

[共同研究成果]

近傍界領域におけるリフレクタレーの設計法

今野 佳祐[†], 陳 強[†]東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻[†]

1 まえがき

次世代無線通信システムにおいて、ミリ波帯のような高周波帯の利用が想定されている。このような高周波帯を利用すると、高速、大容量、低遅延の無線通信システムが実現できるという利点がある。高周波帯を用いた無線通信システムの実現のため、様々なアンテナの研究がなされている。

リフレクタレーは、このような高周波帯における無線通信実現のための重要な技術の1つである [1]-[3]。リフレクタレーは、無数の反射素子から成る散乱体であり、一次放射器から放射される電磁波により空間的に給電される。各反射素子は、一次放射器から入射した電磁波の位相を回転させ、全ての素子の散乱電界の位相が所望の方向で同相になるように設計される。一般に、散乱体の主ビーム方向は Snell の法則にしたがうので、入射波の入射角によって自動的に決まる。その一方で、リフレクタレーの主ビーム方向は入射波の方向と独立して設計することが可能であるという利点がある。

このようなリフレクタレーを用いると、電磁波の届かない不感地帯あるいはカバレッジホールにある端末に電磁波を向けることができる。例えば、リフレクタレーを用いて市街地の電波環境を改善できることが明らかにされている [4]-[6]。また、周波数選択板を導入することで、複数の周波数帯域で動作するリフレクタレーの設計が可能であることも明らかにされている [7]。これらの研究では、端末はリフレクタレーの遠方に位置し、所望の方向で各素子の遠方界が同相になるようにリフレクタレーが設計されている。その一方で、次世代無線通信システムで利用される高周波では、高い伝搬損失を補うため、大型で高利得なリフレクタレーが利用される。リフレクタレーが大型のとき、端末は必ずしもリフレクタレーの遠方ではなく、リアクティブな近傍界領域やフレネル領域に位置することがある。したがって、高周波での大型のリフレクタレーの設計は、従来のような遠方界の設計法では不十分である。

そこで本研究では、近傍界領域におけるリフレクタレーの設計法を提案する。提案設計法は、近傍界領域にある焦点で電界を同相にする方法であり、一次放射器とリフレクタレー素子、リフレクタレー素子と焦点間の位相を厳密に考慮した設計法である。提案設計法を用いてリフレクタレーを設計し、従来の遠方界を用いた設計法との比較を行い、その有効性を明らかにする。

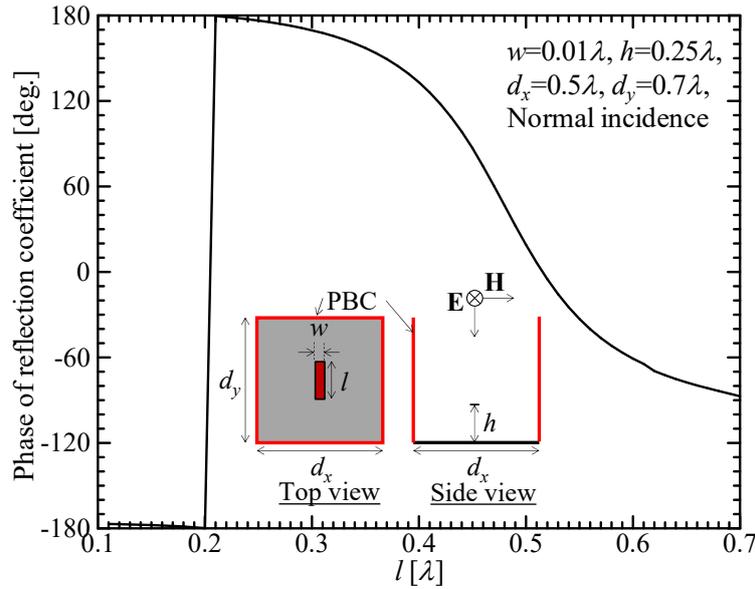


図 1: 反射板付き面状ダイポールアンテナの反射係数.

2 リフレクタレーの設計法

まず、リフレクタレーの設計の前に、リフレクタレー素子の反射係数を求める。リフレクタレー素子は無限大の反射板に裏打ちされた面状ダイポール阻止である。リフレクタレー素子の反射係数は、周期グリーン関数を用いたモーメント法によって無限周期構造を数値解析することで求める [8, 9]。周期グリーン関数の収束性の悪さは、Ewald 変換を用いて改善する [10]-[12]。波源と観測点が一致する点における特異性は、ロピタルの定理を用いて緩和する [13, 14]。基底関数と試行関数には、いずれも Rao-Wilton-Glisson (RWG) 基底関数を用いる [15]。

無限大の反射板に裏打ちされた面状ダイポール素子の反射係数の位相の数値シミュレーション結果は図 1 に示す。面状ダイポール素子の長さが変わるにつれて、反射係数の位相が変化していることが分かる。位相の変化量は約 280° ほどであった。

数値シミュレーションによって得られたリフレクタレー素子の反射係数を用いて、近傍領域に焦点を有するリフレクタレーを設計する。従来および提案するリフレクタレー設計法は図 2 に示す。遠方界に焦点があるリフレクタレーは、ある特定の角度でリフレクタレー素子の散乱界が同相になるように設計されている。リフレクタレーの散乱界が遠方界領域にある焦点に向いているので、リフレクタレー素子間の空間位相遅延差を表現するのにアレーファクタが適用できる。その一方で、近傍界に焦点があるリフレクタレーは、ある焦点でリフレクタレー素子の散乱界が同相になるように設計されている。リフレクタレーの散乱界が近傍領域にある焦点に向いているので、リフレクタレー素子間の空間位相遅延差を表現するのにアレーファクタは適用できない。したがって、提案法では、リフレクタレー素子間の空間位相遅延差を表現するのにリフレクタレー素子間の厳密な距離が用いられる。図 1 に示す反射係数の位相を用いて、リフレクト

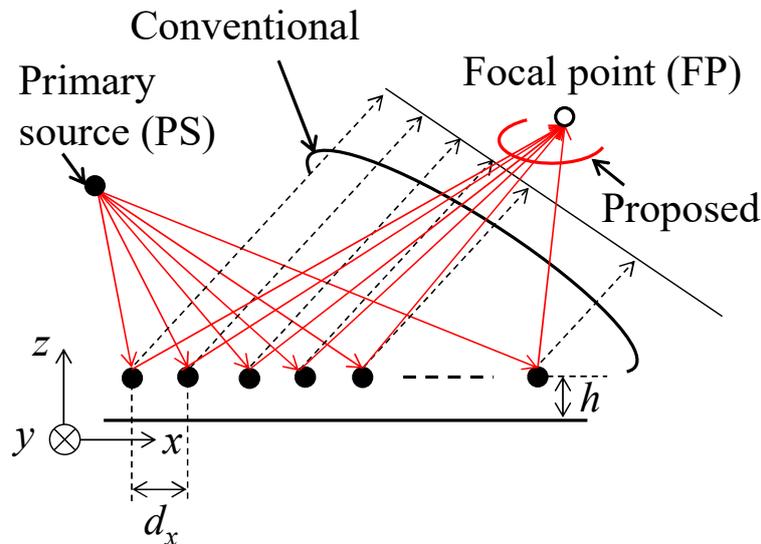


図 2: 従来および提案するリフレクタレーの設計法.

アレー素子の電界が焦点で同相になるように面状ダイポール素子の長さが決められる.

3 リフレクタレーの散乱特性

提案法を用いて, 21×21 のリフレクタレーを設計し, その散乱特性を数値的に明らかにした. 無限大の反射板を効率的にモデリングするために, 設計したリフレクタレーの数値解析は, 多層媒質のグリーン関数を用いたモーメント法を用いて行われた [16]. 多層媒質のグリーン関数の収束性を改善するため, 波源からの直接波の成分は Sommerfeld 積分から取り除かれ, スペクトル領域でなく空間領域で評価される [17, 18]. Sommerfeld 積分は数値シミュレーションの前に予め求めておき, テイラー展開を用いて補間することで必要な値を得る [19, 20]. Sommerfeld 積分の数値計算コストを減らすために, ベッセル関数の漸近展開が用いられる. 基底関数と試行関数には RWG 関数が用いられ, 波源と観測点が一致する点での特異性は座標変換と解析積分を用いた方法によって緩和される [15, 21, 22].

リフレクタレーの近傍界の数値シミュレーション結果は図 3 に示す通りである. 提案法によって設計されたリフレクタレーは, 焦点での電界強度が強くなっている一方で, 従来の方で設計されたリフレクタレーは, 単に遠方界領域におけるブロードサイド方向へビームが向いているだけである. 以上のように, 提案法を用いると, 近傍界領域にある特定の焦点で電界強度の強いリフレクタレーを設計することができる.

4 まとめ

本報告では, 近傍界領域に焦点を有するリフレクタレーを設計するための手法を提案し, 設計したリフレクタレーの散乱特性をモーメント法によって数値的に明らかにし

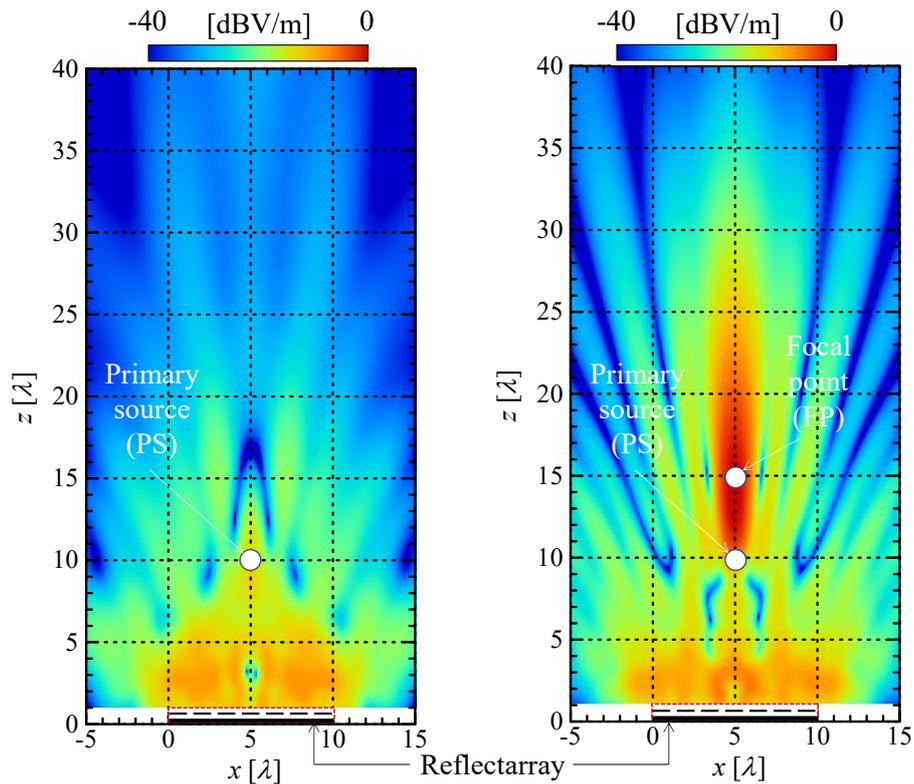


図 3: 設計したリフレクタレーの近傍界分布 (左: 遠方界領域においてブロードサイド方向にビームを向けているリフレクタレー, 右: ある焦点で電界を同相にしているリフレクタレー, $y = 7\lambda$, E_y 成分).

た. 数値シミュレーションの結果から, 従来法で設計したリフレクタレーと比較して, 提案法で設計したリフレクタレーの方が, 近傍界領域にある焦点において強い電界強度を実現できることが分かった. 今後は, 提案手法を更に拡張した高機能なリフレクタレーの設計法の研究や, スーパーコンピュータを活用した大規模リフレクタレーの数値解析法の研究などを行っていく予定である.

謝辞

本研究を遂行するのに用いたプログラムの一部は, 東北大学サイバーサイエンスセンターのサポートを受けて作成したものである. 東北大学サイバーサイエンスセンターのスタッフをはじめ, 関係各位に深謝する.

参考文献

- [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.

- [2] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," TDA Progress Report 42-120, Feb. 1995, pp. 153-173.
- [3] J. Huang and J.A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, John Wiley and Sons, 2008.
- [4] 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.
- [5] Q. Chen, "Reflectarray development for improving NLOS radio channel," in *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2013 (APMC2013)*, pp. 654-656, 2013.
- [6] Q. Chen, "Experimental study of improving wireless propagation channel by using reflectarray," in *Proc. International Workshop on Electromagnetics 2014 (iWEM2014)*, pp. 102-103, 2014.
- [7] 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.
- [8] M. G. Floquet, "Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques," *Annale École Normale Supérieure*, pp. 47-88, 1883.
- [9] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [10] P. P. Ewald, "Dispersion und Doppelbrechung von Elektronengittern (Kristallen)," *Dissertation*, München, 1912, also *Ann. Phys.* 49, p. 1, 1916.
- [11] P. P. Ewald, "Die Berechnung optischer und elektrostatischer Gitterpotentiale," *Ann. Phys.* 64, pp. 253-287, 1921.
- [12] K. E. Jordan, G. R. Richter, and P. Sheng, "An efficient numerical evaluation of the Green's function for the Helmholtz operator on periodic structures," *J. Comp. Phys.*, vol. 63, pp. 222-235, 1986.
- [13] I. Stevanović and J. R. Mosig, "Periodic Green's function for skewed 3-D lattices using the Ewald transformation," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 49, no. 6, pp. 1353-1357, Jun. 2007.

- [14] J. Su, X.-W. Xu, M. He, and K. Zhang, “Integral-equation analysis of frequency selective surfaces using Ewald transformation and lattice symmetry” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 121, pp. 249-269, 2011.
- [15] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, “Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.
- [16] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, IEEE Press, NY 1995.
- [17] W. C. Chew, J. L. Xiong, and M. A. Saville, “A matrix-friendly formulation of layered medium Green’s function,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 5, pp. 490-494, 2006.
- [18] Y. P. Chen, W. C. Chew, and L. Jiang, “A new Green’s function formulation for modeling homogeneous objects in layered medium,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 10, pp. 4766-4776, Oct. 2012.
- [19] K. Konno, Q. Chen and R.J. Burkholder, “Fast Computation of Layered Media Green’s Function via Recursive Taylor Expansion,” *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp.1048-1051, 2017.
- [20] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed., John Willey & Sons, pp. 967-979.
- [21] R. D. Graglia, “On the numerical integration of the linear shape functions times the 3-D Green’s function or its gradient on a plane triangle,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 10, pp. 1448-1455, Oct. 1993.
- [22] D. R. Wilton, S. M. Rao, A. W. Glisson, D. H. Schaubert, O. M. Al-Bundak, and C. M. Butler, “Potential integrals for uniform and linear source distributions on polygonal and polyhedral domains,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 32, no. 3, pp. 276-281, March 1984.