

複数の周波数で最適化した成形ビーム リフレクトアレーアンテナ

重光 賛志郎[†] 牧野 滋[†] 瀧能翔太[†]

[†] 金沢工業大学 〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1

E-mail : [†] b1600502@planet.kanazawa-it.ac.jp,

あらまし これまでの研究では、リフレクトアレーアンテナにおいて収差理論を応用することにより、リフレクトアレーアンテナの周波数特性を解析する際に必要な時間を大幅に短縮することができた。しかし、従来の設計法では、適切な評価点を選択しないと周波数特性が悪くなるという欠点がある。本研究では従来の評価関数の式を改良し、中心周波数以外の周波数を含んだ3周波数での最適化した成形ビームリフレクトアレーアンテナを設計、試作した。結果として、サービスエリアをカバーするビームを確保することができ、複数の周波数での最適化を行う手法の有用性が示された。

キーワード リフレクトアレーアンテナ, 簡易評価法, 成形ビーム, 収差理論

Shaped-Beam reflectarray antenna optimized for multiple frequency

Sanshiro SHIGEMITSU[†] Shigeru MAKINO[†] Shota TAKINO[†]

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

E-mail : [†] b1600502@planet.kanazawa-it.ac.jp, [‡] makino@neptune.kanazawa-it.ac.jp

Abstract In our previous research, by applying the aberration theory in the reflectarray antenna, the time required to analyze the frequency characteristics of the reflectarray antenna has been significantly reduced. However, the conventional method has the disadvantage of poor frequency characteristics if the appropriate evaluation point is not selected. In this study, we improved the conventional evaluation function equation and designed and fabricated a shaped-beam reflectarray antenna that is optimized for three frequencies other than the center frequency. As a result, we were able to secure a beam that covered the service area, demonstrating the usefulness of the method for optimization at multiple frequencies.

Key words Reflectarray antenna, Simple evaluation method, Shaped-Beam, aberration theory

1. まえがき

リフレクトアレーアンテナ[1](以下、リフレクトアレー)は、誘電体基板の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り、反射素子の大きさ並びに形状を適切に選択することにより、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ことができるため、最近では成形ビームへの適用も検討されている。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。リフレクトアレーは平面構造をしているため、製造にかかるコストが削減できることと、製造工程の短縮が可能である。さらに、パラボラに比べて、交差偏波の発生量が少なくなる。

成形ビームアンテナでは、共振素子の反射位相は、必要な利得を満たすよう非線形最適化手法を使用し決定する必要がある。以前の研究[2]では、収差理論[3]を応用することにより実現可能で理想的な反射位相の

周波数特性を簡易的に評価できる手法(以下,簡易評価法)を使用して成形ビームリフレクタレーアンテナの設計を行っていた.簡易評価法は,中心周波数における所望の反射位相が周波数にかかわらず一定としているため素子の設計や周波数特性の解析を行うことなくアンテナの評価を行える.

しかし,従来の簡易評価法を用いて設計をしていた成形ビームリフレクタレーアンテナは中心周波数でのみ最適化がされており,適切な評価点を選択しないと放射パターンの周波数特性が悪くなるという欠点がある.

本研究では,従来の評価関数の式を改良して中心周波数以外での任意の数の周波数を含めた最適化を行い,複数の周波数で最適化された成形ビームを放射するリフレクタレーアンテナの設計,試作をし,その有効性を示す.

2. 成形ビームの設計

2.1. 設計手順

日本列島を効率良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.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共振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定し,所望の反射位相を実現する素子設計を行った後,決定した素子より反射位相の周波数特性を解析する.次に,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.ここで,サービスエリアの形状は関係なく,設計に必要なパラメータ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依存する.



図1 日本列島におけるサービスエリアおよび評価点

2.2.簡易評価法

従来の設計手順では,素子設計と共振素子の反射位相周波数特性を解析する手順に大幅な解析時間を要しており,Ka帯の場合,素子設計にかかる時間が約120時間,反射位相の周波数特性の解析時間を約8時間要していた.そこで,簡易的に周波数特性を評価できる簡易評価法が提案されている.

実現可能で理想的な反射位相を用いた簡易評価法を示す.反射位相の周波数特性を $\Phi(f)$, 中心周波数 f_0 における反射位相を $\Phi(0)$ とする.式(1)に位相誤差のない理想的な条件を示す.

$$\Phi(f) = \frac{f}{f_0} \Phi_0 \quad (1)$$

$\Phi(0) > 0$ が正, $\Phi(0) < 0$ が負であり,本検討で用いられているシングルレイヤー素子の反射位相制御機能は $-\pi \leq \Phi_0 \leq \pi$ であるため, Φ_0 と同じ符号の傾きを持った周波数特性が必要となる.しかし,素子の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,式(1)の $-\pi \leq \Phi_0 \leq 0$ の範囲でしか満足することが出来ない.したがって,シングルレイヤー素子の実現可能で理想的な反射位相の周波数特性は式(2)のように示すことができる.

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

式(2)を適用することにより,中心周波数 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を可能となる.

3.新設計法

従来の簡易評価法を用いた成形ビーム設計では素子の反射位相の周波数特性が理想的な条件のもと,鏡面設計を行っていたが中心周波数 f_0 において最適なビーム形状となるよう設計していたため,中心周波数 f_0 以外の周波数についてはビーム形状の保証はされていなかった.共振素子の反射位相が周波数にかかわらず一定であるという理想的な条件にすることによって任意の数の周波数を含めた最適化が可能となる.任意の数の周波数を最適化する評価関数 F の式を以下に示す.

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P W_{ip} (G_{ip} - G_{0p})^2 \quad (3)$$

P 個の評価点 p を設定し,それに対する要求利得 G_{0p} および利得の重み W_{ip} を設定する. G_{ip} が G_{0p} と近づくほど F は小さくなるため, F が最小の時,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．サービスエリアを効率よく覆うような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_{0p} のパラメータを変更しビーム設計を繰り返し行う必要がある．

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アンテナ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．

4. 成形ビーム

4.1 成形ビームリフレクタレーアンテナの設計

新設計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 2 に示す．評価関数 F に用いたパラメータを表 2 に示し、決定した評価点の配置図を図 3 に示す．

表 1 成形ビームの設計パラメータ

設計周波数帯域	Ka
誘電体基板厚 : t	0.15λ
比誘電率: ϵ_r	2.56
鏡面の傾き : θ [deg]	25
開口面の中心 : $O(x,y,z)$	$344.72, 0, -289.26$
リング幅 : w	0.096λ
リング径 : r	$0.14 \lambda \sim 1.77 \lambda$
開口径 : D	47.92λ
一次放射器から開口面の中心までの距離 : R	43.13λ
共振素子間隔 : d	0.383λ
クリアランス : c	9.077λ

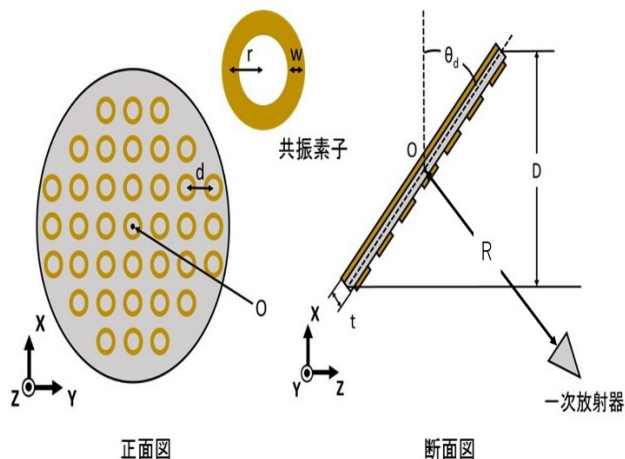


図 2 鏡面系の設計パラメータ

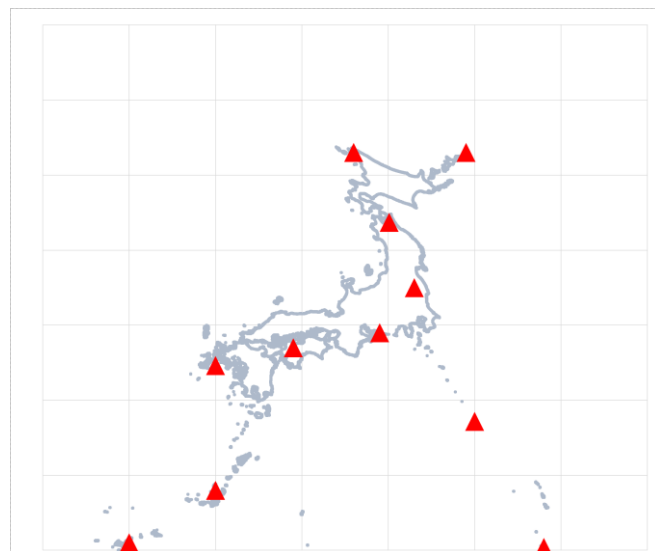


図 3 評価点

表 2 所望の反射位相の設計パラメータ

評価点の個数 P [個]	11
要求利得 G_{ip}	35
利得の重み W_{ip}	1

4.2 従来設計および新設計の比較

従来の 1 周波数のみ考慮した設計の放射パターンの解析結果および 3 周波数で最適化した新設計法の放射パターンの解析結果を図 4, 図 5, 図 6 に示す．低周波数側 ($f=0.957f_0$) は図 4, 中心周波数 ($f=f_0$) は図 5, 高周波数側 ($f=1.043f_0$) は図 6 に対応している．

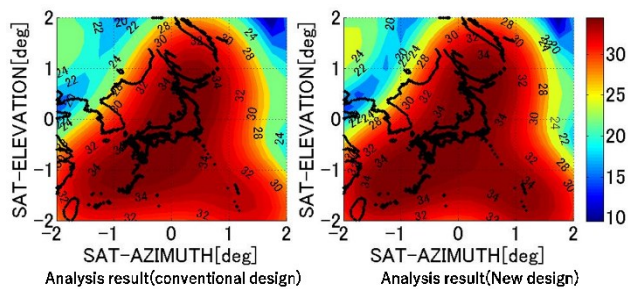


図 4 $f=0.957f_0$ 放射パターン

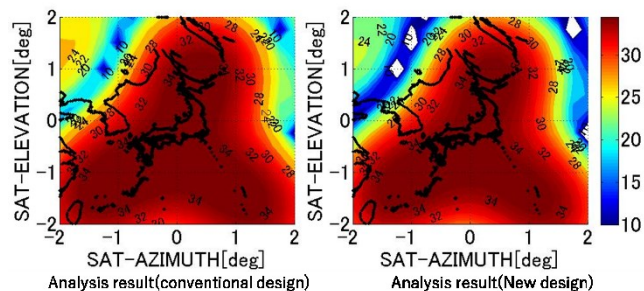


図 5 $f=f_0$ 放射パターン

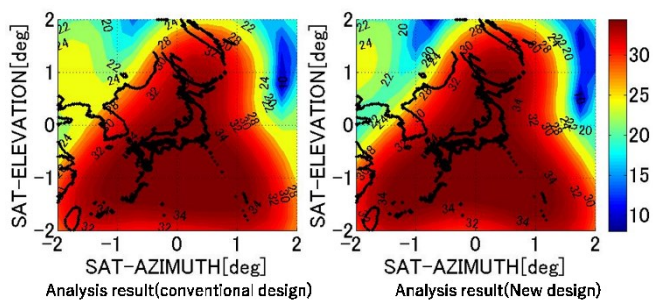


図 6 $f=1.043f_0$ 放射パターン

従来設計と新設計の解析結果を比較して、 $f=f_0$ の放射パターンにおいては、大差は見られなかったが $f=0.957f_0$ 、 $f=1.043f_0$ においては特に、北海道、沖縄県、小笠原諸島付近などの、本州から外れた地域で差異が見られる。そこで、利得の差異が見られる地域周辺の各評価点における利得周波数特性で評価する。下端の周波数および上端の周波数において従来設計と新設計法で利得の差異が見られる評価点をピックアップし、それに対応する評価点の位置を図 7 に示す。また、図 7 の各評価点に対応する利得周波数特性を図 8 に示す。



図 7 利得の差異が見られる評価点の位置

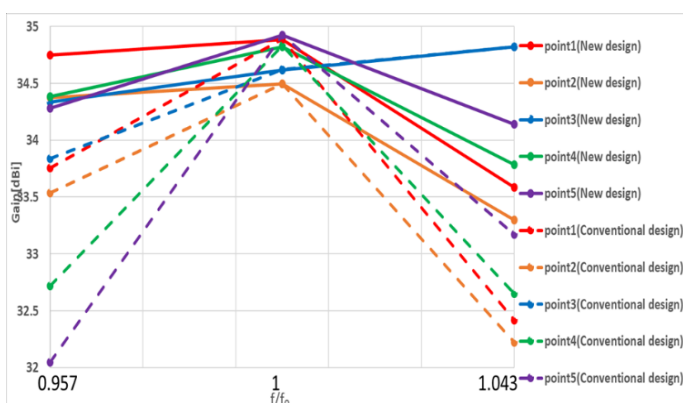


図 8 各評価点の利得周波数特性

図 8 は実線が新設計法での利得周波数特性、破線が従来設計の利得周波数特性を表している。全ての評価点が目標利得の 35dBi に届いてはいないが、従来設計と比較して下端の周波数において評価点 5 の地点

(小笠原諸島付近)で 2.23dB の利得差が生じており、他の評価点においても、従来設計より 0.49~1.67dB 利得が高くなっている。また、上端の周波数においても評価点 1 の地点(根室海峡付近)で 1.164dB 高くなっており、他の評価点においても従来設計より評価点 3(対馬付近)を除いて 0.49~1.67dB 高くなっている。このことから、従来設計より、提案する多周波数で最適化した設計法の方が良好な利得周波数特性が得られていることがわかる。

3. 従来設計の解析結果と測定結果の比較

表 2 のパラメータによって求められた所望の反射位相を実現するような素子設計を行い試作し測定した放射パターンを図 9, 図 10, 図 11 に示す。

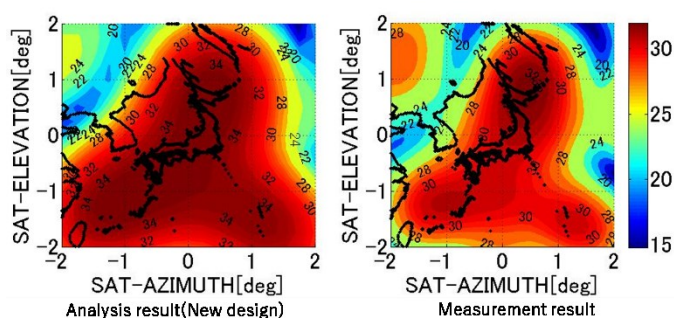


図 9 $f=0.957f_0$ 放射パターン

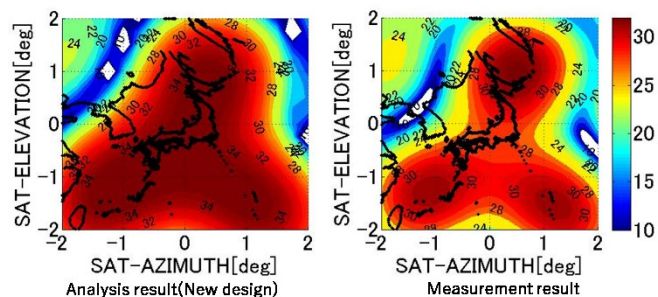


図 10 $f=f_0$ 放射パターン

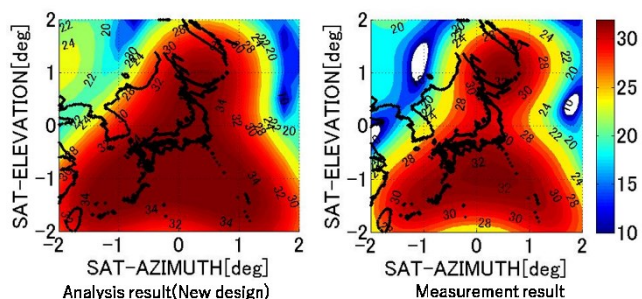


図 11 $f=1.043f_0$ 放射パターン

測定結果については、低周波数側、中心周波数、高周波数側の 3 周波数において概ね日本列島を覆うようなビーム形状を保っているが、解析結果と比較して利得が約 1.5~2dB 程度低下した結果となった。測定結果は低利得ではあったが、放射パターンの形状は乱れて

おらず、良好な周波数特性が得られた。

また、測定結果において利得が低下してしまった要因としては以下の要因が挙げられる。

- ・一次放射器を前後したことによる開口分布の変化およびスピルオーバー損失の影響
- ・リフレクタレーアンテナ上に球面波の成分がのった影響
- ・日本列島以外の地点に対する不要な放射

4. むすび

本報告では収差理論を応用した簡易評価法を用い、評価関数の式を改良して任意の数の周波数を含んだ最適化を可能とした。また、実際に新設計法で設計した成形ビームリフレクタレーを測定した。測定結果は解析結果と比較して低利得であったが放射パターン自体は3周波数共に乱れておらず良好な周波数特性が得られた。今後は、再設計、再測定を行い複数の周波数で最適化を行う手法の有用性を明らかにする。

本研究は、科研費 JSPS(20K04491)の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] J. Huang, J. A. Encinar, "Reflectarray antennas" Wiley, New Jersey, 2007.
- [2] 深谷芽衣, 他, "成形ビームを放射するリフレクタレーアンテナにおける周波数特性の評価方法" 信学技報, IEICE-AP2018-131.
- [3] S. Makino. et al., "Estimation of Frequency Characteristics of Reflect-array by Introducing Aberration Theory," EUCAP, Paris, France, March 2017.
- [4] 須永 誼, 他, "収差理論を用いたリフレクタレーアンテナのマルチビーム設計法" 信学総体, B-1-63, 2017.