

[共同研究成果]

起電力法を用いた低姿勢な大規模リフレクタレーの設計

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

大型の開口面アンテナは, 高利得な特性を持つことからレーダーや宇宙探査, 衛星通信等の分野で広く用いられている. 従来は, 大型のパラボラアンテナがこれらの用途でよく用いられてきたが, かさばる上に重く, 運用中に形状が歪むという欠点があった.

近年, 大型の開口面アンテナに代わる新たなアンテナとして, 平面型のリフレクタレーが大きな注目を集めている [1], [2]. 平面型リフレクタレーは, 基板加工によって容易に製作することができ, パラボラアンテナに比べて薄型で軽量だという利点がある. また, 大規模化によって開口面積を大きくすれば, 平面型リフレクタレーの高利得化を図ることもできる. しかしながら, 大規模なリフレクタレーの設計には長い時間がかかるという問題点があり, 高速な設計手法が望まれている. そこで筆者らは, 起電力法を用いた高速なリフレクタレー設計法を提案してきた [3], [4].

その一方で, 大規模化によるリフレクタレーの高利得化実現のためには, リフレクタレーの開口面全体が一次放射器からの電磁波で励振されている必要がある. そのため, これまでの大規模リフレクタレーでは, 一次放射器とリフレクタレーが波長に対して大きく離れていることが多く, 低姿勢とは言えなかった.

本報告では, ベクトル型スーパーコンピュータを用いて筆者らの提案手法を高速化する. 大規模な低姿勢リフレクタレーの設計を行い, 高速化した提案手法の有効性を数値的に明らかにする.

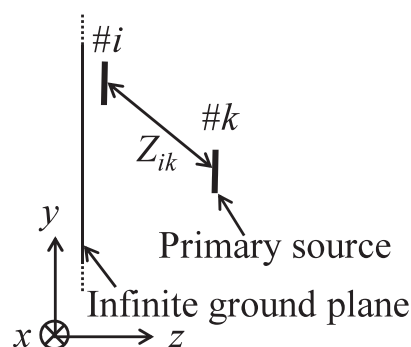


図 1: 線状ダイポール素子間の相互インピーダンス.

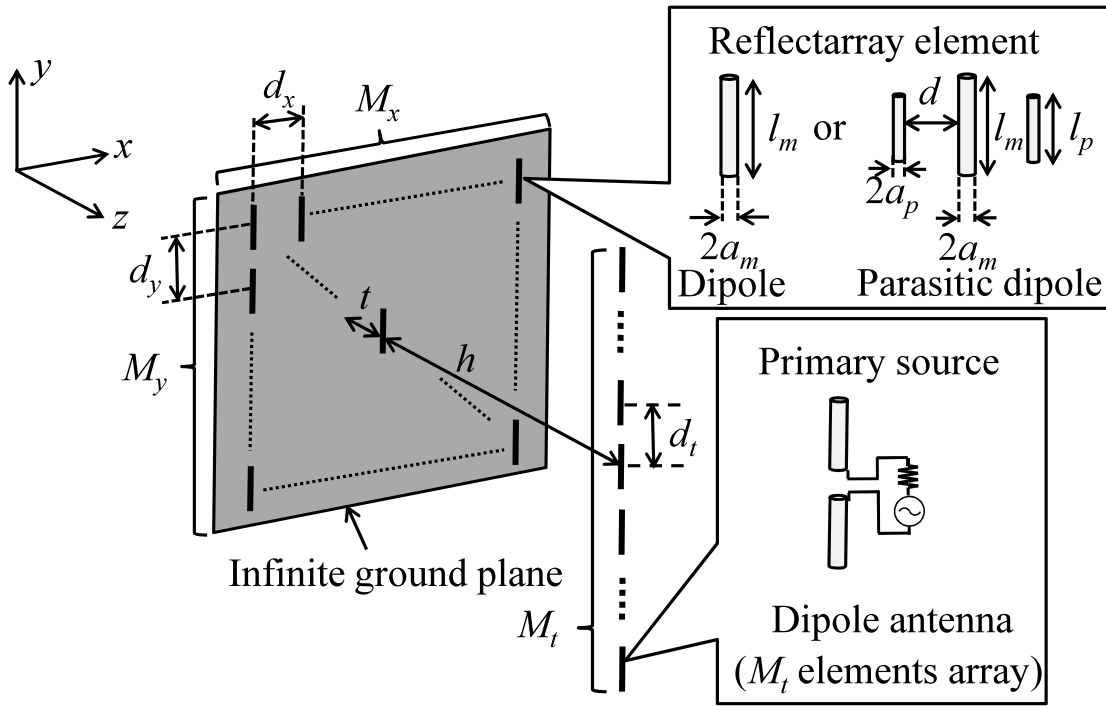


図 2: 数値シミュレーションモデル.

2 起電力法を用いたリフレクトアレー設計法

2.1 起電力法

起電力法を用いると、図 1 に示すような一次放射器と第 i リフレクトアレー素子間の相互インピーダンスは以下の式で表される.

$$Z_{ik} = - \int_{y_c - l_i}^{y_c + l_i} E_y \frac{I_i^* \sin k_0(l_i - |y - y_c|)}{I_k \sin(k_0 l_k) I_i^* \sin(k_0 l_i)} dy, \quad (1)$$

ここで、 E_y は第 i リフレクトアレー素子の入射電界の y 成分であり、 l_k と l_i はそれぞれ一次放射器と第 i リフレクトアレー素子の長さである。 y_c は第 i リフレクトアレー素子の中心の y 座標であり、 I_k と I_i はそれぞれ一次放射器と第 i リフレクトアレー素子の電流である. なお、 k_0 は真空中の波数である.

我々の提案手法では、各位置にあるリフレクトアレー素子の電流が (1) 式から得られる. 従って、一次放射器からリフレクトアレー素子への入射電界の角度や距離が、リフレクトアレー素子の散乱電界の位相に与える影響を厳密に考慮することができる. また、線状素子の相互インピーダンスの計算は短時間で済むため、計算時間が短いという利点もある.

2.2 提案設計法による線状素子リフレクトアレーの設計

リフレクトアレーは、多数の素子を用いて、一次放射器からの入射波を所望の方向に散乱させる構造である. 所望の方向に強い電磁波を散乱させるためには、全ての素子の散乱波の位相がその方向で揃っている必要がある. 一次放射器からの距離が素子ごとに異なるため、入射波の位相は素子

ごとに異なる。従って、素子ごとにバラバラとなる入射波の位相を一定に揃えるため、リフレクタレー素子の長さは1つ1つ異なる。また、入射波の位相と所望の散乱波の位相との差は最大で 2π ラジアンであるため、長さ以外のリフレクタレー素子の寸法(基板の厚み、素子間隔、素子の太さ等)は最適化され、長さの変化に対して 2π ラジアン以上の位相変化を実現できるようにする。

提案設計法によって、線状素子リフレクタレーは以下のように設計される。

1. リフレクタレー素子数, 素子間距離, 反射板と素子間の距離や一次放射器の位置など, リフレクタレーの基本的な構造を決定する。
2. 起電力法を用い, 各位置にあるリフレクタレー素子の電流を素子長に対して数値計算する。このとき, 反射板の大きさは無限とし, 鏡像法を用いる。また, 素子の電流を計算するとき, リフレクタレー素子間の相互結合は無視する。
3. 所望の散乱方向 (θ_d, ϕ_d) を決定する。そして, (2) で数値計算した電流を用い, 各位置にある素子の (θ_d, ϕ_d) 方向の散乱電界の位相と素子長との関係を求める。
4. 任意の位置にある素子の長さを適当に固定し, その素子が (θ_d, ϕ_d) 方向へ散乱する電界の位相 P を位相の基準とする。その他の位置にあるリフレクタレー素子の長さは, (θ_d, ϕ_d) 方向へ散乱する電界の位相が P となるように決める。

提案設計法の利点は2つ挙げられる。1つは、一次放射器からリフレクタレー素子への入射電界の角度や距離が、リフレクタレー素子の散乱電界の位相に与える影響を厳密に考慮できることである。もう1つは、リフレクタレー素子を線状素子とし、かつリフレクタレー素子間の相互結合を無視しているため、設計に要する時間が短いことである。

3 数値シミュレーション

3.1 シミュレーションモデル

提案手法を用いて、大規模な低姿勢リフレクタレーを設計する。シミュレーションモデルを図2に示す。リフレクタレー素子は、ダイポール素子と寄生ダイポール素子の2種類とし、一次放射器はダイポールアレーアンテナとする。ダイポール素子及び寄生ダイポール素子の中央にある素子の長さ、半径はそれぞれ l_m, a_m である。寄生素子とダイポール素子との素子間隔を d 、寄生素子の長さ、半径をそれぞれ $l_p(= \alpha l_m), a_p$ とする。 M_x, M_y はそれぞれ x 方向と y 方向におけるリフレクタレーのアレー素子数であり、 d_x と d_y はそれぞれ x 方向と y 方向の素子間隔である。リフレクタレー素子と反射板との距離を t 、リフレクタレー素子と一次放射器との距離を h とする。図に示すように、一次放射器の素子数は M_t 、素子間隔は d_t とする。反射板の大きさは無限大とし、鏡像法を用いた。数値シミュレーションには東北大学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-9 を用い、8 並列で計算を行った。

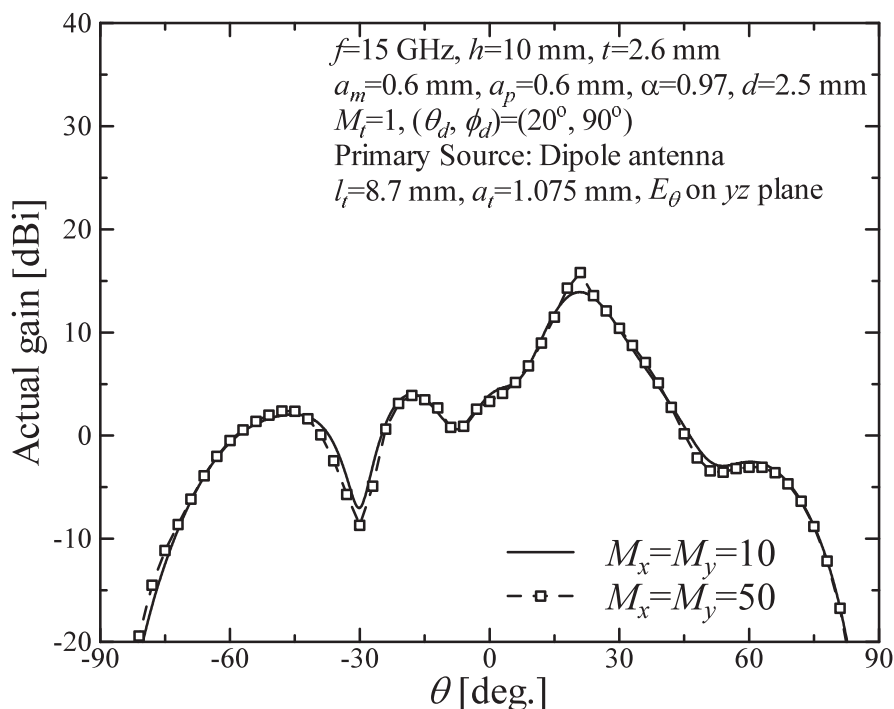


図 3: 大規模低姿勢リフレクトアレーの散乱パターン ($M_x = M_y = 50$, $M_t = 1$).

3.2 数値シミュレーション結果

大規模な低姿勢リフレクトアレーの動作利得パターンを、比較的小規模なりフレクトアレーの動作利得パターンと共に図 3 に示す。図から、リフレクトアレーの素子数を増やしても、動作利得パターンはほとんど変わらないことが分かる。図 4 に、リフレクトアレー開口上の電流分布を示す。電流分布から分かるように、小規模なりフレクトアレー ($M_x = M_y = 10$) は開口面全体が励振されているのに対して、大規模なりフレクトアレー ($M_x = M_y = 50$) は開口面全体が必ずしも励振されていない。数値シミュレーションでは、リフレクトアレーと一次放射器との距離 h を $\lambda/2$ で固定している。このように、リフレクトアレーと一次放射器との距離が近い場合、リフレクトアレーを大規模化しても、リフレクトアレー中央部から離れた素子には一次放射器からの電磁波がほとんど届かず、利得が上がらない。

アレー化した一次放射器を有する大規模低姿勢リフレクトアレーの動作利得パターンを図 5 に、開口面の電流分布を図 6 に示す。一次放射器をアレー化したことによって、開口面全体が強く励振され、結果的に動作利得が向上したことが分かる。

SX-9 を用いて、図 5 に示す動作利得パターンを有する大規模リフレクトアレーの設計に要した時間は 6378 秒であり、設計した大規模リフレクトアレーの数値シミュレーションに要した時間は 411 秒であった。なお、どちらの数値シミュレーションでも 99.5% 以上の高いベクトル化率を実現した。Intel Core i5-3470 CPU を用いた PC で数値シミュレーションを行う場合、リフレクトアレーの設計に必要な時間は 100 時間を超えるため、大規模な低姿勢リフレクトアレーの設計にはベクトルスーパーコンピュータ SX-9 を利用したベクトル演算が有効と言える。

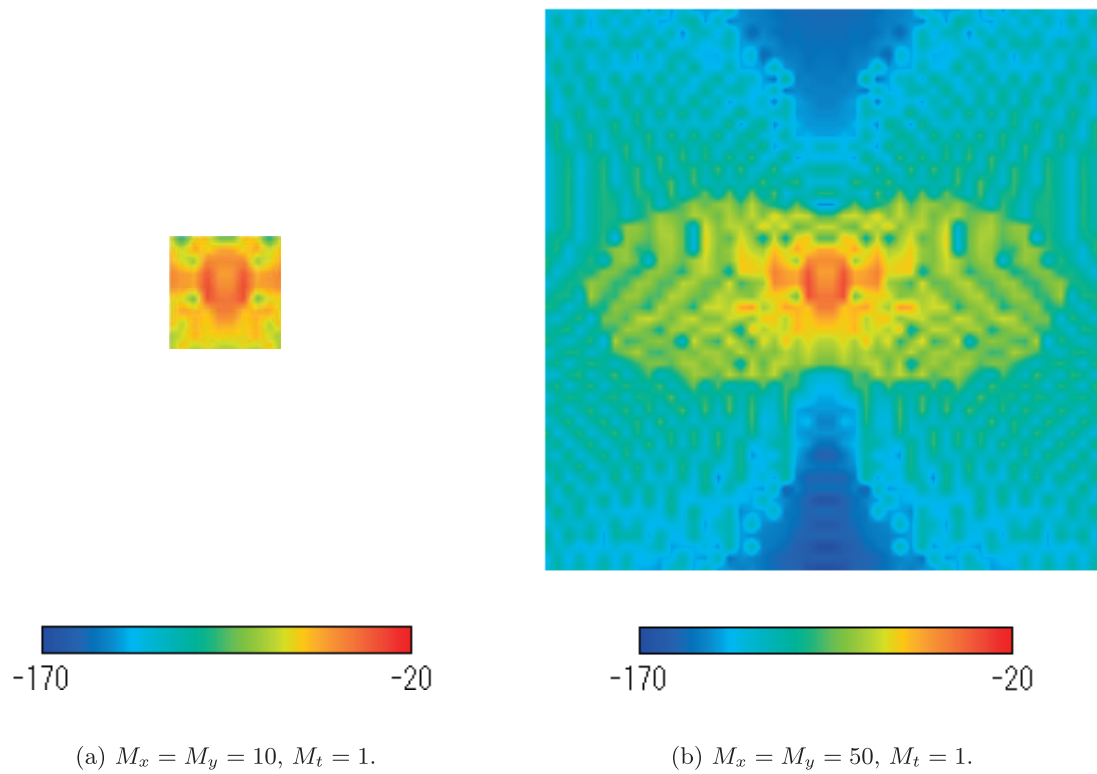


図 4: 低姿勢リフレクタレー開口上の電流分布 [dBA/m].

4 むすび

本報告では、起電力法を用いたリフレクタレー設計法とベクトルスーパーコンピュータ SX-9 を利用して、大規模な低姿勢リフレクタレーを設計した。また、大規模な低姿勢リフレクタレーの高利得化には、一次放射器のアレー化が有効性であることを数値的に明らかにした。

謝辞

本研究は、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-9 を利用して行われたものである。スタッフを始め、関係各位に深く感謝する。

参考文献

- [1] J. Huang, “Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications,” TDA Progress Report 42-120, pp. 153-173, Feb. 1995.
- [2] J. Huang and J.A. Encinar, Reflectarray Antennas, John Wiley & Sons, 2008.

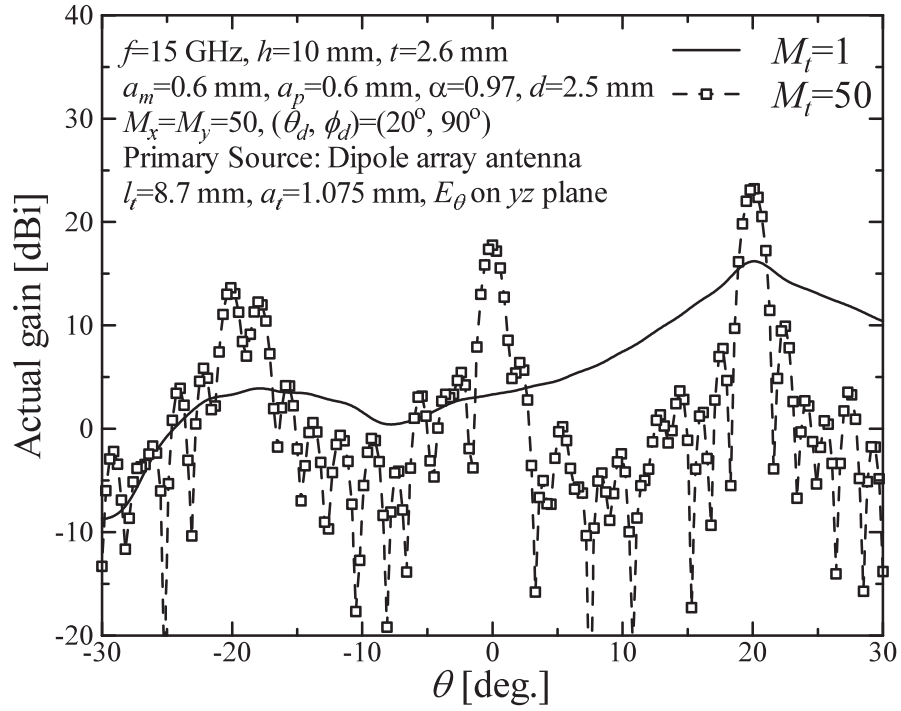


図 5: アレー化した一次放射器を有する大規模低姿勢リフレクトアレーの散乱パターン ($M_x = M_y = 50$, $M_t = 50$).

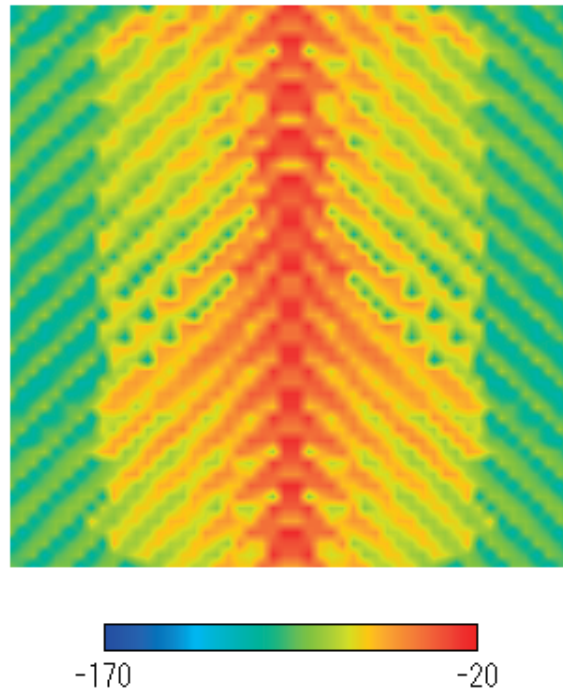


図 6: 低姿勢リフレクトアレー開口上の電流分布 [dBA/m] ($M_x = M_y = 50$, $M_t = 50$).

- [3] 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.

- [4] K. Konno, Q. Chen, S. Kameda and N. Suematsu, “Design of finite FSS-backed reflectarray by using BDP-CG method,” Proc. iWAT2014, pp. 200-202, March 2014.