

フレネル領域にフォーカスしたリフレクトアレーの照射範囲の設計法

本多出[†] 今野佳祐[†] 陳強[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†] izuru.honda.q4@dc.tohoku.ac.jp, keisuke.konno.b5@tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

あらまし フレネル領域におけるリフレクトアレー設計法を提案する。提案法では、リフレクトアレーの焦点 (Focal Point, FP) を変えることで、電界強度が向上する照射範囲を変えることができる。本報告では数値解析により様々なサイズの照射範囲の電界強度が向上することを確認する。また、シミュレーションで得た値をもとにリフレクトアレーを設計し、電界強度が一定なエリアを実現できるかを実験的に明らかにする。

キーワード リフレクトアレー, フレネル領域

Design Method of Illumination Area of Reflectarrays Focusing on Fresnel Region

Izuru HONDA[†] Keisuke KONNO[†] Qiang CHEN[†]

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579
Japan

E-mail: [†] izuru.honda.q4@dc.tohoku.ac.jp, keisuke.konno.b5@tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract A design method for reflectarrays working on fresnel region is proposed. According to the proposed method, a size of illumination area where electric field strength is enhanced by the reflectarrays can be designed once position of a focal point (FP) changes. Numerical simulation is performed and it is demonstrated that the electric field strength inside various size of illumination areas can be enhanced using the reflectarrays designed by the proposed method. In addition, reflectarray based on numerical simulation is shown to have the illumination area which has constant electric field strength.

Keywords Reflectarray, Fresnel region

1. まえがき

昨今の無線通信では第5世代移動通信システム(5G)の普及が進んでいる。また、より高周波帯である第6世代移動通信システム(6G)を見据えた研究開発が進められている。しかし高周波帯であるミリ波帯の電波は従来の電波と比べ減衰しやすいや、直進性が高く回折が生じにくいなどの問題点があげられる。このようなミリ波の無線通信では、送受信アンテナ間に障害物がある場合、電波が通じにくい不感地帯が生じ、無線通信が困難となる。

リフレクトアレー(Reflectarray, RA)はこういった電波の不感地帯を解消するために注目されている技術の一つである[1][2]。RAは、複数の素子からの散乱波の位相を所望の方向で同相になるように設計された散乱体のことであり、不感地帯における電界強度の改善に応用できることが明らかにされている[3][4]。

これまでのリフレクトアレーは遠方界を想定し設計されていたため、素子間隔と入射角、散乱角の三つのパラメータと遠方界条件を用いて各素子の反射位相を決定していた。しかし近年注目の集まるミリ波帯で

では、波長に対しRAが大規模になり、RAの近傍界領域に通信対象端末や送信アンテナが存在することになる。この時、RAと送受信端末間の距離は遠方界条件を満たさなくなるため、ミリ波帯以上の高周波帯で動作するRAでは近傍界領域とりわけフレネル領域での指向性の設計が重要になってくる。

本研究の目的は、フレネル領域におけるRA設計法を提案し、その有効性を明らかにすることである。フレネル領域にあるFocal point (FP)の位置を変化させることで所望サイズのエリアの電界強度を向上させられるRAの設計法を示し、数値シミュレーションによって有効性を明らかにする。また提案する設計法から得られた値をもとにRAを作成し伝搬実験を行い、提案する設計法の有効性を確認する。

2. フレネル領域におけるRAのエリア設計

2.1. 提案法によるRA設計

ここでは、フレネル領域内におけるエリアの電界強度を向上させる方法について説明する。

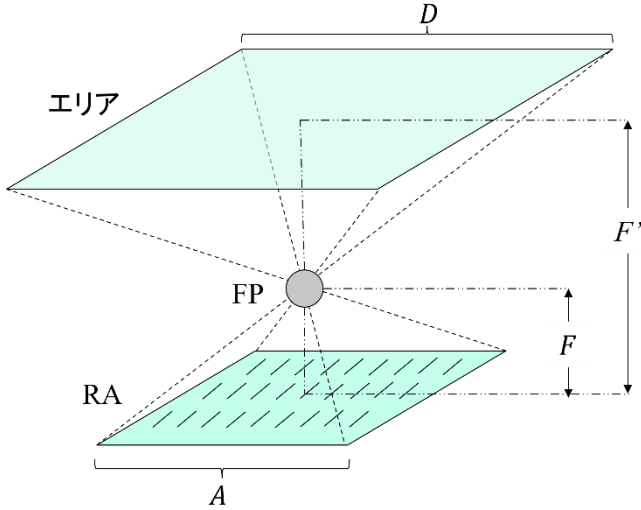


図 1: FP の位置とエリアサイズとの関係

提案法では、FP の位置を調整することでエリアサイズを変える。図 1 に、FP の位置とエリアサイズとの関係を示す。ここで、 A は RA のサイズ、 D はエリアサイズ、 F は原点から FP までの距離、 F' は原点からエリアまでの距離である。 A および D 、 F' が既知であるとすると、所望のエリアサイズにおける電界強度の向上を実現するような FP の位置 F は、幾何学的に以下の式で与えられる。

$$F = \frac{A}{A-D} F' \text{ where } F > F' \quad (2.1)$$

$$F = \frac{A}{A+D} F' \text{ where } F < F' \quad (2.2)$$

このように、所望のエリアサイズを実現するような F を与え、対応する FP の位置で RA 素子の散乱電界が同相となるように RA を設計する。

FP における RA 素子の散乱電界の位相が満たすべき値と、それを實現する RA 素子長は以下のように決定する。図 2 に示すように、各 RA 素子における一次放射器と RA 素子、RA 素子と FP 間の空間位相遅延はそれぞれ異なる。したがって、FP において RA 素子の散乱電界が同相になるためには、散乱電界の位相は以下の式を満たす必要がある。

$$\phi_2 = k_0 \{ (l_{in2} - l_{in1}) + (l_{ref2} - l_{ref1}) \} \quad (2.3)$$

$$\phi_3 = k_0 \{ (l_{in3} - l_{in2}) + (l_{ref3} - l_{ref2}) \} \quad (2.4)$$

このとき一次放射器から N 番目の RA 素子までの距離は l_{inN} 、 N 番目の RA 素子から FP までの距離は l_{refN} である。予め RA 素子のサイズと反射係数の位相との関係を数値計算で求めておき、(2.3)式および(2.4)式で与えられる位相を満たすようなサイズの素子を配置して、RA を設計する。

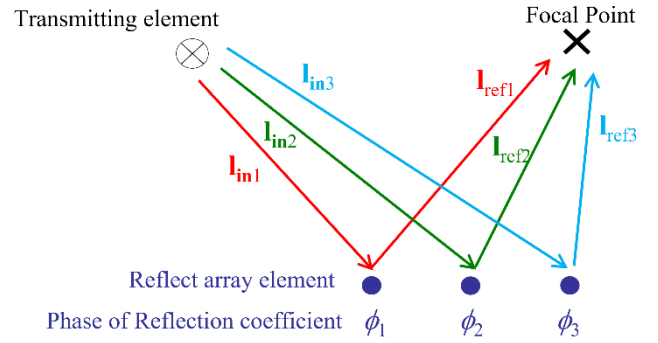


図 2: フレネル領域における RA 設計法

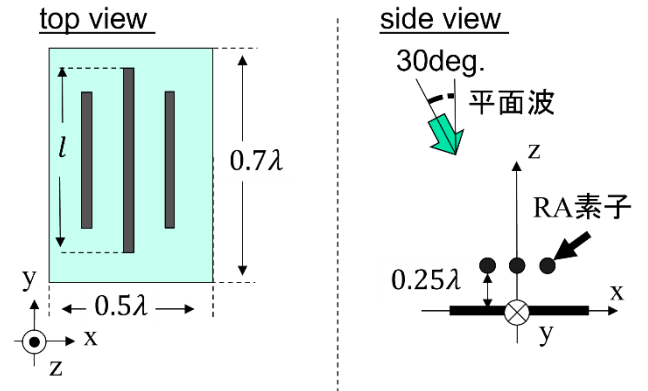


図 3: 反射係数位相と素子長の関係のモデル

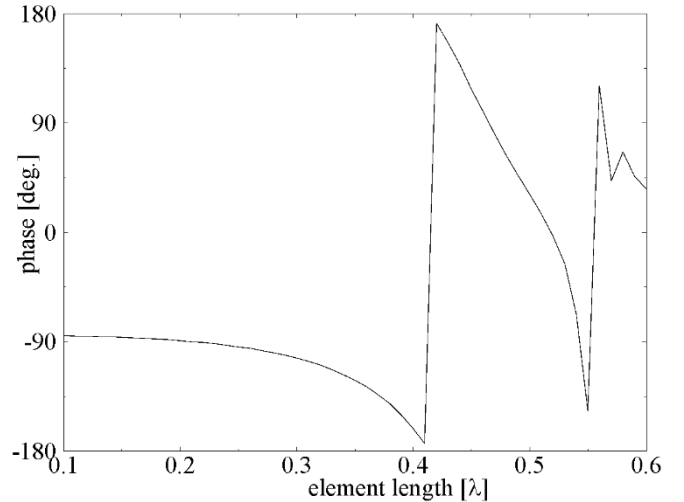


図 4: 反射係数位相と素子長の関係

3. 数値シミュレーション

3.1. 反射位相係数と素子長の関係

数値シミュレーションで反射係数位相と素子長の関係を算出する。素子は図 3 のように 1 本のダイポールと 2 本の寄生ダイポールで構成している。素子長 l を 0.1λ から 0.6λ で変化させ反射係数と位相の関係を算出している。反射係数位相は平面波を 30deg. 方向から入射し、無限周期構造を用いて解析している。解析した結果を図 4 に示す。以下の数値シミュレーションの素子長は図 4 の値を用いることとする。

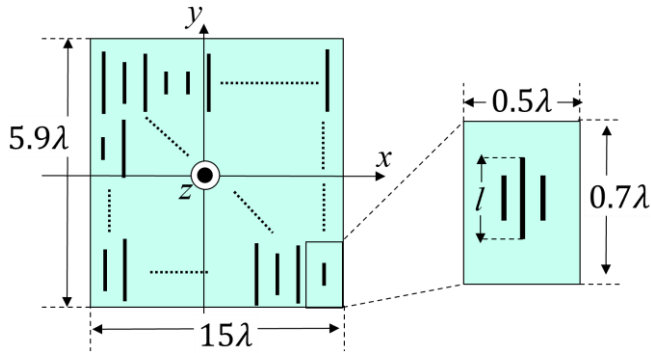


図 5: 数値シミュレーションで用いるモデル

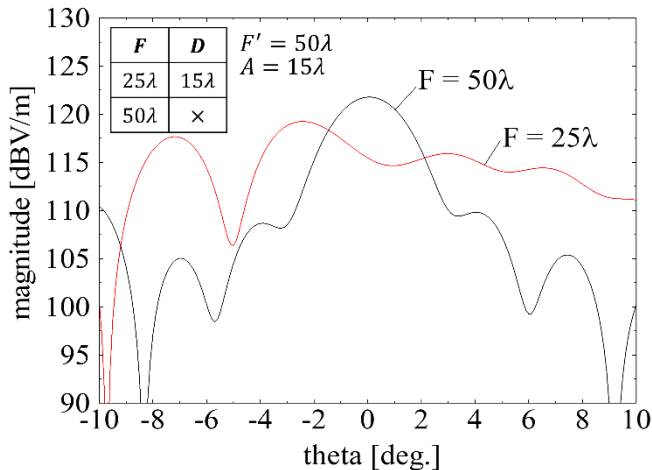


図 6: FP の変化によるエリア内の電界強度

3.2. 数値シミュレーションモデル

本提案で用いる数値シミュレーションモデルは図 5 に示す通りである。用いている素子長は、提案法をもとに計算した結果の最も近い図 4 の値から決定している。数値シミュレーションでは x 軸方向に 0.5λ 間隔で 30 素子、 y 軸方向に 0.7λ 間隔で 7 素子並べたものを採用している。1 次放射器は RA の中心から垂直方向に 1500λ 離れた場所に設置している。

3.3. 数値シミュレーション結果

提案法を用いて異なるサイズのエリアにおける電界強度分布を改善する RA を設計した。数値シミュレーションによって得られた電界強度分布は図 6 の通りである。ここでは、解析的に導出した点波源からの放射界に、無限周期構造中にある素子の反射係数を乗じて重ね合わせることで RA の電界を近似的に求めた。反射板の効果は鏡像波源によってモデリングした。

数値シミュレーション結果から、エリア内で 10 dB 程度の電界強度の変化はあるものの、所望のエリア内での電界強度の向上を RA によって実現できることが分かった。

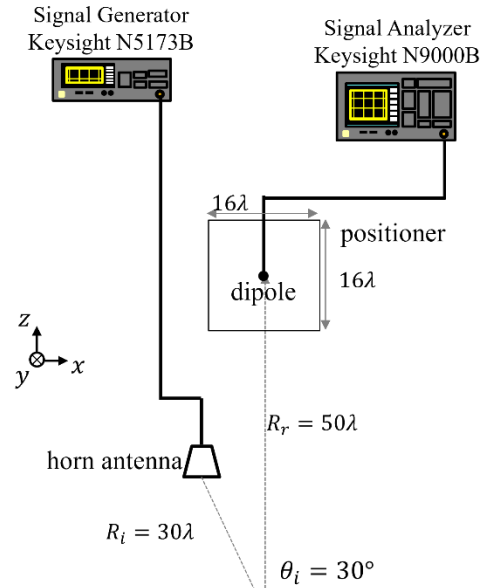


図 7: 実験環境

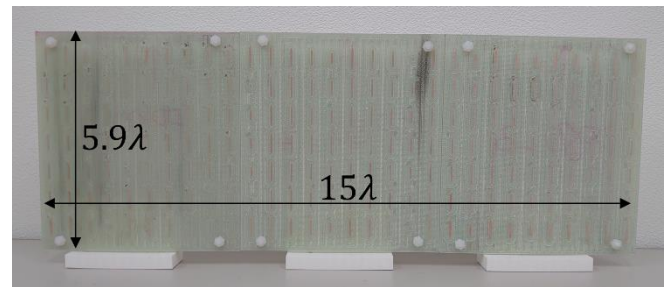


図 8: 作成した RA

4. 実験

4.1. 実験に用いる RA と環境

室内に図 7 で示す実験系を構築し、2次元位置ナーにダイポールアンテナを固定することで、電界強度の測定を行った。図 8 に示す RA は基板加工機を用いて作成した。また実験は 10GHz で行っている。

4.2. 実験結果

RA を置かなかった電界強度分布を図 9 に、 $F = 50\lambda$ となる RA を用いて電界強度を測定した結果を図 10、 $F = 25\lambda$ となる RA を用いて電界強度を測定した結果を図 11 に示す。図 9 からは周りの壁などからの散乱の影響で電界強度が一定になっていないことがわかる。図 10 より測定エリア内に FP を設置した場合、電界強度は FP 周りで向上していることがわかる。これにより設計した RA によって FP を作れるということがわかる。図 11 から観測範囲内に電界強度が一定になるような RA を設計した場合の電界強度分布がわかる。図 9 と比べて観測面全体で電界強度が改善していることがわかる。

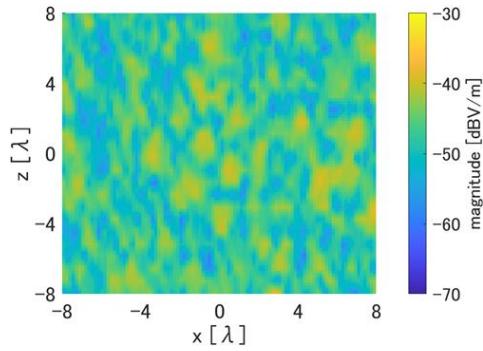


図 9:RA が不在の場合の電界強度分布

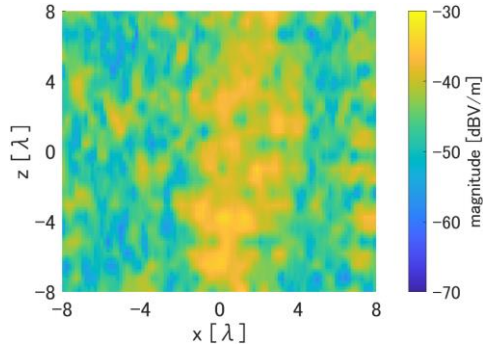


図 10:FP が観測面内にある電界強度分布

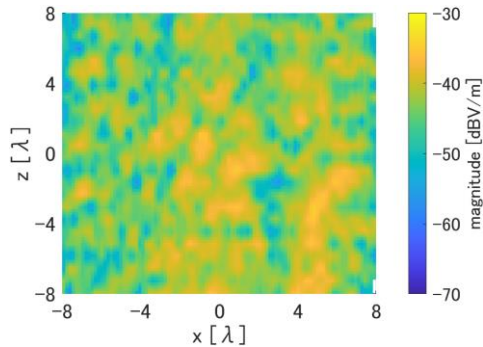


図 11:エリアが観測面内にある電界強度分布

[2] J. Huang and J.A. Encinar, Reflectarray Antennas, John Wiley and Sons, 2008.

[3] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Novel Broadband Planar Reflectarray With Parasitic Dipoles For Wireless Communication Applications," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 8, pp. 881-885, 2009.

[4] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Frequency Selective Reflectarray Using Crossed Dipole Elements With Square Loops for Wireless Communication Applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 59, no. 1, pp. 89-99, Jan. 2011

5. まとめ

本報告では、フレネル領域におけるリフレクトアレーの設計法を用いて電界強度が一定となる照射範囲が実現することを数値シミュレーションから明らかにした。また計算から得られた値をもとに作成した RA を用いた実験では FP が実現できていること、電界強度が一定である照射範囲を実現できていることを確認することができた。

6. 謝辞

本研究開発は総務省の電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254) によって実施した結果を含む。

文 献

[1] D.G. Berry, R.G. Malech, and W.A. Kennedy, "The Reflectarray Antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.11, no.6, pp.645-651, Nov. 1963.