

[共同研究成果]

ベクトル型スーパーコンピュータを用いた 大規模リフレクタレーの高利得化

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

リフレクタレーは、入射波を所望の方向に散乱するように設計した構造であり、従来の反射鏡アンテナに代わる薄型・軽量アンテナとして注目されている [1]-[3]。リフレクタレーは、大きさの異なる多数の散乱体から成る。散乱体の大きさによって散乱電界の位相が制御され、所望の方向に等位相面が形成される。したがって、リフレクタレーの設計において、素子の大きさの決め方はビーム方向や利得を決定する上で重要である。

リフレクタレーの素子の大きさは、素子の反射係数の位相を用いて決定するのが一般的である [4]-[6]。素子の反射係数は素子間相互結合の影響を受けるため、その値を正確に求めるにはリフレクタレーの構造が予め分かっている必要がある。したがって、リフレクタレーの素子の大きさを決めるには正確な反射係数の情報が必要であるが、そのためにはリフレクタレー素子の大きさが分かっているなければならないというジレンマがある。そこで従来の研究では、同一の大きさの素子が有限あるいは無限周期で配置された構造を仮定して近似的に求めた反射係数を利用してリフレクタレーを設計している [7]-[9]。これらの方法で求めた反射係数は、素子の大きさが緩やかに変化するような構造中ではある程度正しいことが分かっているが、リフレクタレーの構造は必ずしもそうではない。また、これらの方法で求めた反射係数は、リフレクタレーの素子間相互結合を正しく評価して得られた値ではないため、素子間相互結合の影響で利得が低下することは避けられない。

そこで本研究では、ベクトル型スーパーコンピュータを用いたリフレクタレーの高利得化法を提案し、その有効性を明らかにする。提案法では、有限周期構造を仮定して求めた反射係数によって設計したリフレクタレーを、素子間相互結合を正しく評価しながら高利得化していく。長い時間を要する素子間相互結合の計算は、反復法とベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE によって高速に処理する。素子長を逐次的に変えながら利得を計算し、利得が上昇するように素子長を変化させていく。数値シミュレーションによって、素子間隔が小さいときに提案法が大きな効果を発揮することを明らかにする。

2 提案設計法

提案設計法のアルゴリズムは以下に示すとおりである [10]。

1. 有限周期構造を仮定し、素子の反射係数を近似的計算。

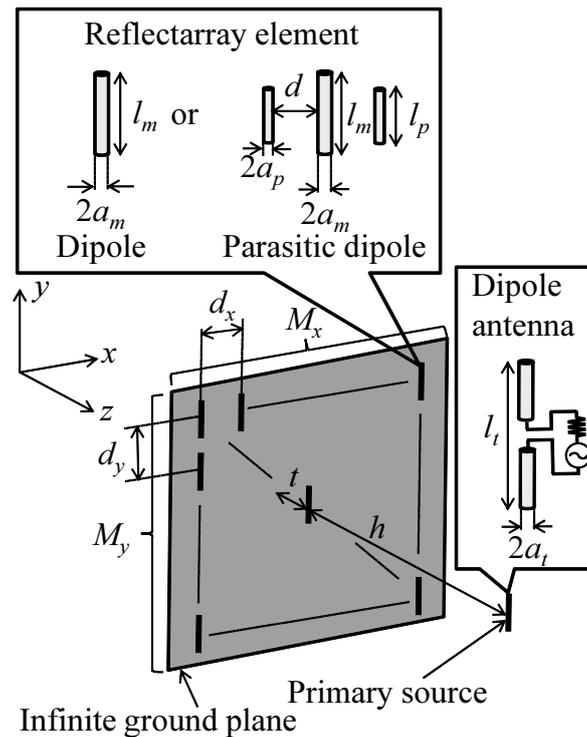
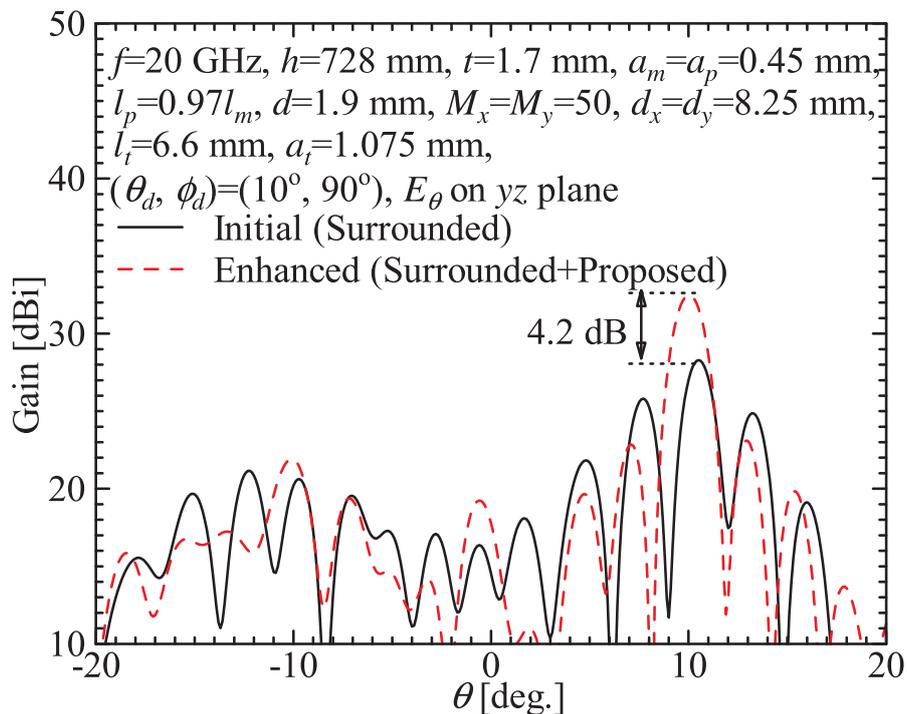


図 1: 線状素子リフレクトアレーモデル.

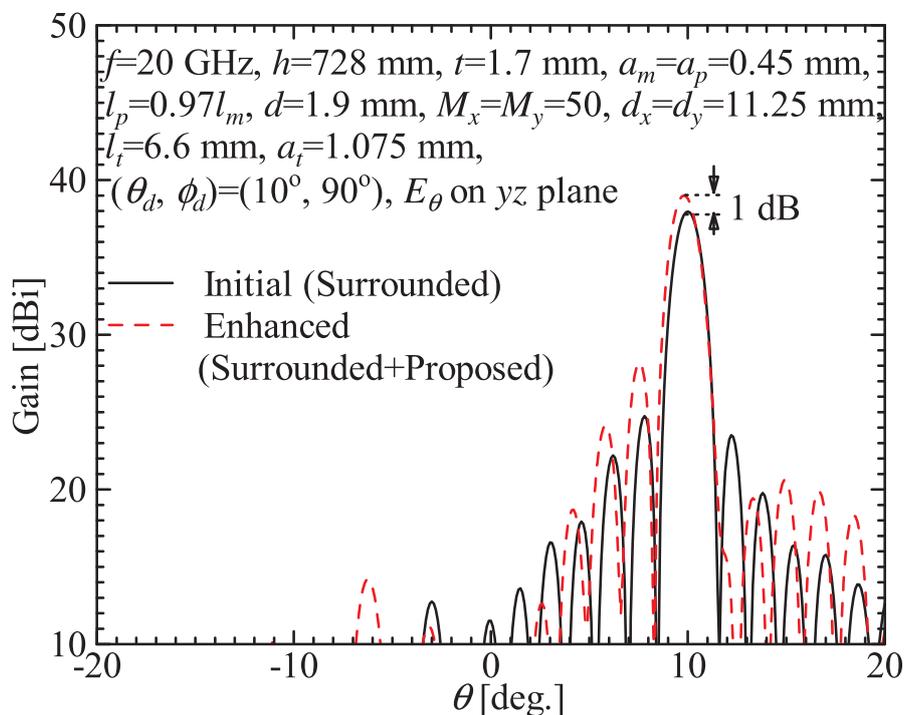
2. 得られた反射係数から、リフレクトアレー素子長の初期値を求める。
3. 第 m リフレクトアレー素子長を l_m から $l_m \pm \Delta l$ へ変え、インピーダンス行列の対応部分を更新する。
4. 素子長が更新されたリフレクトアレーの利得 $G(l_m \pm \Delta l)$ を、前処理付き共役勾配法 (Pre-conditioned Conjugate Gradient Method) によって求める。
5. $G(l_m + \Delta l) > G(l_m)$ かつ $G(l_m + \Delta l) > G(l_m - \Delta l)$ であるなら、 G が極大値になるまで第 m 素子長を増やし続ける。 $G(l_m - \Delta l) > G(l_m)$ かつ $G(l_m - \Delta l) > G(l_m + \Delta l)$ であるなら、 G が極大値になるまで第 m 素子長を減らし続ける。 $G(l_m) > G(l_m + \Delta l)$ かつ $G(l_m) > G(l_m - \Delta l)$ であるなら、第 m 素子長をそのままにする。
6. m が M に達するまで 3～5 を繰り返し実行する。ここで、 $M = M_x M_y$ はリフレクトアレー全体の素子数である。

提案設計法は、起電力法による線状素子リフレクトアレー設計法を用いている [11]。前処理付き共役勾配法を用いても、素子長を更新する都度リフレクトアレー全体の電流を計算するのは非常に長い時間がかかる。そこで本報告では、サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE を用いて計算の高速化を図る。ベクトル型スーパーコンピュータは、ベクトル演算と呼ばれる機能を持っており、繰り返し演算を一括して実行することが可能である。本報告の数値計算結果は、プログラムを最適化し、全ての演算に対するベクトル演算の割合 (ベクトル演算率) を 99.2% まで向上させることで、高速に得られた結果である。

3 数値計算結果

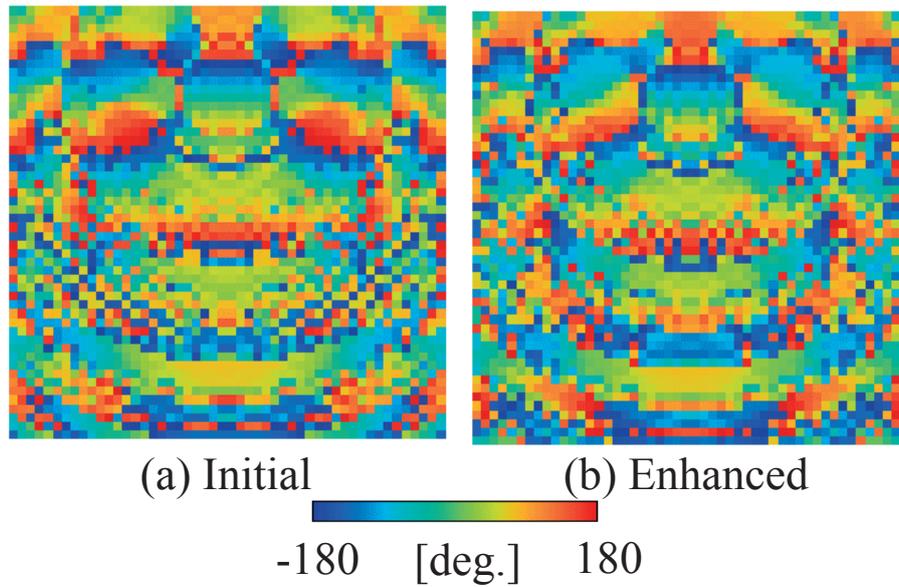


(a) $d_x = d_y = 0.55\lambda$.

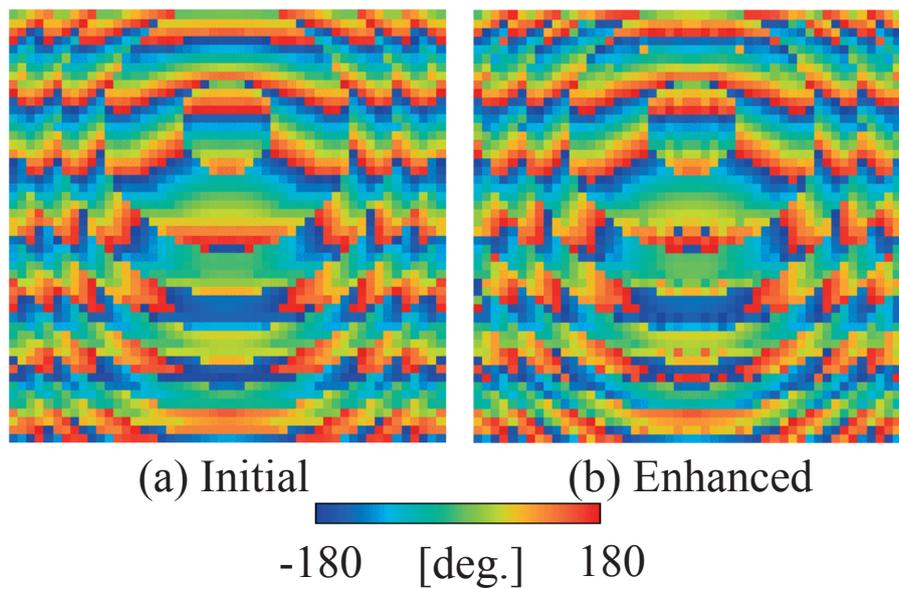


(b) $d_x = d_y = 0.75\lambda$.

図 2: リフレクタレーの利得 ($F/D = 1$).



(a) $d_x = d_y = 0.55\lambda$.



(b) $d_x = d_y = 0.75\lambda$.

図 3: リフレクタレーの開口位相分布 ($F/D = 1$).

50 × 50 素子のリフレクタレーを提案法によって設計した。初期構造の設計には Surrounded element approach を用い、3 × 3 の有限周期構造中にある素子の反射係数の位相を用いて設計した [8]。リフレクタレーの利得を図 2 に示す。提案法によって得られたリフレクタレーの利得は、初期構造の利得から大幅に改善されていることが分かる。特に、素子間隔が小さいときの改善量が大きく、4.2 dB もの改善量が得られている。高利得化の要因を明らかにするために、開口位相分布を図 3 に示す。図 3 から、特に素子間隔が小さいとき、開口面上の位相が不連続的に変化し

ている部分があることが見て取れる。このことは、反射係数を計算するときに仮定した素子長の局所的な周期性が、実際のリフレクタレーでは必ずしも成り立たないことを示唆している。したがって、特に素子間隔が狭いときは、素子間相互結合を厳密に評価してリフレクタレーを設計することが重要であると考えられる。

提案手法によってリフレクタレーを設計するのに必要な時間は、それぞれ 52,156 秒 ($d_x = d_y = 0.55\lambda$)、37,935 秒 ($d_x = d_y = 0.75\lambda$) であった。Full-wave の数値計算 1 回あたりの計算時間はそれぞれ 16.2 秒 ($d_x = d_y = 0.55\lambda$)、8.3 秒 ($d_x = d_y = 0.75\lambda$) であった。どちらも未知数 10,000 を超える大規模な問題なので、PC を用いた場合は 1 回の計算に数時間程度の時間が必要となる。したがって、ベクトル型スーパーコンピュータによって数千倍程度の高速化が実現できたことが分かる。

4 まとめ

本報告では、大規模リフレクタレーの高利得化のための手法を提案した。提案手法は、素子間相互結合を厳密に評価しながらリフレクタレーを設計する手法であり、反復法とベクトル型スーパーコンピュータを併用することによって高速化を実現している。数値シミュレーションの結果、素子間隔が狭いときに、提案法が大きな効果を示すことが分かった。

謝辞

本研究成果は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を用いて得られたものである。スタッフをはじめ、関係各位に深く感謝する。

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, Refrectarray Antennas, John Wiley and Sons, 2008.
- [4] C. Wan and J.A. Encinar, “Efficient computation of generalized scattering matrix for analyzing multilayered periodic structures,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 43, no. 11, pp. 1233-1242, Nov. 1995.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] F. Venneri, G. Angiulli, and G. Di Massa, “Design of microstrip reflectarray using data from isolated patch analysis,” *Microw. Optical Technol. Lett.*, vol.34, no.6, pp.411-414, Sept. 2002.
- [8] M.-A. Milon, D. Cadoret, R. Gillard, and H. Legay, “‘Surrounded-element’ approach for the simulation of reflectarray radiating cells,” *IET Microw. Antennas Propag.*, vol.1, no.2, pp.289-293, April 2007.
- [9] C. Yann, R. Loison, R. Gillard, M. Lebeyrie, and J.-P. Martinaud, “A new approach combining surrounded-element and compression methods for analyzing reconfigurable reflectarray antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 7, pp. 3215-3221, July 2012.
- [10] K. Konno and Q. Chen, “Enhancing Aperture Efficiency of Reflectarray by Accurately Evaluating Mutual Coupling of Reflectarray Elements,” *IEICE Commun. Express*, vol. 5, no. 9, pp.341-346, 2016.
- [11] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, S. Kameda and N. Suematsu, “Novel design method for reflectarray by induced electromotive force method,” *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, 429.3, pp.1342-1343, July 2013, Florida, USA.