,2007.
- [2] 琴浦 葵, 他, 信学総体, B-1-49, 2018.
- [3] 琴浦 葵, 他, 信学技報, AP2018-42, pp1-5, 2018.
- [4] M. Bozzi, et al. , " Performance Comparison of Different Element Shapes Used in Printed Reflectarrays," IEEE AWPL, vol. 2, pp. 219-222, 2003.
- [5] 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.
- [6] 琴浦 葵, 他, 信学ソ体, B-1-97, 2018.