

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

Enhancing Gain of Large-Scale Reflectarray Using Vector Supercomputer

今野 佳祐
Keisuke Konno

陳 強
Qiang Chen

東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻
Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

1 まえがき

従来の反射鏡アンテナに代わる薄型・軽量のアンテナとして、リフレクタレーの研究が盛んに行われている[1]。リフレクタレーは、異なる大きさの素子を並べることで反射波の等位相面を制御し、所望の方向にビームを向ける散乱体である。その設計には、予め求めた反射係数の位相と素子の大きさとの関係を利用するのが一般的である。ところが、リフレクタレーの構造が定められないため、反射係数を厳密に求めることは困難である。そこで従来の研究では、同一の大きさの素子が有限周期や無限周期で並んだ構造を仮定して求めた反射係数を利用して設計がなされてきた[2]。このように求めた反射係数は、素子の大きさが緩やかに変化するような構造中ではその妥当性が分かっているが、リフレクタレーの構造は必ずしもそうではない。また、いずれの手法で得られた反射係数も、リフレクタレーの素子間相互結合を厳密に評価して得られた反射係数ではないので、素子間相互結合の影響による利得の低下は避けられない。

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、素子間相互結合を厳密に評価しながら高利得化していく。素子間相互結合の評価に要する計算時間は、反復法とベクトル型スーパーコンピュータによって削減する。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構造を変化させていく。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を以下に示す。

1. 有限周期構造を仮定して、リフレクタレー素子の反射係数を近似的に計算する。
2. 得られた反射係数から、リフレクタレー素子の素子長の初期値を求める。
3. 第 m リフレクタレー素子の素子長を 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タレーの利得 $G(l_m \pm \Delta l)$ を、前処理付き共役勾配法によって求める。
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 素子の長さを増

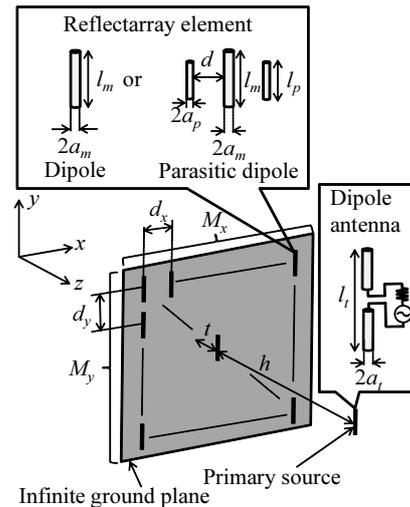


図1 線状素子リフレクタレーモデル。

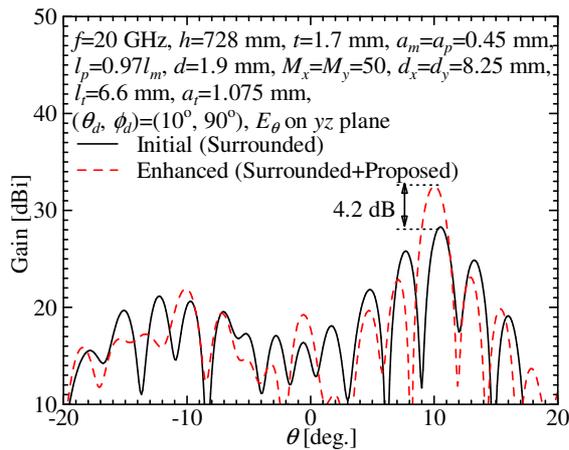
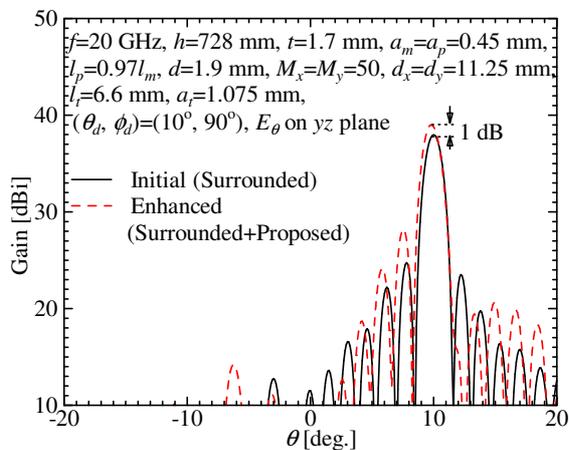
やし続ける。 $G(l_m - \Delta l) > G(l_m)$ かつ $G(l_m - \Delta l) > G(l_m + \Delta l)$ であるなら、 G が極大値になるまで第 m 素子の長さを減らし続ける。 $G(l_m) > G(l_m + \Delta l)$ かつ $G(l_m) > G(l_m - \Delta l)$ であるなら、第 m 素子の素子長をそのままにする。

6. m が M に達するまで 3 ~ 5 を繰り返す。ここで、 $M = M_x M_y$ はリフレクタレーの素子数である。

提案設計法は、起電力法による線状素子リフレクタレー設計法を用いている[3]。前処理付き共役勾配法を用いても、素子の長さを更新する度にリフレクタレー全体の電流を計算するのは非常に大きな時間がかかる。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 を用いることで計算時間を削減する。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できる。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%まで向上させた上で高速に得られた結果である。

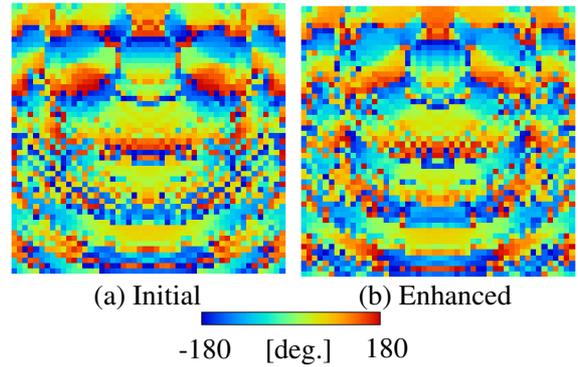
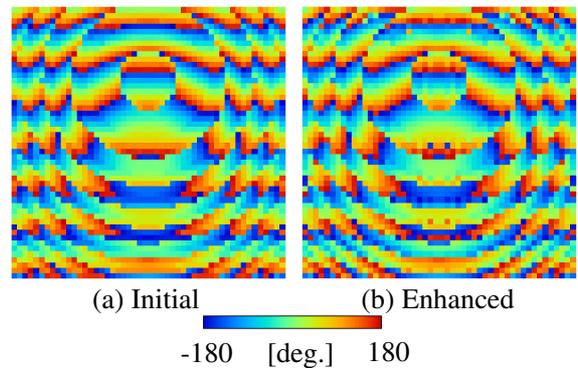
3 数値シミュレーション結果

50 × 50 素子のリフレクタレーを提案法で設計した。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から設計した[2]。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

(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 ($F/D = 1$).

構造の利得から大きく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た．高利得化の原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に変化している部分があることが分かる．このことは，反射係数を計算するとき仮定した局所的な周期性が，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，特に素子間隔が小さいときは，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要した時間は，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 シミュレーション 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

(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 ($F/D = 1$). 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で高速化を図っている．数値シミュレーションの結果，素子間隔が小さいときに，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．本研究は，日本学術振興会海外特別研究員制度および JSPS 科研費 26820137 の助成を受けたものである．

参考文献

- [1] J. Huang and J.A. Encinar, *Refrectarray Antennas*, John Wiley and Sons, 2008.
- [2] M.-A. Milon, et al., *IET Microw. Antennas Propag.*, vol.1, no.2, pp.289-293, April 2007.
- [3] K. Konno, et al., *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, 429.3, pp.1342-1343, July 2013.