

簡易評価法を用いて試作した成形ビームを放射する リフレクタレーアンテナ

重光 賛志郎[†] 深谷 芽衣[†] 牧野 滋[†] 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 〒247-0056 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1

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

あらまし これまでの研究では、収差理論を適用することによって、成形ビームを放射するリフレクタ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。本研究では、周波数特性を簡易的に評価できる手法を用いて、成形ビームを放射するリフレクタ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、簡易評価法の有用性が示された。

キーワード リフレクタレーアンテナ, 簡易評価法, 成形ビーム

Reflectarray antenna radiating shaped-beam using simple evaluation method

Sanshiro SHIGEMITSU[†] Mei FUKAYA[†] Shigeru MAKINO[†]

Michio TAKIKAWA^{††}, and Hiromasa NAKAJIMA^{††}

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

^{††} Mitsubishi Electric Corporation 5-1-1 Ofuna, kamakura, Kanagawa, Japan

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

Abstract Previous research has significantly reduced the time required to analyze the frequency characteristics of a reflectarray antenna that emits a shaped beam by applying aberration theory. In this study, we designed a reflectarray antenna that radiates a shaped beam using a method that allows simple evaluation of frequency characteristics. As a result, the reflectarray antenna was able to secure a beam covering the service area, and the validity of the simple evaluation method was thus demonstrated.

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

1. まえがき

リフレクタレーアンテナ[1](以下、リフレクタレー)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

フレクタ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。リフレクタ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。

リフレクタレーの周波数特性を評価する手順は以下のとおりである。はじめに、各素子の反射位相を解析し、所望の反射位相を実現するような素子の大きさを決定する。次に、リフレクタレーの素子の反射位相を解析することによって、リフレクタレーの周波数特性を計算している。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ために膨大な時間を要してしまう。成形ビームリフレクタレーでも同様である。収差理論[2]を適用することにより、成形ビームを放射するリフレクタレーの周波数特性を簡易的に評価できる方法[3]が提案されており、素子の反射位相の周波数特性が理想的なものであると仮定すると、素子の設計や反射位相の周波数特性を計算することなく、評価することができる。

本報告では、簡易評価法を用いて設計した成形ビームリフレクタレーを試作・測定をし、その測定結果を示し、簡易評価法の有用性を示す。

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. 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し行う必要がある。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。

3. 簡易評価法

3.1. 実現可能で理想的な周波数特性

反射位相の周波数特性を $\Phi(f)$ 、設計周波数 f_0 における反射位相を $\Phi(0)$ とする。式(2)に理想的な反射位相の周波数特性を示す。

$$\Phi(f) = \frac{f}{f_0} \Phi_0 \quad (2)$$

式(2)は、周波数にかかわらず位相誤差が発生しない理想的な条件を示している。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(2)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(3)のように示すことができる。

$$\Phi(f) = \Phi_0 \quad (3)$$

式(3)を適用することにより、リフレクタレーの実現可能な理論限界値を求めることができ、さらに、所望の反射位相 Φ_0 が求まっていれば任意の周波数の解析を膨大な時間が掛かる素子設計と反射位相の周波数特性解析を行わずに評価出来ることになる。

この式(3)を前提条件とした周波数特性評価方法を簡易評価法と定める。

3.2.簡易評価法の妥当性

ここでは、ビーム方向に周波数特性を持っている走査ビーム設計のリフレクタレーで簡易法の妥当性を判断する。検討に用いたリフレクタレーの鏡面構成を図2に示す。従来法と簡易法の開口上位相誤差の周波数特性を図3に示す。破線は従来法、実線は簡易法の解析結果を示している。図3より、従来法と簡易法の位相誤差は概ね一致していることがわかるが、従来法のグラフにはリップルが発生している。簡易法のグラフで示された位相誤差は素子解析を行わずに求まる理論限界値であることから、膨大な時間を掛けて行う素子設計・素子の反射位相解析はこのリップルを計算しているだけであることが明らかとなった。

従来法および簡易評価法における位相誤差の周波数と癖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、簡易評価法は走査ビーム設計の周波数特性評価において妥当であることが判明した。簡易評価法を用いることで評価時間を数百時間から数分にまで短縮することが可能となった。

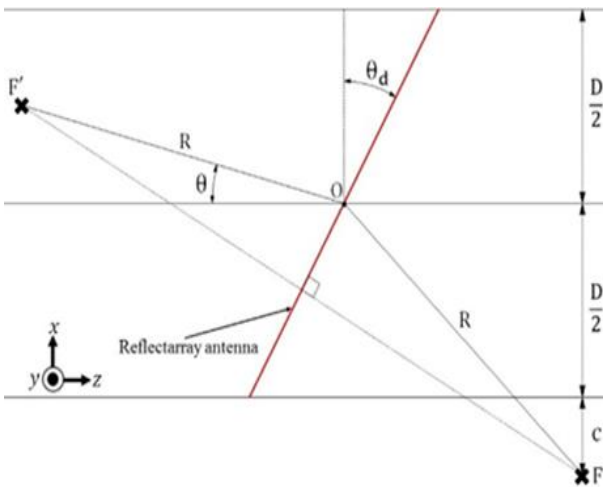


図2 リフレクタレーの幾何学的構成

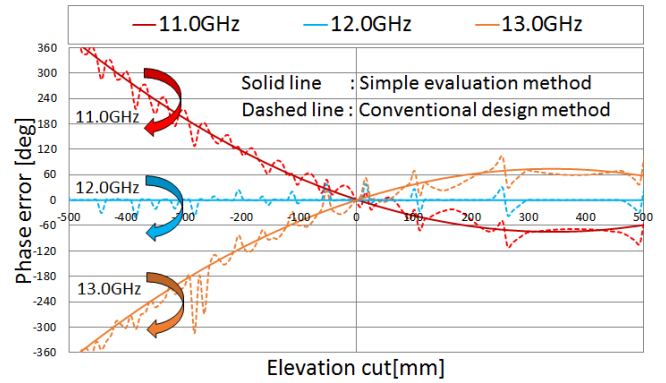


図3 位相誤差の周波数特性

4. 成形ビーム

4.1. 成形ビーム設計

表1に簡易評価法の解析に用いた設計パラメータを示す。各パラメータは、図2の鏡面構成に対応している。評価関数Fに用いたパラメータを表2に示し、2.1節の方法で決定した評価点及び要求利得を図3に示す。成形ビームの決定の際、日本列島には強い利得が放射するように、海洋には強い利得を放射しないようにするため、要求利得を2通り定めた。

表1 成形ビームの設計パラメータ

設計周波数帯域 : f_0	Ka
誘電体基板厚 : t	0.15λ
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	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

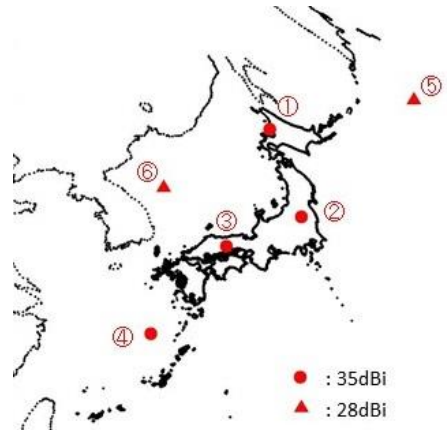


図3 評価点および要求利得

4.2.解析結果および測定結果

設計周波数帯域において、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、反射位相解析をし、求められた放射パターンおよび実際に測定した放射パターンを図 4,図 5,図 6 に示す。

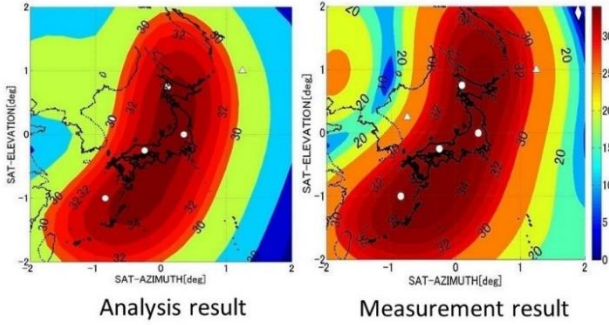


図 4 $f=0.957f_0$ 放射パターン

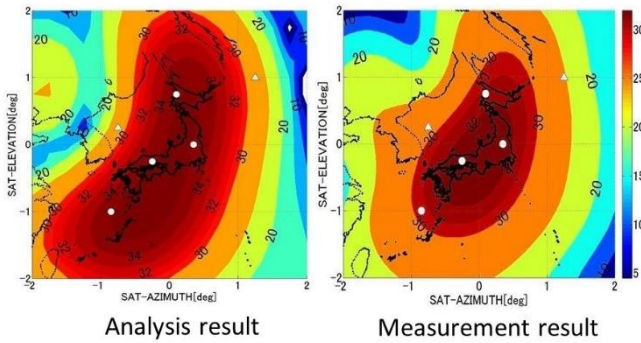


図 5 $f=f_0$ 放射パターン

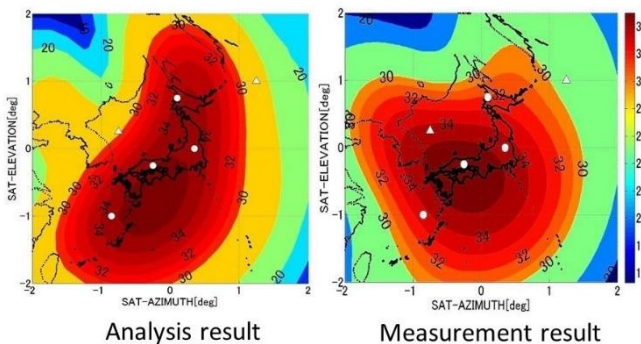


図 6 $f=1.043f_0$ 放射パターン

解析結果については、設計周波数帯域において、概ねビーム形状を保っていることが確認できる。また、測定結果に関しては、低周波数側でビーム形状を保っており、高周波数側にシフトするにつれ、成形能力が不足

し日本列島を覆うようなビーム形状をしているが、解析結果のビーム形状とは違ったビーム形状となった。

4.3.解析結果と測定結果の誤差検討

図 4 における測定結果と図 5 における解析結果を比較するとビーム形状、利得がほぼ一致していることが確認できる。そのため、低周波数側に周波数シフトが起きているのではないかと考察した。周波数シフトが生じた原因として、測定環境における一次放射器の位相中心が解析条件と差異があったためと考えた。

図 7,図 8,図 9 に設計周波数帯域において、一次放射器を鏡面方向に 1.4375λ 近づけた時の解析結果および図 4,図 5,図 6 の測定結果を比較した図を示す。測定結果および解析結果を比較すると概ね一致していることが確認できた。したがって、所望の測定結果が得られなかった原因は設計上の一次放射器の位置と測定上における一次放射器の位置に差異があることが明らかになった。

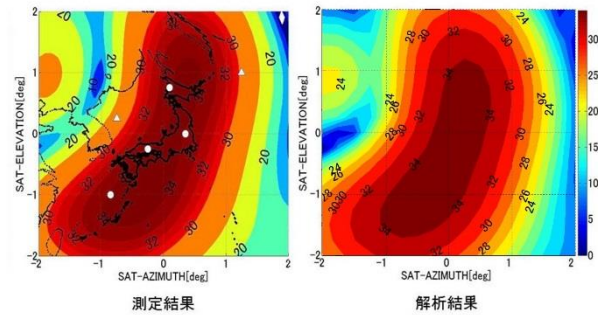


図 7 $f=0.957f_0$ 放射パターン

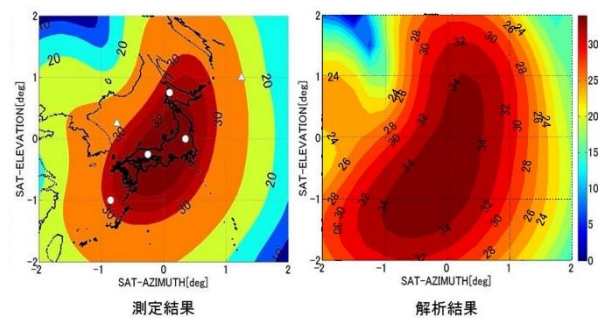


図 8 $f=f_0$ 放射パターン

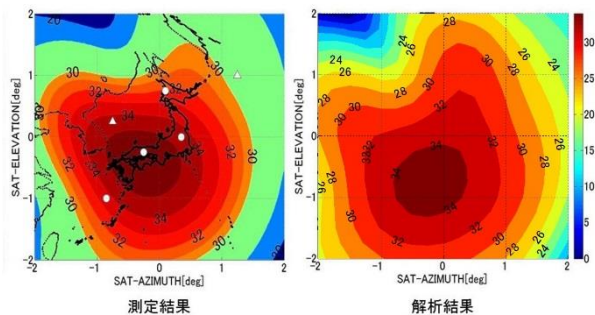


図9 $f=1.043f_0$ 放射パターン

5. 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て設計した成形ビームリフレクタレーを測定し、簡易評価法の有用性を示した。簡易評価法を用いることによりこれまでの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た。簡易評価法は、成形ビーム設計の周波数特性の妥当性の判断が行えることから、リフレクタレーの設計に関わらず適用できる汎用的な評価方法であることを示した。

測定結果より、リフレクタレーの測定では、位相中心の精度が大きく影響することが明らかとなったため、今後は、一次放射器の位置を修正したうえで、成形ビームリフレクタレーの再設計および再測定を検討する。

参 考 文 献

- [1] J. Huang, J. A. Encinar, "Reflectarray antennas" Wiley, New Jersey, 2007.
- [2] S. Makino. et al., " Estimation of Frequency Characteristics of Reflect-array by Introducing Aberration Theory," EUCAP, Paris, France, March 2017.
- [3] 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.
- [4] 須永諒, 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.