

成形ビームを放射するリフレクトアレーアンテナにおける 周波数特性の評価方法

深谷 芽衣[†] 牧野 滋[†] 琴浦 葵[†] 須永 諄[†]
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: [†]b1515521@planet.kanazawa-it.ac.jp

あらまし 従来のリフレクトアレーアンテナの設計法では、周波数特性を解析する際に膨大な時間を要していた。本論文では、リフレクトアレーアンテナを用いた成形ビームアンテナの周波数特性を、簡易的に評価する方法を提案し、有効性を検討した。結果として、収差理論を用いて実現可能な理想の周波数特性を求めることで、解析は数分で完了することがわかった。また、周波数特性を考慮した成形ビーム設計において有効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, 簡易法, 成形ビーム

Frequency Characteristic Evaluation of Reflectarray Antenna Radiating Shaped-Beam

Mei FUKAYA[†], Shigeru MAKINO[†], Aoi KOTOURA[†], 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: [†]b1515521@planet.kanazawa-it.ac.jp

Abstract In the conventional design method of reflect array antenna, it took a huge amount of time to analyze the frequency characteristics. In this paper, we propose a simple method to evaluate the frequency characteristics of a shaped beam antenna using a reflect array antenna, and investigated its effectiveness. As a result, we found that the analysis can be completed in a few minutes by finding the ideal frequency characteristics that can be achieved using aberration theory. Moreover, it is shown that it is effective in the designing beam design considering the frequency characteristics.

Key words Reflect array antenna, Simple method, Shaped beam

1. はじめに

リフレクトアレー [1] は金属装荷 FSR(Frequency Selective Reflector: 周波数選択鏡) が有する反射位相制御機能を反射鏡に適用したものであり、その反射素子の半径や形状を適切に選ぶことにより、一次放射器から放射された球面波の反射位相を制御して、平面波を形成することができる。任意の方向にビームを向けられるほか、最近では成形ビームへの適用も検討されている。また、リフレクトアレーをオフセットパラボラアンテナ(以下、パラボラ)と比較すると、リフレクトアレーは鏡面が平面であるため、大幅なコスト削減と製造工程の短縮が可能

である。さらに、鏡面が曲面であるパラボラに比べて交差偏波の発生量が少なくなる。よって、リフレクトアレーは、パラボラの代替としての利用が期待される。

一方で、リフレクトアレーは所望の反射位相を満足するような素子設計を行った後、その共振素子を用いて周波数特性を評価している。したがって、素子の数が多くなるほど素子設計や周波数特性を計算するのに膨大な時間がかかってしまう。収差理論 [2] を応用することにより、開口上の位相誤差の周波数特性を簡易的に評価する方法が報告されており [3] [4]、ペンシルビームのアンテナにはすでに簡易法が適用できることが示されている [5]。

本報告では、ビーム形状が複雑な成形ビームのアンテナ設計における周波数特性の評価への簡易法の適応の可能性を検討し、設計にかかる時間の大幅な短縮が可能であることを示す。

2. 従来法

2.1 成形ビームの設計

日本列島を効率よく覆う成形ビームについて考える。図1に示すように、サービスエリアは面であるが、成形ビームを設計する際には、サービスエリア内における評価点を用いる。一般的には等間隔に評価点を配置するが、場合によっては、サイドローブやアイソレーションを下げるために、サービスエリア付近に評価点を設定する必要がある。具体的な周波数特性の評価手順を示したものを図2に示す。評価点を決めると、評価関数 F が最小となるようなリフレクタレーを構成する金属素子の反射位相が決定する。反射位相が決まると各評価点の利得が決まり、所望の反射位相を実現する素子設計を行い、決定した素子より反射位相の周波数特性を解析する。得られた所望の反射位相から放射パターンを解析し、放射パターンの周波数特性を確認する。あくまでサービスエリアの形状は関係なく、設計に必要なのは評価点のみである。つまり、評価点の数と位置の決定が、反射位相の周波数特性に関わり、直接設計に影響する。従来法では、放射パターンの周波数特性が良くない場合は、評価点の数と位置を再度与え、同様の手順で繰り返し周波数特性の評価を行わなければならない。周波数特性が良ければ、得られた反射位相を用いてリフレクタレーを設計する。

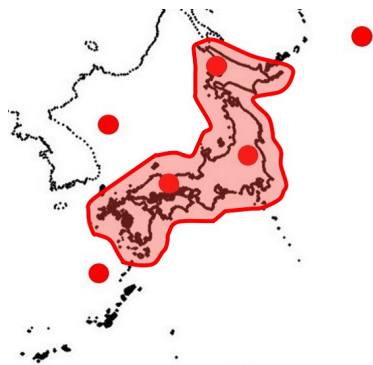


図1 日本列島におけるサービスエリアおよび評価点

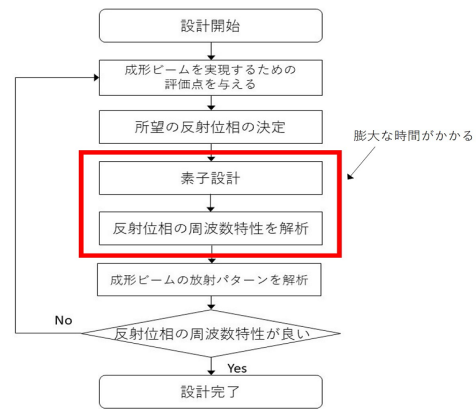


図2 従来法の設計手順

2.2 反射位相の最適化

図1に示している日本列島における評価点 p は (ξ, η) で決まる。 G_p は評価点 p の方向における利得関数であり、評価点と各素子の反射位相が決まることで、計算される。

従来法では、最急降下法を用いて、評価関数 F が最小となるようなリフレクタレーを構成する金属素子の反射位相を決定する。評価関数 F を式(1)に示す。

$$F = \sum_{p=1}^P W_p (G_p - G_0)^2 \quad (1)$$

P 個の評価点 p を設定し、それに対する要求利得 G_0 および利得の重み W_p を設定する。 G_p は反射位相の関数であり、 G_p が G_0 と近づくほど F は小さくなるため、 F が最小のとき、最適な反射位相となることがわかる。成形ビームの場合は評価点が複数あるため、評価点の与え方が異なれば、反射位相も放射パターンの周波数特性も変化する。与え方が悪ければ、放射パターンの周波数特性も悪くなるので、最適なビームが得られるまで評価点 p および要求利得 G_0 のパラメータを変更しビーム設計を繰り返す必要がある。評価点の素子の反射位相の周波数特性があらかじめ予測がつくのであれば、素子の設計および周波数特性解析の手順を省くことができる。

また、評価関数 F を最小とするような反射位相を決定する最急降下法は、傾きの情報だけをもとに探索する単純なアルゴリズムであるため、計算負荷が小さいが、収束については他の最適化手段よりも遅くなるという点がある。しかしながら、初期値に関わらず局所解または最適解に収束するという特徴があり、これまでの研究によって、リフレクタレーの反射位相最適化には最急降下法が適していることがわかっている。

2.3 従来法の問題点

リフレクタレーの設計において、開口径 500mm の成形ビームのリフレクタレーの鏡面の場合、素子数は Ka 帯の設計周波数 28.75GHz で 13310 個となる。高周波になるほど素子数は増加する傾向にある。素子設計では、これらの素子 1 つずつを設計するため、所要時間は素子数に比例する。反射位相の周波数特性を解析する際においても、素子 1 つずつを解析しなければならないため、解析時間は素子数に比例して増える。Ka 帯の成形ビーム設計リフレクタレーにおいて、素子設計

の所要時間は約 118 時間、反射位相解析では、所要時間が各周波数で平均約 8 時間 30 分となった。このように、従来法を用いた周波数特性の評価では、1 つの反射位相の周波数特性評価に膨大な時間が必要である。さらに、図 3 に示すように、設計周波数 28.75GHz ではビーム形状が保たれているが、27.5GHz においてビーム形状が崩れる場合など、設計周波数からずれた任意の周波数における周波数特性が良くなければ、評価点を再度与えなければならない。成形ビームにおける所望の反射位相の決定は非線形的な問題であるため、周波数特性の良い反射位相が得られるまで、図 2 の手順を何度も繰り返す必要がある。

したがって、効率よくサービスエリアを覆う成形ビームを設計するには、膨大な計算時間を削減する必要がある。図 2 に示す素子設計と反射位相の周波数解析の膨大な計算を必要としない、周波数特性を簡易的に評価する新たな方法を 3 節に提案する。

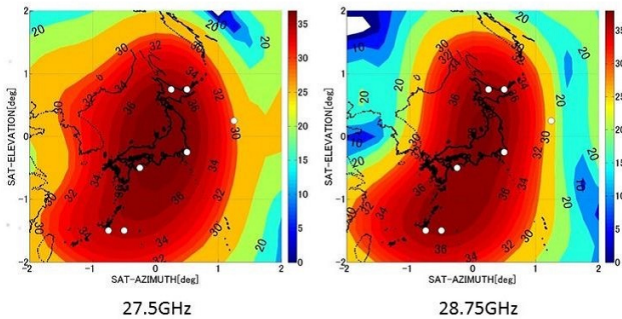


図 3 悪い周波数特性例

3. 簡易法

3.1 反射位相の周波数特性

実現可能な理想の反射位相を用いた簡易法を示す。収差理論から、実現可能な反射位相の理論限界を式 (2) に表す。ここで、 Φ_0 は所望の反射位相、 $\Phi(f)$ は設計周波数 f_0 からずれたときの反射位相である。

$$\Phi(f) = \Phi_0 \quad (2)$$

式 (2) から、設計周波数 f_0 における所望の反射位相から任意の反射位相を知ることができるため、これまで各素子の反射位相を計算するために行っていた素子の設計および、各素子の反射位相の計算が不要になる。よって、膨大な数の素子の設計および反射位相解析に費やしていた時間の、大幅な時間短縮が可能となる。

3.2 簡易法の妥当性検討

ペンシルビーム設計のリフレクタレーにおける開口面の位相誤差周波数特性を図 4 に示す。破線は従来法、実線は簡易法を用いて解析した位相誤差を示している。ここで設計周波数 F_0 は 12.0GHz、開口径 D は 1000mm である。図 4 より、従来法は解析値にリップルが見られる。一方簡易法では、リップルのないグラフとなる。しかし、従来法および簡易法における位相誤差の周波数特性の傾向は概ね一致していることから、放射パ

ターンに影響はなく、簡易法はペンシルビーム設計において妥当性があることが判明した。これより、従来法の周波数特性評価では 1 周波で数百時間を要するのに対し、簡易法では周波数特性評価を数分に短縮することが実現できた。

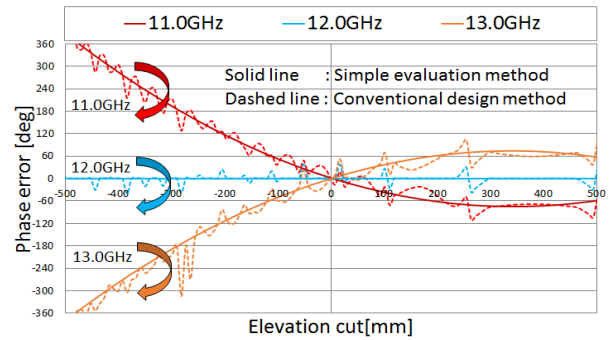


図 4 Ku 帯ペンシルビーム設計リフレクタレーの開口面における位相誤差の周波数特性

4. 成形ビーム

4.1 成形ビームを放射するリフレクタレーの設計

従来法および簡易法の解析に用いた設計パラメータを表 1、それに対応する鏡面系を図 5 に示す。

表 1 所望の反射位相の設計パラメータ

設計周波数 f_0 [GHz]	28.75
誘電体基板厚 t [mm]	1.53
誘電体の比誘電率 ϵ_r	2.56
鏡面の傾き d [deg]	25
開口面の中心 $O(x,y,z)$	344.72, 0, -289.26
リング幅 w [mm]	0.1
リング径 r [mm] (start, end, stop)	0.15, 1.85, 0.01
共振素子間隔 d [mm]	4.0
開口面の大きさ D [mm]	500
一次放射器から開口面の中心までの距離 R [mm]	450
クリアランス c [mm]	94.72

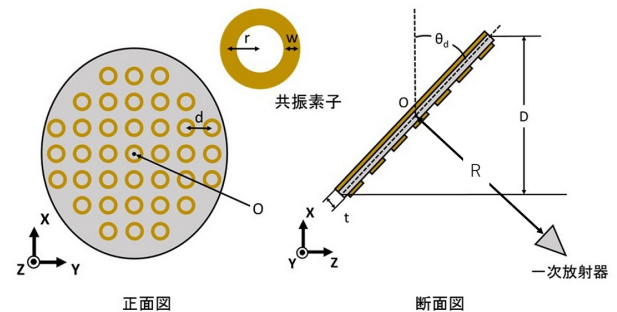


図 5 鏡面系の設計パラメータ

評価関数 F に用いた各パラメータを表 2、2.1 節の方法で決定した評価点および要求利得を図 6 に示す。成形ビームは形状が複雑であるため、評価点に対応する要求利得が 2 通り存在する。



図 6 評価点 p および要求利得

表 2 所望の反射位相の設計パラメータ

設計周波数 f_0 [GHz]	28.75
評価点の個数 P[個]	6
要求利得 G_0 [dBi]	35, 28
利得の重み	1, 5

4.2 従来法および簡易法の比較

従来法および簡易法で解析した所望の反射位相の周波数特性を図 7, 図 8, 図 9 に示す。これより, 簡易法の結果において設計周波数 28.75GHz のビームは, 最小周波数 27.5GHz および最大周波数 30.0GHz においても形状を保っている。さらに, 従来法と簡易法の解析結果を比較すると, すべての周波数においてビーム形状は概ね一致している。

解析結果を用いて, 各評価点における利得をグラフに表したものを図 10 に示す。各評価点の番号は図 6 の各番号と対応している。図 10 では, 破線が従来法, 実線が簡易法とする。全ての地点で従来法および簡易法における利得の差は ± 1 dB と少なく, 従来法および簡易法で得られる利得はほぼ一致しており, 簡易法は成形ビーム設計において有効性があることがわかる。

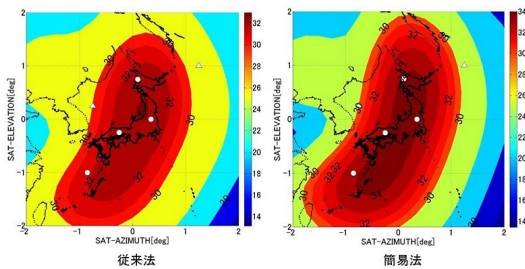


図 7 従来法および簡易法での 27.5GHz 放射パターン

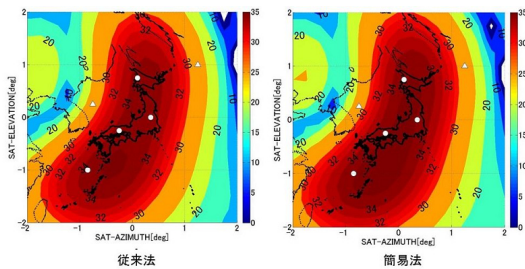


図 8 従来法および簡易法での 28.75GHz 放射パターン

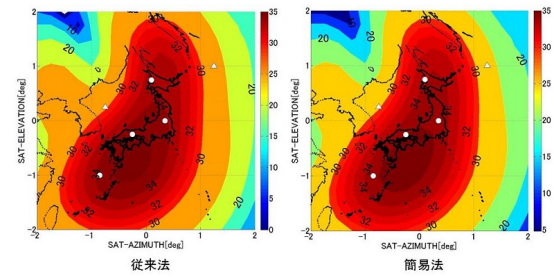


図 9 従来法および簡易法での 30.0GHz 放射パターン

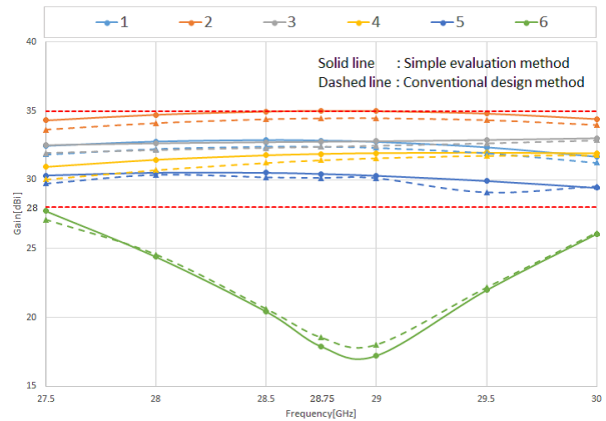


図 10 従来法および簡易法における各評価点の利得の周波数特性

5. 結 論

本報告では, 成形ビームにおいて従来法から素子設計および反射位相の周波数特性の解析を省いた簡易法が有効であることを明らかにした。取差理論を適用し, 所望の反射位相より周波数特性を評価できることが判明した。これにより, 従来法で必要だった素子設計および反射位相の解析が不要となり, 周波数特性の評価における大幅な時間短縮が実現できることを示した。

文 献

- [1] J.Huang, J.A.Encinar, "Reectarray antennas", Wiley, New Jersey, 2007.
- [2] S. Makino. et al., "Estimation of Frequency Characteristics of Reect-array by Introducing Aberration Theory," EUCAP, Paris, France, March 2017.
- [3] 琴浦 葵, 竹島 健飛, 牧野 滋, 瀧川道生, 中島 宏昌, "リフレクトアレーの周波数特性におけるゾーニングの影響" 信学総大, B-1-49, 2018.
- [4] 琴浦 葵, 牧野 滋, 竹島 健飛, 須永 諄, 瀧川道生, 中島 宏昌, "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" 信学技報, IEICE-AP2018-42,
- [5] 須永諄, 竹島健飛, 牧野滋, 塩出剛士, 瀧川道生., "取差理論を用いたリフレクトアレーアンテナのマルチビーム設計法" 信学総体, B-1-63, 2017. pp1-5, 2018.