

フレネル領域で動作するリフレクトアレーによる電波環境改善

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 フレネル領域において一定範囲内の電界強度を向上させるリフレクトアレー設計法を提案し、その散乱特性を数値的・実験的に明らかにする。さらに、提案法で設計したリフレクトアレーを試作し、実環境において電波環境の改善ができることを明らかにする。提案法では、フレネル領域におけるリフレクトアレーの焦点の位置を調整して散乱電界分布を制御することで、電界強度が向上する領域を設計する。試作したリフレクトアレーを屋内環境に配置し、受信電力分布を測定することで、提案リフレクトアレーの実環境における有効性を明らかにする。

キーワード リフレクトアレー、フレネル領域、近傍集光

Improvement of the Radio Environment with Reflectarray Working in the Fresnel Region

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

[†]Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, Japan
E-mail: izuru.honda.q4@dc.tohoku.ac.jp, keisuke.konno.b5@tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract We present a reflectarray design method aimed at enhancing the electric field strength within a specific range in the Fresnel region. This study comprehensively investigates the numerical and experimental aspects of the scattering performance associated with the proposed method. Furthermore, we apply this reflectarray design method to a prototype reflectarray, conducting experiments to illustrate its capability to improve the radio environment in real-world scenarios. In our proposed method, we adjust the focal point of the reflectarray in the Fresnel region to control the scattered electric field pattern and design the area where the field strength is enhanced. We measure the distribution of received power in the presence of other scatterers to demonstrate the effectiveness of the proposed reflectarray real-world scenarios.

Keywords Reflectarray, Fresnel Region, Near-Field-Focus

1. まえがき

ミリ波の電波は従来の通信で用いられていた周波数帯の電波と比べ直進性が高く伝搬損失が大きいという問題がある。そのため遮蔽物によって電波の不感地帯が生じる可能性がある。遮蔽物によってできた電波の不感地帯を解消する技術としてリフレクトアレー(Reflectarray,RA)[1]が注目されている。

RAは周期的に並べられた非同一の無数の素子からなる散乱体であり、各素子の形状を適切に設定することで散乱電界の位相を揃え所望方向にビーム走査を可能とする技術である[2]。

従来から提案されているRAは、RAの遠方界領域での通信を想定している。このような遠方界領域での通信を想定したRAを用いて、電波環境の改善が可能であることが報告されている[3][4]。その一方で、前述のとおり高周波の電波は減衰が大きいと、ミリ波帯の

RAは高利得であることが求められる。このような高利得のRAは波長に対し大規模となるが、そうすると端末が必ずしもRAの遠方界領域ではなく、フレネル領域などの近傍界領域に位置することがありうる。したがって、ミリ波帯ではこのような近傍界領域内へ電波を照射するためのRAの設計が求められる。ところで、近傍界領域におけるアンテナ設計では、焦点を持つアンテナが提案されており、RAの設計においてもこのような考え方が応用できると考えられる[5][6]。

本研究はフレネル領域において一定範囲内の電界強度を向上させるリフレクトアレー設計法を提案し、その散乱特性を数値的・実験的に明らかにする。また提案法で設計したリフレクトアレーを試作し、実験を通じ実環境において電波環境の改善できることを明らかにする。

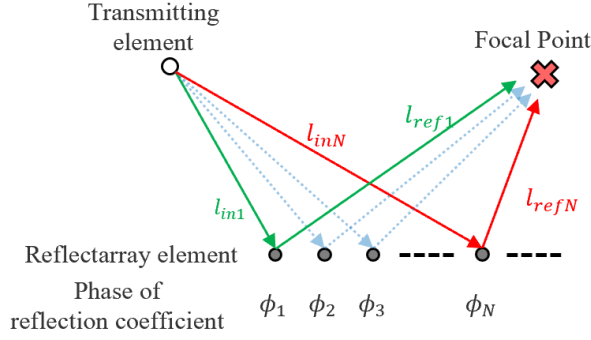


図 1: フレネル領域における RA 設計法

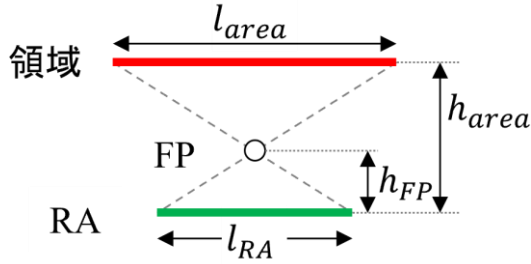


図 2: FP の位置と領域の大きさの関係

2. 提案するリフレクタレーの原理と設計

フレネル領域内の一定範囲内の電界強度を向上させる RA の設計法[7][8]について述べる. RA 設計では各素子に適切な空間位相遅延を与えることで所望方向にビームを向けることができる. 本研究では, フレネル領域におけるビーム制御をするために図 1 のようにフレネル領域内に RA の焦点(Focal Point, FP)を設置し, 波源, 各素子そして FP の位置関係から素子における空間位相遅延を決定する. 各素子の位相は以下の式(2.1)で与えられる.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \text{const.} \\ \phi_n &= k_o \{ (l_{inN} - l_{in1}) + (l_{refN} - l_{ref1}) \} + \phi_1 + 2\pi p \quad (2.1) \\ p &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned}$$

上記の FP の位置を適切に設定することで所望の領域内の電界強度向上を可能とすることができる. 図 2 に示すように RA の大きさ l_{RA} , 電界強度を向上させたい領域の大きさ l_{area} , RA から領域までの距離 h_{area} が既知であるとき, FP の位置 h_{FP} は幾何学的に以下の式(2.2)で与えられる.

$$\begin{aligned} l_{RA} \cdot l_{area} &= h_{FP} \cdot (h_{area} - h_{FP}) \\ h_{FP} &= \frac{l_{RA}}{l_{RA} + l_{area}} h_{area} \quad (2.2) \end{aligned}$$

この提案法を用いることで任意の大きさの電界強度一定の領域範囲を得ることができる.

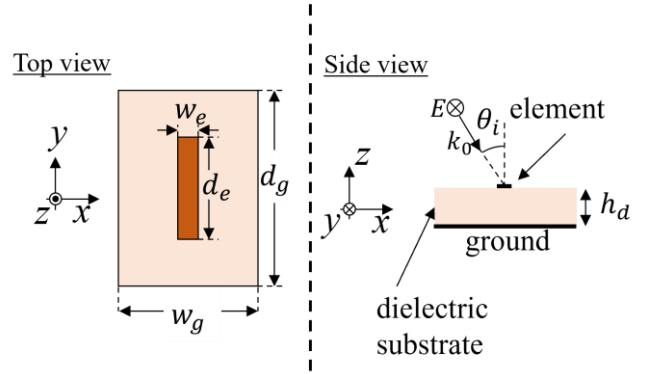


図 3: 本研究で用いる素子

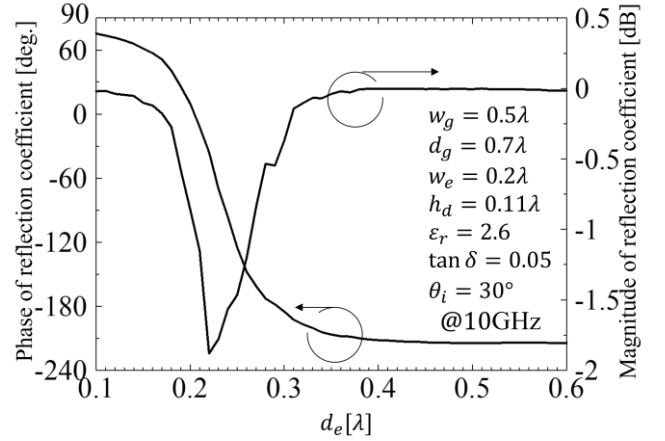


図 4: 反射係数と素子長の関係

本研究で用いる RA 素子は図 3 に示す板状ダイポールとする. 図 3 に示す素子をユニットセルとして解析を進めた. 解析では, 素子の長さごとに周期境界条件下においてモーメント法を用いることで反射係数位相値を計算した. 計算を行うことで得られた各素子長と反射係数位相値の関係は図 4 に示すとおりである. 以下の RA の設計では図 4 に示す関係を用いる.

3. 提案 RA の散乱パターン

3.1. 提案する RA の数値シミュレーション

本提案で用いるシミュレーションモデルは図 5 に示す通り, 縦 7 素子, 横 30 素子の計 210 素子の RA を考える. 素子間の間隔は前述したユニットセルと同じ縦 0.7λ , 横 0.5λ とする. また本研究では RA の入射角を $\theta_i = 30^\circ$, 散乱角を $\theta_r = 0^\circ$, 一次放射器と RA の距離を $R_i = 0.9 \text{ m}$ とする.

図 6 に提案する RA の散乱特性のシミュレーション結果を示す. 図 6 には 3 種類の RA の電界強度分布を示しておりそれぞれ $l_{area} = 0 \text{ m}$, $l_{area} = 0.45 \text{ m}$, $l_{area} = 0.9 \text{ m}$ となるように設計している. 最大値から 10dB 下がる点までを実現できた電界強度一定の範囲とすると所望する領域範囲の 8 割ほどを実現できていることがわかる.

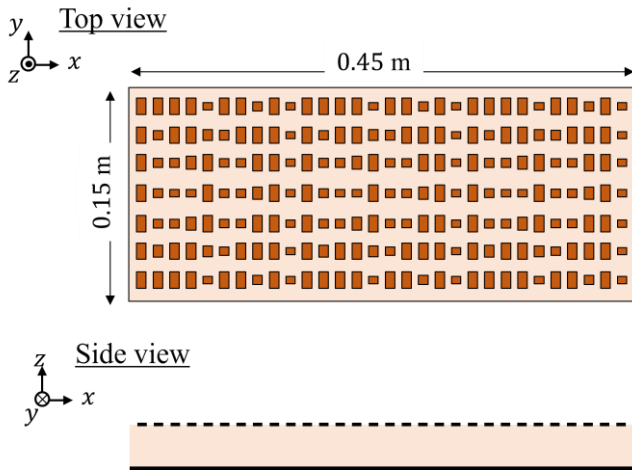


図 5:本研究で用いる RA の模式図

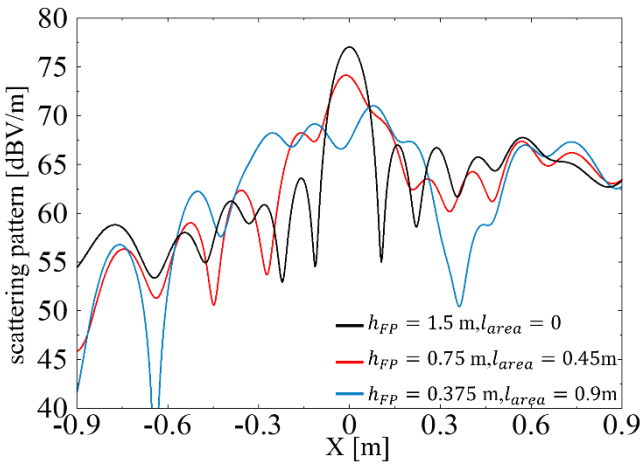


図 6:RA のシミュレーションによる散乱パターン

3.2. 提案する RA の散乱パターンの測定

提案 RA を試作しその散乱パターンを測定する．試作した RA を図 7 に示す．試作は誘電体基板を基板加工機を用いて加工した．また RA を垂直に立たせるために治具を 3D プリンターで作成している．

散乱パターンの測定は電波暗室内で行い，波源にはホーンアンテナ，測定アンテナは自作したモノポールアンテナを用いた．直線上を動くポジションナーを使い 0.01 m 刻みで 241 点の測定を行った．

$l_{area} = 0$ m, $l_{area} = 0.45$ m の RA の散乱パターンを図 8 に示す．結果より試作した RA はどちらも所望方向にビームを向けられていることがわかる．また 2 枚の RA をくらべると $l_{area} = 0.45$ m の RA がより広い範囲で電界強度を向上できていることが明らかになった．構築できた領域の大きさは最大値から 10 dB 下がった点までを構築できた領域とすると約 7 割となった．



図 7:試作した RA

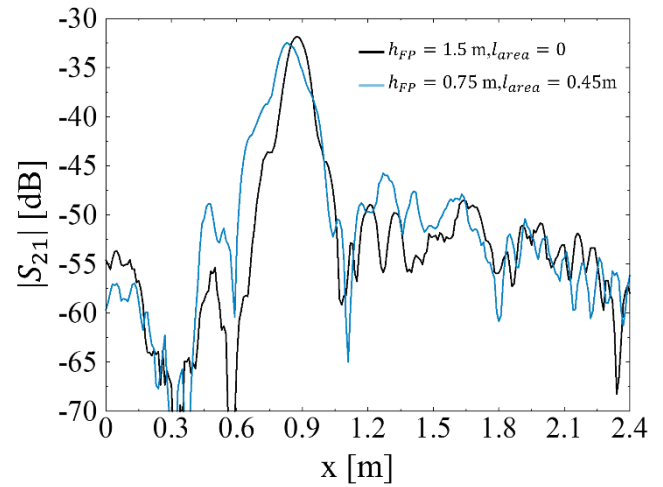


図 8:暗室での散乱パターン測定結果

4. 実環境における受信電力測定

4.1. 受信電力測定の測定環境

本実験では実環境，特に RA から受信端末が見通せる場合についての提案 RA による電波環境改善効果を明らかにする．実験の測定環境を図 4 に示す．本実験では電波環境の改善を範囲的に明らかにするために 2 軸のポジションナーに自作したモノポールを固定し受信電力を測定した．また測定範囲を 4 分割し受信電力を得た．測定面 4 範囲の測定点数の合計値の平均は 116000 点である．またホーンアンテナからの送信電力は 10 dBm となるよう出力を調整している．

4.2. 得られた受信電力分布

RA の有無による受信電力分布の違いについて図 10 に示す．今回の測定では測定面 1 において所望の領域が構築されるように RA を設置している．図 10(a)より電界強度を向上させる領域をもつ RA では主ビーム方向測定面 1, 3 の電界強度を全体的に改善していると読み取れる．図 10 のカラーマップを通して RA を設置することで測定面内の電界強度が向上することがわかった．特に領域を持つ RA では全体的な電波環境の改善につながる事が明らかとなった．

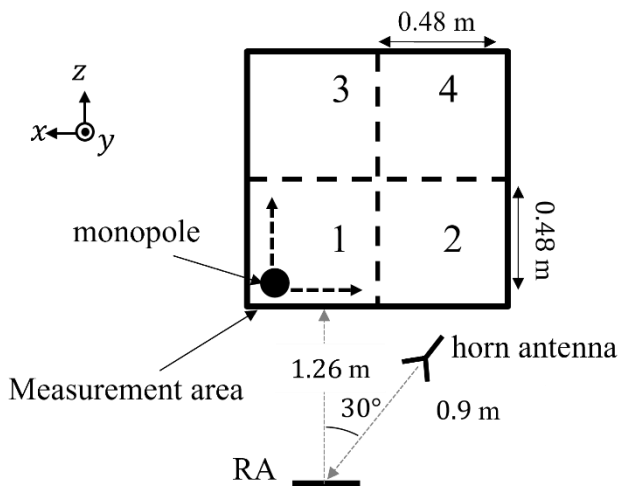
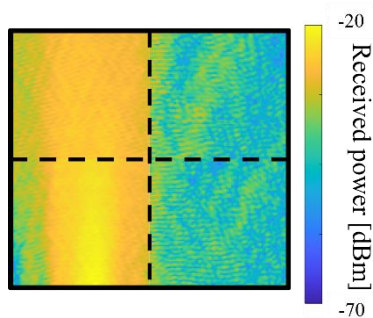
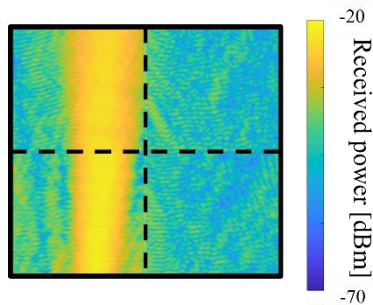


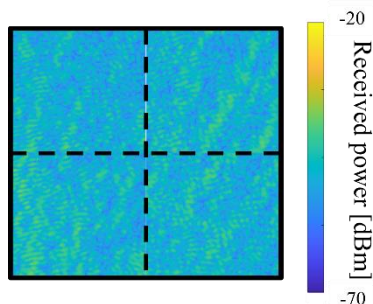
図 9:受信電力の測定環境



(a): w/RA ($l_{area} = 0.45$ m)



(b): w/RA ($l_{area} = 0$ m)



(c): w/o RA

図 10:測定した受信電力分布

5. まとめ

本報告では、フレネル領域において一定範囲内の電界強度を向上させる RA 設計法を提案し、その散乱特性を数値的・実験的に明らかにした。また提案法で設計した RA を試作し、実験を通し実環境において電波環境の改善できることを明らかにした。

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. Malech, and W. Kennedy, "The Reflectarray Antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.11, no.6, pp.645-651, Nov. 1963.
- [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, S. Uebayashi, "Novel Broadband Planar Reflectarray With Parastic Dipoles For Wierless 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, 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] Jonh W. Sharman, "Properties of Focused Apertures in the Fresnel Region," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.10, no.4 pp. 399-408, July 1962.
- [6] Paolo Nepa, Alice Buffi, "Near-Field-Focused Microwave Antennas Near-feild shaping and implementation," IEEE Antennas Propag Mag, pp42-53, April 2017.
- [7] 小柳 祐輔, 今野 佳祐, 陳 強, "フレネル領域におけるリフレクトアレーの指向性の設計," 信学ソ大, B-1-61, Sept. 2021.
- [8] 本多 出, 今野 佳祐, 陳 強, "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," 信学技報, vol. 122, no. 378, AP2022-197, pp. 1-4, Feb. 2023.