

ベクトル型スーパーコンピュータを用いた 大規模マルチビームリフレクタレーの高速設計

Fast Design of Large-Scale Multi-beam 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

近年、衛星通信等への応用が期待されることから、マルチビームリフレクタレーの研究が盛んである。これまで、様々なマルチビームリフレクタレーの設計法が提案されてきたが、リフレクタレー素子と一次放射器の相互結合を厳密に考慮した設計法はない[1]。また、素子間相互結合を考慮してマルチビームリフレクタレーを設計するのは長い計算時間がかかるため、設計法の高速化が必須である。本報告では、素子間相互結合を厳密に考慮したマルチビームリフレクタレーの設計法を提案し、ベクトル型スーパーコンピュータを用いて高速化する。大規模マルチビームリフレクタレーの設計例を示し、その有効性を数値的に明らかにする。

2 提案設計法

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[2]。まず、所望の方向にビームを持つリフレクタレーを設計し、得られた構造におけるリフレクタレー素子の長さを初期値とする。次に、あるリフレクタレー素子の長さを変え、対応するインピーダンス行列要素を更新し、リフレクタレーの電流を計算する。得られた電流から遠方界を計算し、2つ目のビームを向けたい方向の遠方界強度が上がっていれば素子の長さを更新する。以上の数値計算を、1つ目のビームと2つ目のビームの遠方界強度が等しくなるか、全ての素子の長さを更新し終わるまで継続する。

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、行列方程式を前処理付き共役勾配法で解き、更にベクトル型スーパーコンピュータを利用することで計算時間の削減を図る。

3 ベクトル型スーパーコンピュータによる高速化

ベクトル型スーパーコンピュータは、プログラムのループ中で繰り返し処理される配列データの演算を一括実行するというベクトル演算機能を持っている[3]。加えて、プログラムのループ中の繰り返し処理を並列実行する並列演算機能も備えている。ベクトル演算は最も内側のループに、並列演算は外側のループに適用されるため、多重ループ内で最も内側のループ長が長くなるようにチューニングを行えば、ベクトル演算・並列演算によって計算時間の大幅な短縮が可能となる。ベクトル演算による高速化のためのチューニングの概念を図1に示す。

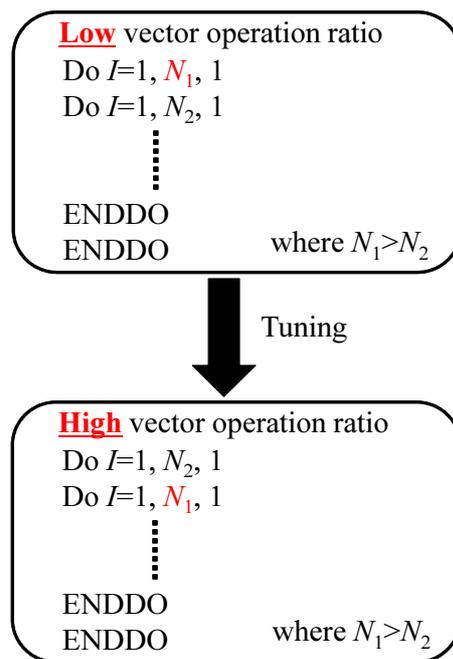


図1 ベクトル演算による高速化のためのチューニングの概念。

提案設計法では、インピーダンス行列要素の更新、前処理付き共役勾配法による行列方程式の求解、リフレクタレー遠方界の演算といった3つの処理を繰り返し行う。前処理付き共役勾配法で最も大きな計算時間を要するのは行列-ベクトル積の演算であり、行列-ベクトル積は、ループ長が行列サイズと同じ長さの2重ループで演算される。したがって、行列方程式が大規模であれば、自動的に最も内側のループはベクトル演算で、外側のループは並列演算によってそれぞれ処理され、行列方程式の求解は自動的に高速化される。その一方で、インピーダンス行列要素の更新と、リフレクタレー遠方界の演算を行う部分はそれぞれループ長の異なる多重ループで処理されるため、ベクトル演算・並列演算による高速化を実現するためにはチューニングが必要となる。大規模リフレクタレーでは素子数が非常に多くなることから、本報告では素子数に対応するループが最も内側になるようにチューニングを行い、インピーダンス行列要素の更新およびリフレクタレー遠方界の演算を行う部分をベクトル演算・並列演算によって高速化する。

4 数値シミュレーション結果

提案設計手法により、大規模なマルチビームリフレクトアレーを設計した。リフレクトアレーの構造を図2に示す。リフレクトアレーは、ダイポール素子および寄生素子付きダイポール素子から成り、背面には反射板を設けている。本報告の数値シミュレーション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 を利用して8 並列で行われ、ベクトル演算率は99.5%であった。なお、本報告ではE面でのビーム走査を行うリフレクトアレーを設計したため、リフレクトアレーはH面について対称な構造を持ち、設計にも対称性を利用している。

設計した 50×50 素子マルチビームリフレクトアレーの指向性を図3にそれぞれ示す。図3から、所望の方向に2つのビームが得られていることが分かる。2方向にビームを向けているため、1方向にビームを向けたリフレクトアレーに比べて実効開口効率が下がり、指向性利得はその結果4.8 dB低下している。

マルチビームリフレクトアレーの設計に要した計算コストを表1に示す。リフレクトアレーの電流を求める際に解いた行列方程式のサイズは 10738×10738 であり、マルチビームリフレクトアレーの設計に要した時間は約5時間であった。マルチビームリフレクトアレーの設計において、インピーダンス行列要素の更新、前処理付き共役勾配法による行列方程式の求解、リフレクトアレー遠方界の演算といった一連の処理は計4861回行われており、1回あたりの計算時間は4秒程度と非常に短い。その一方で、ベクトル演算による高速化を行うために配列を最大限活用したことに伴い、必要な計算機メモリが33.6 GBと非常に大きくなったことが分かる。

5 まとめ

本報告では、大規模なマルチビームリフレクトアレーの設計法を提案した。反復法とベクトル型スーパーコンピュータを利用した提案設計法の原理を説明した。数値シミュレーションによって大規模なマルチビームリフレクトアレーを設計し、提案設計法の有効性を数値的に明らかにした。

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-9 を用いて得られた。本研究成果の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) 電波有効利用促進型研究開発の助成を受けて得られた。

参考文献

- [1] P. Nayeri et al., IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 9, pp. 4598-4605, Sept., 2013.
- [2] K. Konno, et al., Proc. IEEE AP-S Int. Symp., 429.3, pp.1342-1343, July 2013.
- [3] サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部, “スーパーコンピュータシステム SX-9 利用ガイド”, p. 2, 2014年4月.

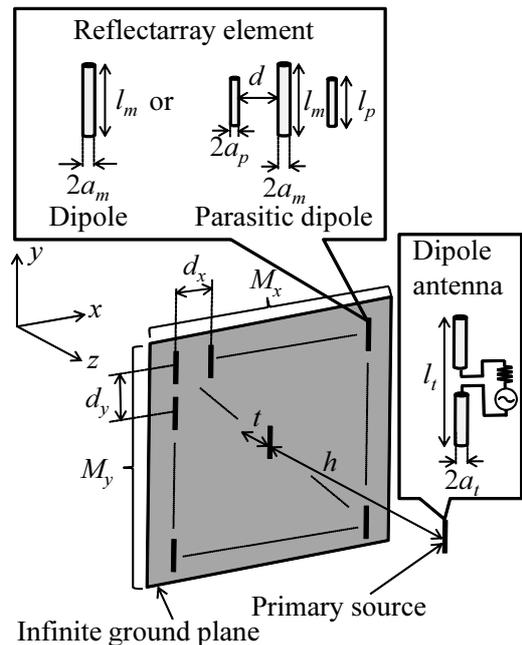


図2 リフレクトアレーの構造。

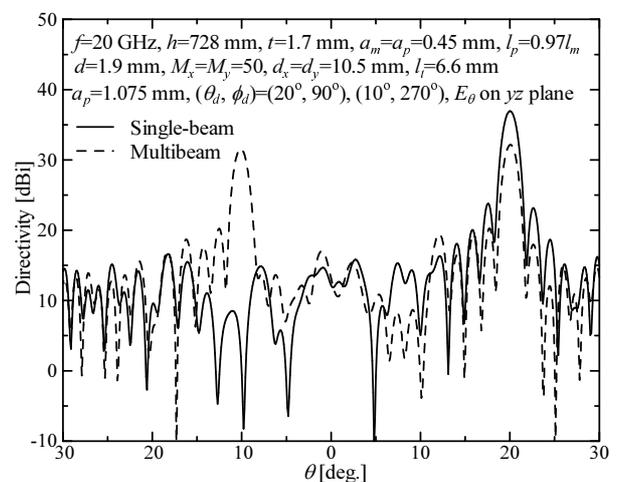


図3 リフレクトアレーの指向性。

表1 計算時間と計算機メモリ。

	CPU time [sec.]	Computer memory [GB]
Design of multi-beam reflectarray	17216	33.6