

高能率・低サイドローブとなる共振素子間隔の検討

瀧能 翔太[†] 牧野 滋[†] 深谷 芽衣[†] 重光 賛志郎[†]

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: [†]b1613265@planet.kanazawa-it.ac.jp

あらまし 従来までのリフレクトアレーアンテナの設計において、低能率、高サイドローブとなった原因として金属板装荷 FSR で透過した成分によって伝播するグレーティングローブの影響によるものであることを明らかにし、これらを考慮した共振素子間隔の条件及びこの条件を用いた高能率・低サイドローブ特性を示すリフレクトアレーアンテナを設計・試作を行い、その妥当性を示した。本論文では、誘電体基板上的条件式と自由空間上での条件式の 2 パターンを用いた共振素子間隔でリフレクトアレーアンテナを設計し、どのくらいの長さまでがグレーティングローブが影響しないのかの検討を行い、その妥当性を示す。

キーワード リフレクトアレーアンテナ, FSR, グレーティングローブ, サイドローブ, 能率

Investigation of the spacing between the resonant elements for high efficiency and low-side-lobe

Shota TAKINO[†], Shigeru MAKINO[†], Mei FUKAYA[†], Sanshiro SHIGEMITSU[†], 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: [†]b1613265@planet.kanazawa-it.ac.jp

Abstract In this paper, we design a reflect array antenna with a resonant element interval using two patterns of a conditional expression on a dielectric substrate and a conditional expression on free space, and examine how long the grating lobe does not affect. And show its validity.

Key words Reflectarray antenna, FSR, Grating-lobe, Side-lobe, efficiency

1. はじめに

波長に比べて小さい金属素子(共振素子)を誘電体基板上に二次元的に周期配列した FSR(Frequency Selective Reflector: 周波数選択板)は入射した電磁波を周波数によって反射・透過する空間フィルタとして用いられている [1]. また, FSR に誘電体を介して金属板を装荷した金属板装荷 FSR は, その共振素子の半径や形状を適切に選ぶことにより, 入射した電磁波の反射位相を制御できることが知られている. リフレクトアレーアンテナ(以下, リフレクトアレー)は, 金属板装荷 FSR が有する反射位相制御の機能を反射鏡に適用したものであり, 平面の鏡面と一次放射器により構成され, 一次放射器から給電された球面波の反射位相を制御することで平面波を形成することが

できる. 従来までの設計では, 低能率, 高サイドローブの原因が共振素子から発生したグレーティングローブが誘電体内で伝播することであることを明らかにし, 誘電体内及び自由空間でのグレーティングローブが伝播しない条件からこの条件を反映したリフレクトアレーを設計し, 試作により Ku 帯のある周波数帯域 f_L - f_0 の周波数帯域において, 60 %以上の能率を達成し, サイドローブレベルも-30dB 以下の低サイドローブ特性を実現でき妥当性を明らかにした. 本論文では, 誘電体基板上での条件式と自由空間上での条件式の 90 %, 100 %, 110 %の計 6 パターンの共振素子間隔での解析を行い, どのパターンまでが実際のリフレクトアレーの共振素子間隔の許容範囲なのかの検討を行った. なお, 解析は中心周波数のみの解析となっている. その結果, 誘電体基板上での条件式の 90 %, 100 %の共振

素子間隔において、能率が60%以上であり、サイドローベレベルも概ね-30dBの低サイドローブ特性を実現した。

2. 高能率・低サイドローブリフレクタレー設計法及びその結果

2.1 高能率・低サイドローブリフレクタレー設計法

まず、BS受信用を想定した円偏波における主偏波成分をTE波とTM波の複素反射係数より次式1で求める。

$$R_{co} = \frac{1}{2}(R_{TM} + R_{TE}) \quad (1)$$

ここで R_{TM} はTM入射偏波の反射係数、 R_{TE} はTE入射偏波の反射係数である。次に、円偏波における交差偏波成分について次式2で表すことができる

$$|R_{cr}| = \frac{1}{2}|R_{TM} - R_{TE}| = \sin \frac{|\phi_{TM} - \phi_{TE}|}{2} \quad (2)$$

交差偏波成分は、式2中の $\phi_{TM} - \phi_{TE}$ で示すTM波とTE波の位相差を小さくすることで低減できる。これらをもとに、自由空間でグレーティングローブが伝播しないような条件式が次式3である。

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + \sin \theta} \quad (3)$$

従来のリフレクタレーは、式3を用いて求めた共振素子間隔 d で低利得・高サイドローブ特性を示していた。その原因として、式3では誘電体内のグレーティングローブ発生を考慮していないためグレーティングローブが発生し、低利得・高サイドローブ特性を示したと考えられる。誘電体内でのグレーティングローブ発生の詳細図を図1に示す。入射した電波は共振素子

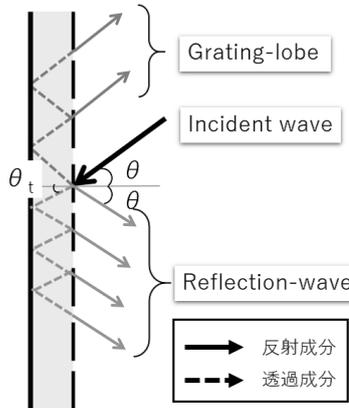


図1 グレーティングローブ発生の詳細図

で反射する成分、透過する成分に分かれる。反射する成分は、入射角と同じ角度で反射する。一方、透過する成分は金属板と誘電体間で伝播しながら最終的に入射角と同じ角度を持って放射する。ここで、この透過する成分においてグレーティングローブ成分が伝播すると、この成分は全く意図しない方向に放射することとなる。以上のことから、誘電体内のグレーティングローブを考慮した設計を提案した[3]。今回は、過去の報告で使用した条件式を利用し、どのくらいの長さまでの共振素子間隔であれば実際のリフレクタレーの共振素子間隔として許容

されるのかの検証を行った。なお、反射、透過を制御するのは各共振素子で行うため、共振素子間隔について考慮する。誘電体内でグレーティングローブが伝播しないための素子間隔条件は次の通りである。

$$\frac{d}{\lambda_d} < \frac{1}{1 + \sin \theta_t} \quad (4)$$

条件中、 θ_t は入射角 θ に対する誘電体内の屈折角、 λ_d は誘電体内の波長 $\lambda/\sqrt{\epsilon_r}$ である。誘電体の境界条件より、 $\sin \theta = \sqrt{\epsilon_r} \sin \theta_t$ であるから、

$$\frac{d}{\lambda_0} < \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r} + \sin \theta_0} \quad (5)$$

と表すことができる。今回は、 $\epsilon_r=2.59$ の誘電体を使用しており、波長条件 λ_0 は設計周波数がKu帯のある周波数 f_0 より求めることができる。また、 θ は25degとした中で条件式4と条件5において、それぞれの条件式の90%、100%、110%となる共振素子間隔 d を求めると、 d は $0.4392\lambda_0$ 、 $0.4961\lambda_0$ 、 $0.5409\lambda_0$ 、 $0.6303\lambda_0$ 、 $0.6995\lambda_0$ 、 $0.7727\lambda_0$ の6パターンとなる。これら6パターンの放射パターン及び能率を比較し、どのくらいの長さまでが実際のリフレクタレーの共振素子間隔として最適であるのかを判断するとともに、条件式5が妥当であるのかの確認も行う。

2.2 設計パラメータおよび鏡面設計

今回設計したリフレクタレーの設計パラメータを表1、6つの共振素子間隔それぞれの鏡面のCAD図を図2～図7に示す。今回、設計パラメータとして誘電体基板厚 t 、比誘電率 ϵ_r 、共振素子間隔 d 、リング幅 w 、リング半径 r の5つを用いている。図2～図7より、共振素子間隔が大きくなればなるほど素子数が減り、鏡面の素子模様も十分にはゾーニングができていないように思われる。

表1 設計パラメータ

設計周波数 f_0	Ku
比誘電率 ϵ_r	2.59
誘電体基板厚 t	$0.1301\lambda_0$
共振素子間隔 d	$0.4392\lambda_0, 0.4961\lambda_0, 0.5409\lambda_0, 0.6303\lambda_0, 0.6995\lambda_0, 0.7727\lambda_0$
鏡面の原点の座標 (x, z)	$(344.72, -289.26)$
鏡面角度 θ_d [deg]	25
リング幅 w	$0.0081\lambda_0$
リング半径 r	$0.0122\lambda_0 \sim 0.1749\lambda_0$

2.3 結果及び比較

今回、解析シミュレーターとしてANSYS社のHFSSのLinkedField機能を用いたフルウェーブ解析を行っており、条件式4の90%、100%、110%の放射パターンと条件式5の90%、100%、110%の放射パターンを図8～図13に示す。なお、これらの図は、横軸Azimuth面、縦軸振幅の放射パターンであり、いずれも設計周波数はKu帯のある周波数 f_0 での放射パターンである。

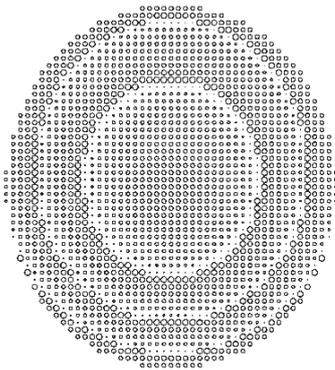


図 2 共振素子間隔 $0.4392\lambda_0$ の時の鏡面

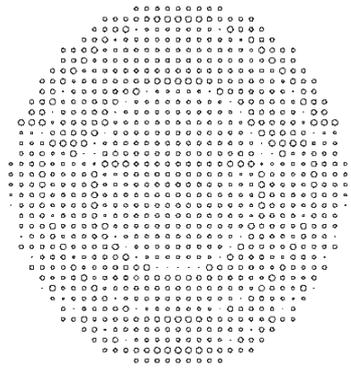


図 5 共振素子間隔 $0.6303\lambda_0$ の時の鏡面

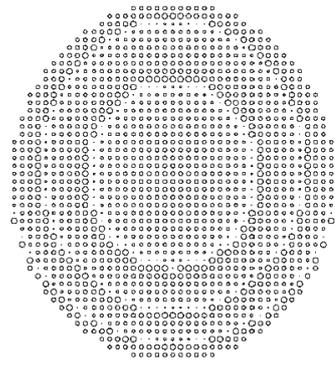


図 3 共振素子間隔 $0.4961\lambda_0$ の時の鏡面

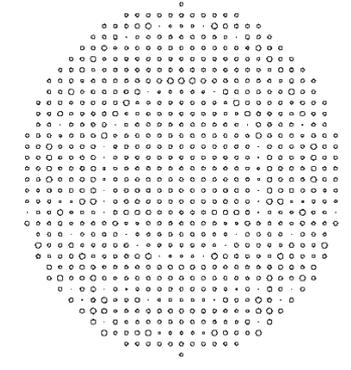


図 6 共振素子間隔 $0.6995\lambda_0$ の時の鏡面

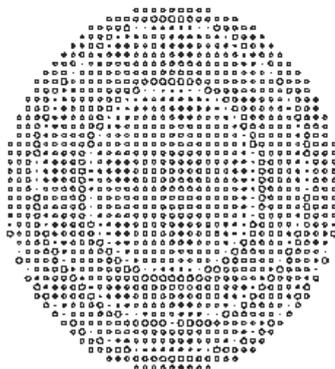


図 4 共振素子間隔 $0.5409\lambda_0$ の時の鏡面

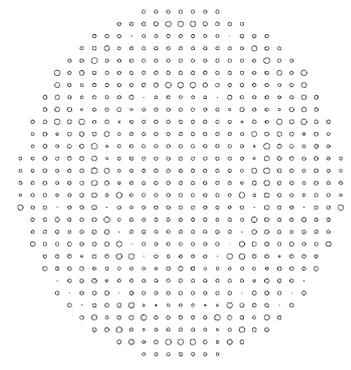


図 7 共振素子間隔 $0.7727\lambda_0$ の時の鏡面

図 8, 図 9 より, 条件式 5 の 90 %, 100 % の時の共振素子間隔での放射パターンは H 偏波, V 偏波ともにサイドローブが-30dB 付近であり低サイドローブ特性を実現できている. また, 図 10 より条件式 5 の 110 % の時の共振素子間隔での放射パターンは 90 %, 100 % の時に比べると H 偏波, V 偏波ともに多少サイドローブが上がっているが, 概ね-30dB 付近にきており低サイドローブ特性を実現できている. しかし, 図 11, 図 12, 図 13 より, 条件式 4 の 90 %, 100 %, 110 % の時の共振素子間隔での放射パターンは H 偏波, V 偏波ともにサイドローブが-30dB よりもはるかに高くなっている. これは, 誘電体内のグレーティングローブの発生した影響であると考えられる. また, 各偏波ごとのアンテナの能率・利得を図 14, 図 15 に示す. 図

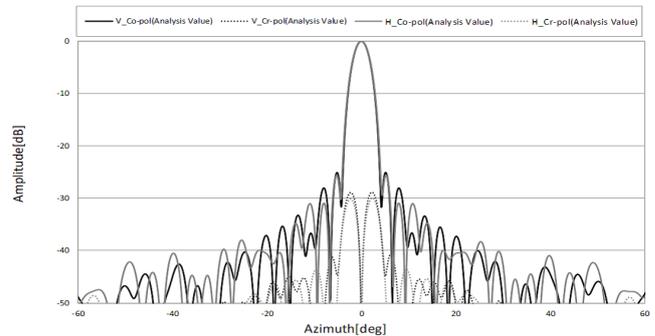


図 8 共振素子間隔 $0.4392\lambda_0$ の時の放射パターン

14, 図 15 は条件式 4 と条件式 5 によって求めた 6 つの共振素子間隔にそれぞれの能率・利得をプロットしたものである. なお, 図 14, 図 15 の点直線は低いところから, 能率・利得が 50 %, 60 %, 70 %, 80 % となっている. 図 14, 図 15 より, 条件式

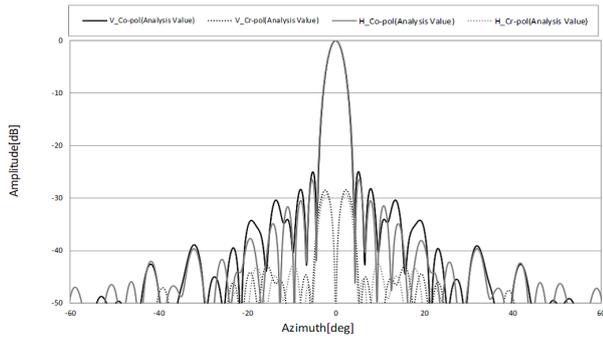


図 9 共振素子間隔 $0.4961\lambda_0$ の時の放射パターン

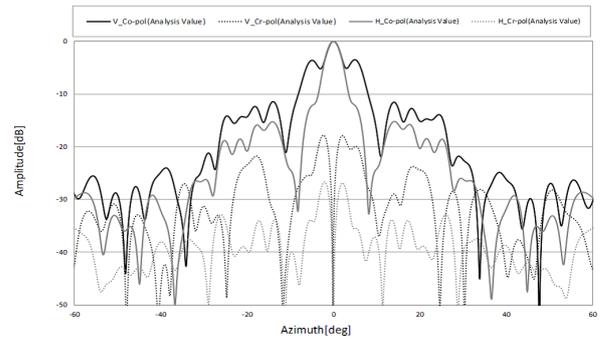


図 13 共振素子間隔 $0.7727\lambda_0$ の時の放射パターン

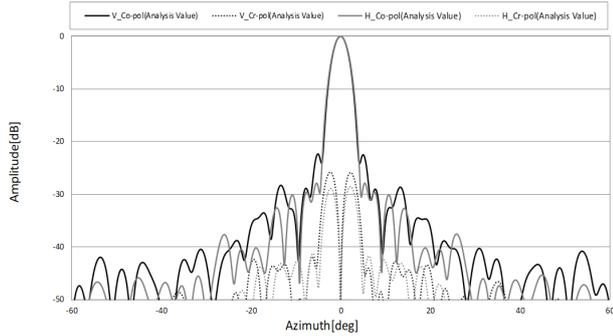


図 10 共振素子間隔 $0.5409\lambda_0$ の時の放射パターン

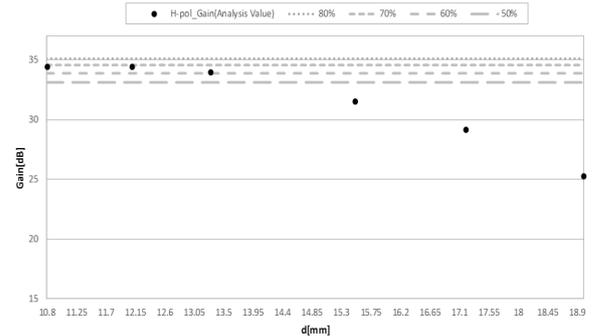


図 14 H 偏波の能率・利得

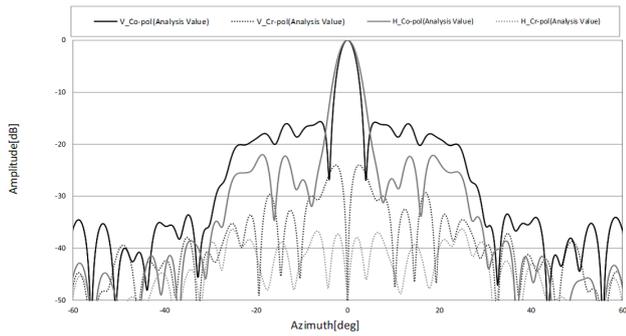


図 11 共振素子間隔 $0.6303\lambda_0$ の時の放射パターン

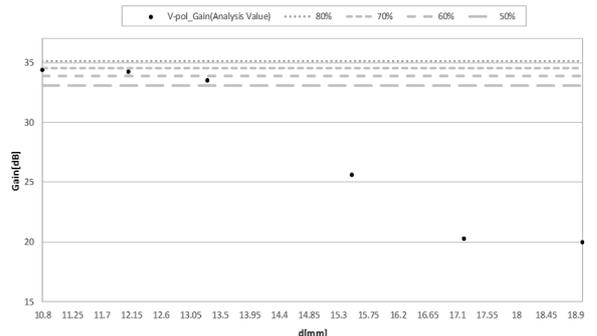


図 15 V 偏波の能率・利得

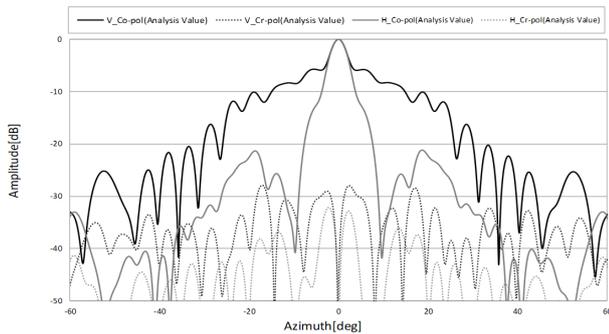


図 12 共振素子間隔 $0.6995\lambda_0$ の時の放射パターン

5 の 90 %、100 % の時の共振素子間隔での能率・利得は、H 偏波、V 偏波ともに 60 % 以上であり高能率を実現している。また、条件式 5 の 110 % の時の共振素子間隔での能率・利得は、H 偏波に関しては 60 % 以上を実現しているが、V 偏波に関しては 60 % に届かなかった。条件 4 の 90 %、100 %、110 % の

時の共振素子間隔での能率・利得に関しては、H 偏波、V 偏波ともに 60 % 以上を満たすことができなかった。これは、共振素子で発生したグレーティングローブが誘電体内で伝播した影響だと考えられる。

3. むすび

本論文では、誘電体内のグレーティングローブを考慮した条件式が妥当であるかの確認及び、共振素子間隔がどのくらいの長さまでがリフレクタレーの共振素子間隔として有効なのかの検討を行った。その結果、設計周波数 f_0 において有効な共振素子間隔は条件式 5 の 90 %、100 % の時の共振素子間隔の 2 つであり、この 2 つの共振素子間隔の時、能率 60 % 以上の高能率、またサイドローブレベルが概ね -30dB 以下と低サイドローブ特性を実現することができた。さらに、条件式 5 の妥当性も証明することができた。

文 献

- [1] 佐藤郁郎, 玉川晋, 岩田龍一, “方形金属格子による準光学分波器”, 信学論 (B), Vol.J-67-B, No.4, pp.447-454, 1984.
- [2] S.Makino. et al., EUCAP2017, Mar, 2017.
- [3] 藤井由香, 他, 信学総大, B-1-96, 2015.