

# リフレクトアレーアンテナにおける収差理論を用いた利得低下の簡易評価法

琴浦 葵<sup>†</sup> 牧野 滋<sup>†</sup> 須永 諄<sup>†</sup> 重光 賛志郎<sup>†</sup>  
瀧川 道生<sup>††</sup> 中嶋 宏昌<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 金沢工業大学 〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1  
<sup>††</sup> 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 本論文では、収差が回転楕円面の一部であることを明らかにし、曲率半径を球面波で近似することで残留収差および利得低下が簡易的に評価できることを示す。

キーワード リフレクトアレーアンテナ, 収差理論, 残留収差, 利得低下

## A simple evaluation method of gain loss using aberration theory in reflect array antenna

Aoi KOTOURA<sup>†</sup>, Shigeru MAKINO<sup>†</sup>, Yoshimi SUNAGA<sup>†</sup>, Sandhiro SHIGEMITSU<sup>†</sup>, Michio TAKIKAWA<sup>††</sup>, and Hiromasa NAKAJIMA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Kanazawa Institute of Technology Ohgigaoka 7-1, Nonoichi, Ishikawa, 921-8501 Japan  
<sup>††</sup> Mitsubishi Electric Corporation Ofuna 5-1-1, Kamakura, Kanagawa 247-8501 Japan  
E-mail: †b1403455@planet.kanazawa-it.ac.jp

**Abstract** In this paper, it is clarified that the aberration is a part of the spheroidal surface, and it is shown that residual aberration and gain loss can be easily evaluated by approximating the radius of curvature with a spherical wave.

**Key words** Reflectarray antenna, Aberration theory, Residual aberration, Gain loss

### 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アンテナである。一般的に、誘電体基板上に配置された金属素子を用いて一次放射器から放射された球面波と所望の平面波面との光路差を制御し、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、収差を球面波に近似することで簡易的な残留収差の評価が可能であることを示した[1]。

本論文では、より厳密な残留収差を評価することで収差が回転楕円面の一部であることを示すとともに、簡易的な利得低下の評価が可能であることを示す。

### 2. リフレクトアレーが補正する収差

図1にオフセットリフレクトアレーの幾何学的な構成を示

す。図中の  $F$  は一次放射器の位置、 $F'$  はリフレクトアレーによるイメージの一次放射器（以下、イメージホーン）の位置、 $O$  はリフレクトアレーの中心である。この場合、設計パラメータには4つの自由度があり、それぞれ開口径  $D$ 、 $O$  から  $F$  までの距離  $R$ 、直線  $OF'$  と、 $O$  を通りビーム方向に伸びる直線との角度  $\theta$ 、ブロッキングにならないためのクリアランス  $c$  である。 $F'$  は  $R$  と  $\theta$  によって決定され、 $F$  は  $D$ 、 $R$  および  $c$  により決定される。

図1より、一次放射器から放射された球面波はリフレクトアレーで反射され、球面波として放射される。この場合、球面波はイメージホーン  $F'$  から放射される球面波と同等である。この球面波面と所望の平面波面との光路差を収差  $\Delta$  とする。図2より、 $r$  を一次放射器からリフレクトア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  $\Delta$  は次式で示される。

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

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

厳密には、補正すべき  $\Delta$  は式 (1) で示した収差であるが、図 3 の  $\Delta$  で示すように、従来の簡易評価法に用いる  $\Delta$  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。ここで、所望の平面波面は開口の中心を通るビームの放射方向に向かう直線上にある。このとき、 $\Delta$  は以下の球面波の式で示すことができる。

$$\left(\frac{x-x_0}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta-z_0}{R}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

ここで、式 (2) に用いられるパラメータは以下で表される。

$$x_0 = R \sin \theta \quad (3)$$

$$z_0 = -R \cos \theta \quad (4)$$

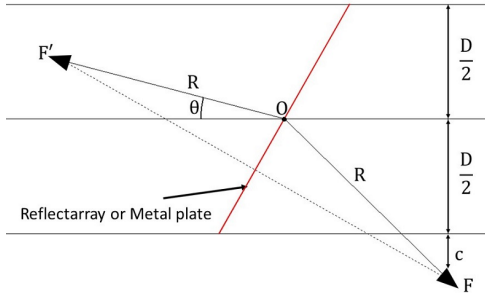


図 1 リフレクタレーの幾何学的構造

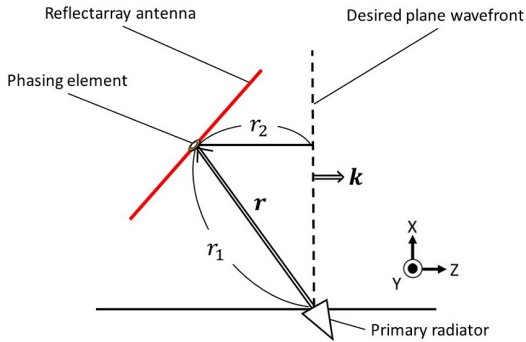


図 2 収 差

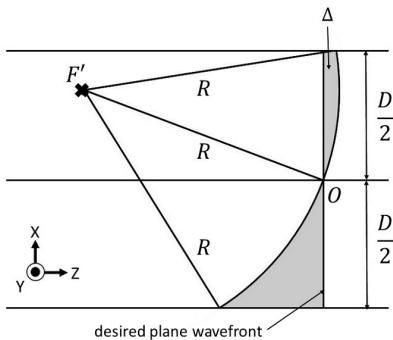


図 3 従来の簡易評価法における収差

### 3. 残留収差の導出

図 4 に本論文で提案する新簡易評価法（以下、新簡易法）の  $\Delta$  および残留収差  $\delta$  の定性的な図を示す。

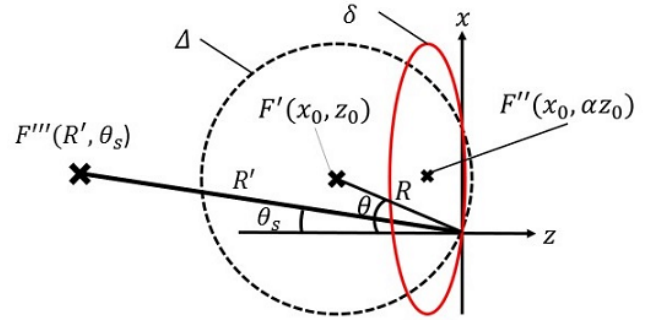


図 4 新簡易法における  $\Delta$  および  $\delta$

$\Phi$  を反射位相の周波数特性、 $\Phi_0$  を設計周波数における反射位相とすると、式 (5) はリフレクタレーアンテナにおける理想的な反射位相の周波数特性を示している。

$$\Phi(f) = \Phi_0 \quad (5)$$

式 (5) より、位相誤差に対応する残留収差は式 (6) で与えられる [1]。この式はゾーニングに関係なく適用される。

$$\delta = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \Delta = \alpha \Delta \quad (6)$$

これより、式 (6) を式 (2) で示される  $\Delta$  に置き換えることで次式が得られる。

$$\left(\frac{x-x_0}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{\delta - \alpha z_0}{\alpha R}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

したがって、残留収差  $\delta$  は  $F''$  を中心とする回転楕円面の一部であることがわかる。また、ビームシフト角  $\theta_s$  は以下の式で示される。

$$\tan \theta_s = -\left. \frac{d\delta}{dx} \right|_{x=0} = -\alpha \tan \theta \quad (8)$$

残留収差を球面波で近似すると、波面の曲率半径  $R'$  は以下の式で示される [2]。

$$\begin{aligned} R' &= \left. \frac{(1 + (\frac{d\delta}{dx})^2)^{\frac{3}{2}}}{d^2\delta/dx^2} \right|_{x=0} \\ &= -\frac{R(\cos^2 \theta + \alpha^2 \sin^2 \theta)^{\frac{3}{2}}}{\alpha} \approx -\frac{R}{\alpha} \cos^3 \theta \end{aligned} \quad (9)$$

また、 $\theta = 0$  のとき、 $R'$  は以下の式となる。

$$R' = -\frac{R}{\alpha} \quad (10)$$

これより、残留収差  $\delta$  は  $R'$  および  $\theta_s$  で決まる点  $F'''$  から放射される球面波であると近似できる。また、新簡易法では  $R$  と  $\theta$  の 2 つのパラメータで残留収差の評価が可能である。

### 4. 利得低下量の導出

アンテナ開口を  $\rho$ ,  $\psi$  の極座標で表し、振幅分布をガウス分

布とすると開口分布  $E_a$  は次式で示される。

$$E_a(\rho) = e^{-a\rho^2} e^{-jk\frac{\rho^2}{2R'}} \quad (11)$$

ここで、エッジレベルを  $-Ee[\text{dB}]$  とすると、 $a$  は次式で示される。

$$a = \frac{Ee}{8.68\left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (12)$$

このとき半径  $R'$  の残留収差における利得低下  $G_a$  は以下の式で示される。

$$G_a = \frac{\left| \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{2\pi} e^{-a\rho^2} e^{-jl\frac{\rho^2}{2R'}} \rho d\rho d\psi \right|^2}{\left| \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{2\pi} e^{-a\rho^2} \rho d\rho d\psi \right|^2} = \frac{a_1^2 e^{-2a_1} - 2e^{-a_1} \cos a^2 + 1}{a_1^2 + a_2^2 (e^{-a_1} - 1)^2} \quad (13)$$

ここで、 $a_1$  および  $a_2$  は式 (14)、式 (15) で示される。

$$a_1 = a\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{Ee}{8.68} \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{k}{2R'}\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{R'\lambda}\left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (15)$$

式 (13) より、 $R/D$  比を変化させた計算結果を以下に示す。 $\theta = 0[\text{deg}]$  とし、図 5 は  $R = 20\lambda$  に対し、 $R/D$  比を 0.5~2 まで、図 6 は  $D = 20\lambda$  に対し、 $R/D$  比を 0.5~2 まで変化させている。ここでグラフの縦軸は利得低下、横軸は周波数を示している。

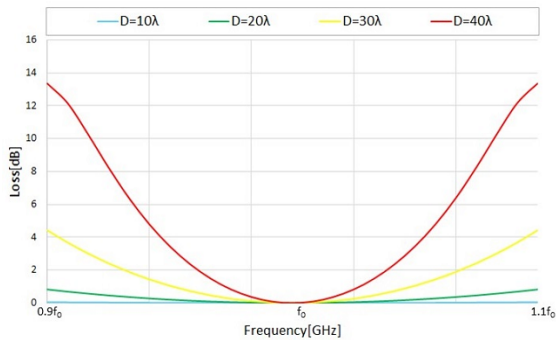


図 5  $R = 20\lambda$  で  $R/D$  比を変化させた場合の利得低下

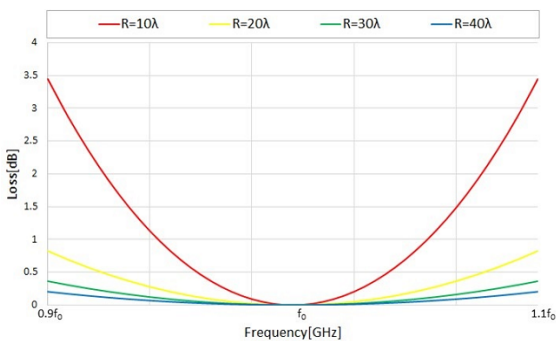


図 6  $D = 20\lambda$  で  $R/D$  比を変化させた場合の利得低下

この結果より、本論文で提案した利得低下の簡易評価法は  $R$ 、 $D$  および  $\theta$  の 3 つのパラメータのみで決定され、簡易的に利得低下の評価が可能であることがわかる。

## 5. 位相誤差の解析結果

解析モデルにおける設計パラメータを表 1 に示す。また、設計パラメータに対応する箇所を図 1、このパラメータで設計した解析モデルを図 7 に示す。また、図 8 に解析結果を示す。ここでグラフの縦軸は位相誤差、横軸は開口面の寸法を示しており、緑が設計周波数  $f_0=12.0[\text{GHz}]$ 、青が  $f=11.0[\text{GHz}]$ 、赤が  $f=13.0[\text{GHz}]$  である。それぞれ実線が解析結果、点線が式 (1) で求めた厳密な収差から導出した位相誤差、破線が新簡易法を用いた位相誤差である。この結果より、厳密な収差から導出した残留収差は、実際の解析結果と同等な位相誤差であることがわかる。また、楕円の曲率半径を球面波と近似した新簡易法は、鏡面中心において厳密な収差に近い位相誤差となった。

表 1 解析モデルの設計パラメータ

設計周波数 $f_0[\text{GHz}]$	12.0
開口径 $D[\text{mm}]$	1000.0
一次放射器から鏡面までの距離 $R[\text{mm}]$	1000.0
クリアランス $c[\text{mm}]$	200.0
イメージホーン角 $\theta[\text{deg}]$	20.0
誘電体基板厚 $t[\text{mm}]$	3.2
比誘電率 $\epsilon_r$	2.59
共振素子間隔 $d[\text{mm}]$	9.2
リング半径 $r$	0.3~4.3
リング幅 $w[\text{mm}]$	0.2

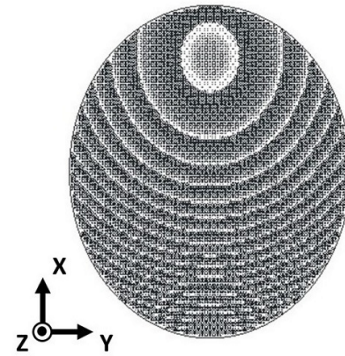


図 7 解析モデル

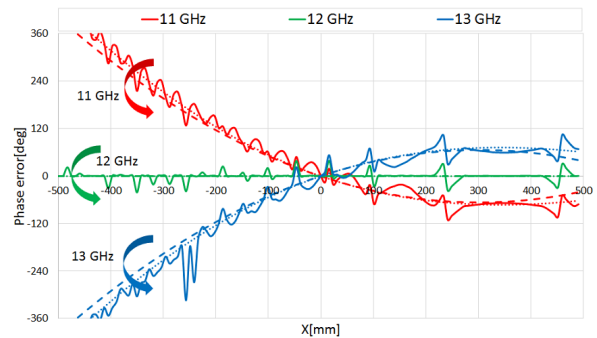


図 8 位相誤差の解析結果

## 6. 利得低下の測定結果との比較

実験モデルにおける設計パラメータを表2に示す。設計パラメータに対応する箇所を図1、このパラメータで設計した製作モデルを図9に示す。また、図10に解析結果を示す。ここでグラフの縦軸は利得低下、横軸は周波数を示している。また、赤の点線は利得損失のみを抽出した測定値[3]、赤の実線は測定値における補正值を示しており、青の実線は解析結果を示している。測定値では、誘電体の比誘電率の誤差による周波数シフトが発生した。そのため、計算結果と補正值とを比較する。また、解析値と測定値における補正值との利得低下の差は位相誤差によるものであると推測される。図10より、計算結果と測定結果のグラフにおいて、利得低下の周波数特性を示すカーブは概ね一致しており、利得低下の推定において妥当な結果が得られたといえる。

表2 実験モデルの設計パラメータ

設計周波数 $f_0$ [GHz]	12.0
開口径 $D$ [mm]	500.0
一次放射器から鏡面までの距離 $R$ [mm]	450.0
クリアランス $c$ [mm]	94.72
イメージホーン角 $\theta$ [deg]	0.0
誘電体基板厚 $t$ [mm]	3.2
比誘電率 $\epsilon_r$	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

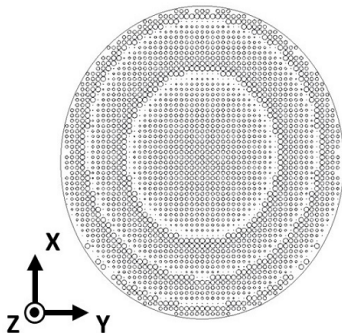


図9 実験モデル

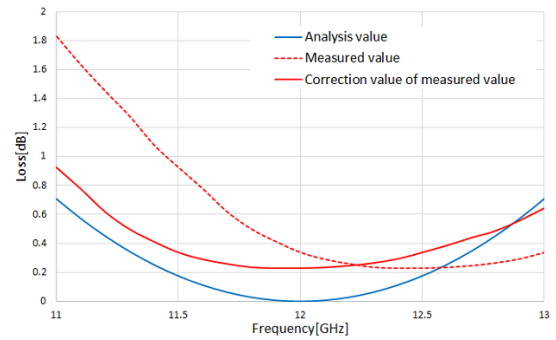


図10 利得低下の解析結果

## 7. むすび

本論文では、残留収差をより厳密に評価することにより、収差が回転楕円体の一部であることを示した。回転楕円面を用いて導出された残留収差を球面波に近似することにより、簡易かつ厳密に残留収差を評価することが可能であることを示した。従来の簡易評価法では4つのパラメータを用いたが、今回提案した新簡易法は $R$ と $\theta$ の2つのパラメータのみで位相誤差の評価が可能であり、従来の評価方法と同等の残留収差となった。今回提案した新簡易法における位相誤差は、設計の前の段階における残留収差の評価において妥当な結果であり、鏡面中心での結果は、厳密な収差を用いて導出した位相誤差とほぼ同等である。

また、開口分布法を用いた利得低下の簡易的な評価方法を提案し、その妥当性を検証した。今回提案した利得低下の簡易評価法は $D$ 、 $R$ および $\theta$ の3つのパラメータのみで評価が可能であり、実験モデルに使用した誘電体基板における比誘電率と設計時に用いた比誘電率との誤差から発生した周波数シフトを考慮し、解析値と測定値を比較した。その結果、実際の測定値における利得低下量と解析値における利得低下量はほぼ同等であり、今回提案した簡易評価法における利得低下は、設計の前の段階における利得低下の評価において妥当な結果であることを示した。

## 文 献

- [1] S.Makino. et al., EUCAP2017, Mar, 2017.
- [2] 安達忠次 (1976)『微分幾何学概説』培風館.
- [3] 竹島健飛, 他, 信学技報, AP2016-47, 2017.