

[共同研究成果]

大規模マルチビームリフレクタレーの設計法とベクトル型スーパーコンピュータによる高速化の研究

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

高利得・広帯域なアンテナの1つとして、パラボラアンテナがこれまで用いられてきたが、大型でかさばるという欠点があった。そこで近年、パラボラアンテナに代わる新たなアンテナとして、平面型リフレクタレーが大きな注目を集めている [1]。平面型リフレクタレーは、電磁波を送受信する一次放射器と、多数の素子から構成される反射面から成る [2]。平面型リフレクタレーの反射面上の素子は、一次放射器から入射した電界の位相を回転させ、所望の方向で平面波を形成するように設計される。入射電界の位相は素子の位置によって変わることから、反射面上にあるリフレクタレー素子は1つ1つ異なる大きさにしなければならない。従って、反射面状の素子サイズを決定する前に、リフレクタレーの素子の大きさに対する反射電界の位相変化量、すなわち反射係数の位相の情報が必要となる。これまで筆者らは、反射係数の位相を求める手法として起電力法を用いた手法を提案し、その有効性を明らかにしてきた [3]-[7]。筆者らの提案手法は、スペクトル領域モーメント法 [8]-[10] や有限要素法 [11]-[14] と比べ、一次放射器を厳密に考慮できるという点で優れている。

一方、衛星通信やレーダー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に関する研究が盛んに行われている。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 [15] 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提案されていない。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非常に長い計算時間がかかるため、設計法の高速化が欠かせない。

本報告では、文献 [3]-[7] に示されたシングルビームリフレクタレーの設計法をベースにした、マルチビームリフレクタレーの設計法を提案する。また、提案法をベクトル型スーパーコンピュータを用いて高速化するためのチューニング法を明らかにする。最後に、大規模マルチビームリフレクタレーの設計を行い、その有効性を数値的に明らかにする。

2 起電力法を用いたリフレクタレー設計法

2.1 線状素子シングルビームリフレクタレーの設計法

文献 [3]-[7] の設計法によって、線状素子のシングルビーム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.

2.2 線状素子マルチビームリフレクタレーの設計法

線状素子マルチビームリフレクタレーの設計法を図1に示す. 提案設計法は, 起電力法によって設計したシングルビームリフレクタレーを初期構造とし, 素子長を変えながらマルチビームリフレクタレーを設計していくアルゴリズムになっている. 提案設計法では, まず初期構造を設計した後に2つ目のメインビーム方向を決める. 次に, ある素子の素子長をわずかに増減させ, そのときの2つのビーム方向の利得を計算する. このとき, 素子間相互結合の影響を厳密に考慮するため, リフレクタレーの電流は前処理付き共役勾配法で求める. そして, 素子長を変える前後での2つ目のビーム方向の利得をそれぞれ比較する. 素子長を増やしたときに利得が大きくなった場合は, 利得が増え続けるか素子長が 0.5λ に達するまで素子長を増やして同様の計算を行う. 一方, 素子長を減らしたときに利得が大きくなった場合は, 利得が増え続けるか素子長が 0.1λ に達するまで素子長を減らして同様の計算を行う. これを全ての素子について繰り返し, 2つのビームの利得が同じ値になったら終了する.

リフレクタレーの数値シミュレーションが悪条件問題であることを考慮し, 1列分の素子長が更新し終わった段階で前処理行列を求め直すこととする. これにより, リフレクタレーの素子長が変わっても良好な収束性を維持することができる.

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 [16]. 加えて, プログラムのループ中の

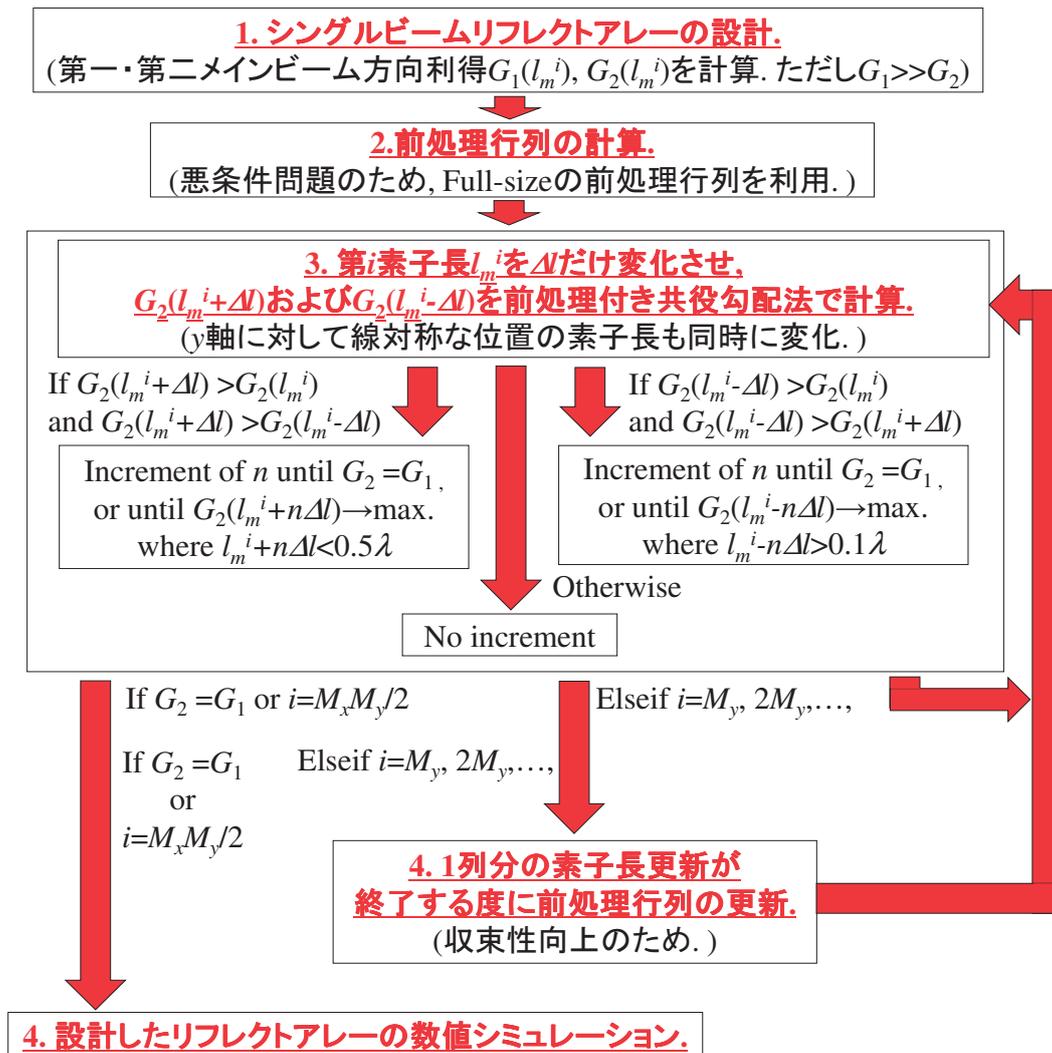


図 1: マルチビームリフレクタレーの設計法.

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 2 に示す.

マルチビームリフレクタレーの設計法では, 素子長を変えた時の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

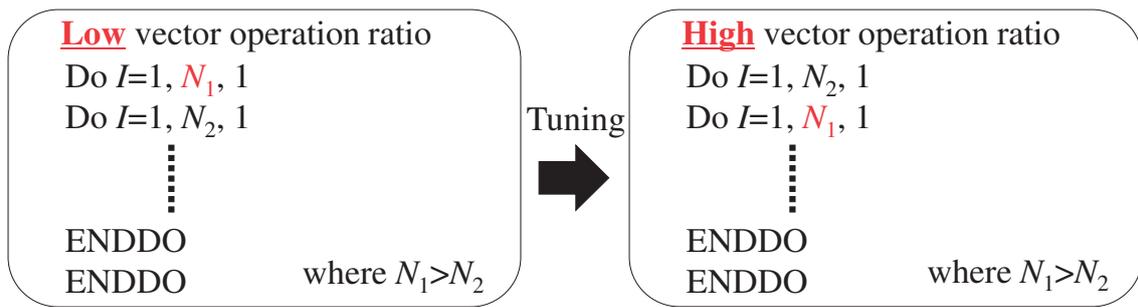


図 2: ベクトル演算による高速化のためのチューニングの概念.

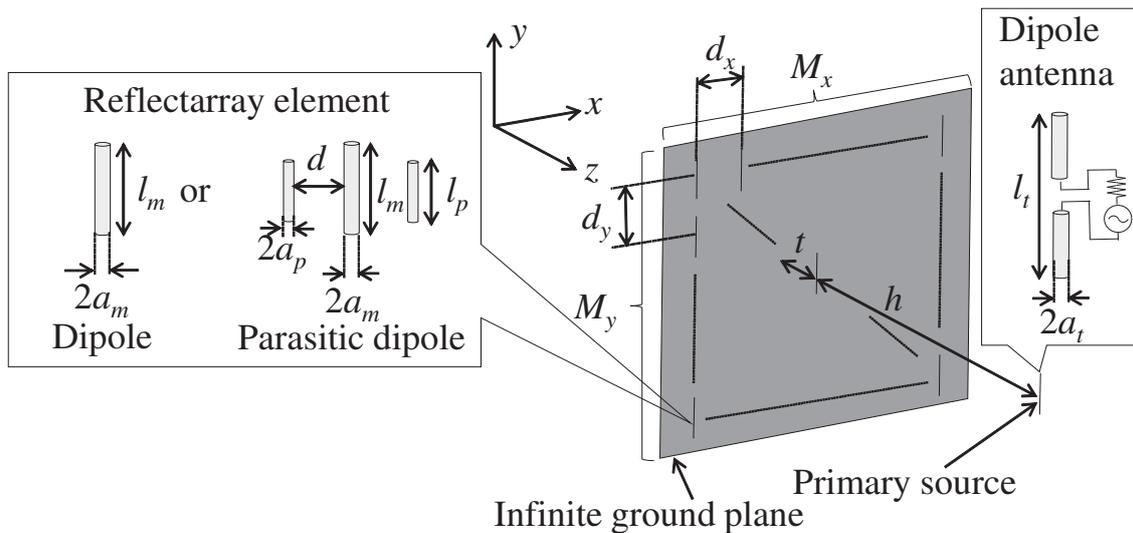


図 3: 線状素子リフレクタレーの構造.

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、大規模なシングルビームおよびマルチビームリフレクタレーを設計した。リフレクタレーの構造を図 3 に示す。リフレクタレーは、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 面でビーム走査を行うリフレクタレーを設計したため、リフレクタレーは 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 素子シングルビームリフレクタレーの指向性を図 4 に、開口面の位相分布

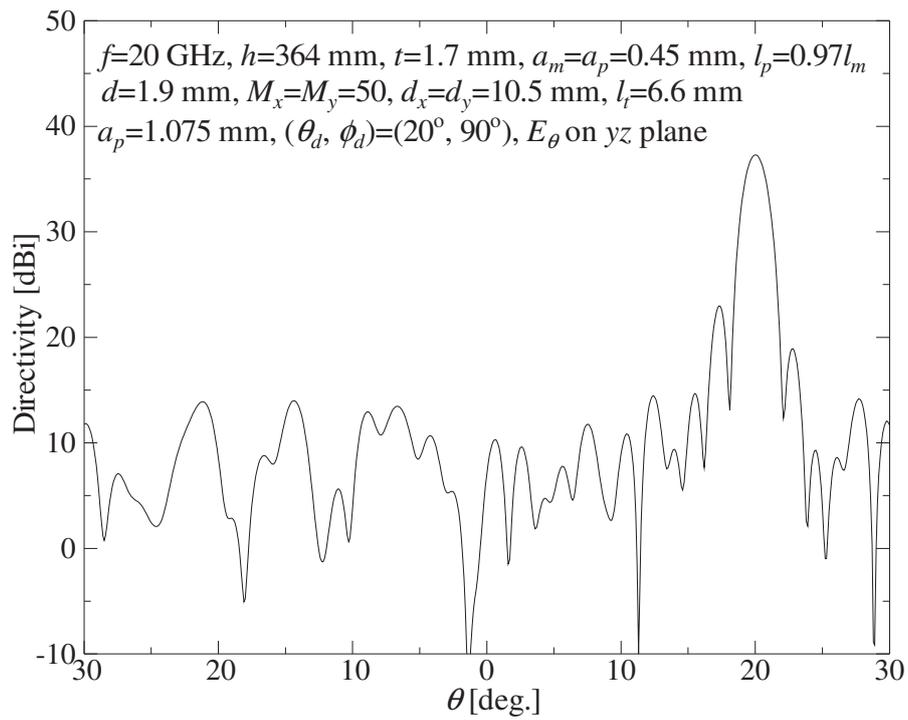


図 4: シングルビームリフレクタレーの指向性.

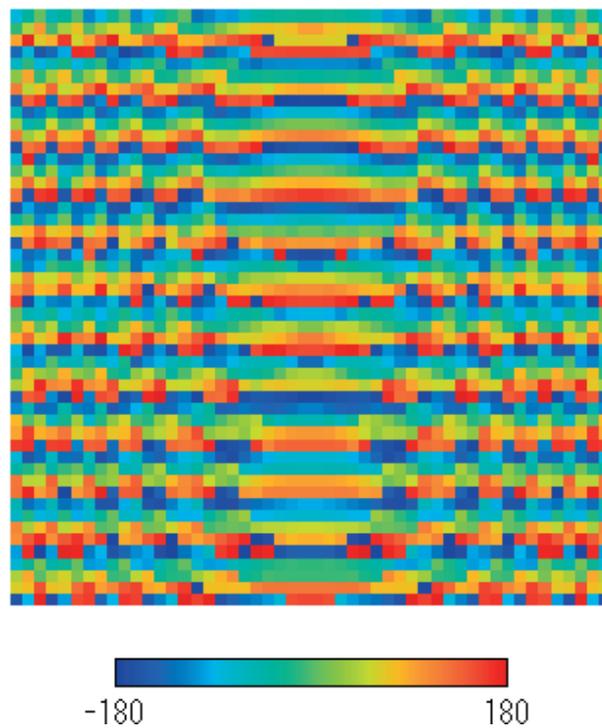


図 5: シングルビームリフレクタレーの開口面位相分布.

を図 5 にそれぞれ示す. 素子ごとに長さを異なる値にすることで, 図 5 に示すような不均質な開口面位相分布を実現し, その結果所望の $(20^\circ, 90^\circ)$ 方向に強いビームが出ていることが分かる. 実効開口効率 η_{eff} は 36.2% であり, 設計と数値シミュレーションに要した時間は 375 秒であった. なお,

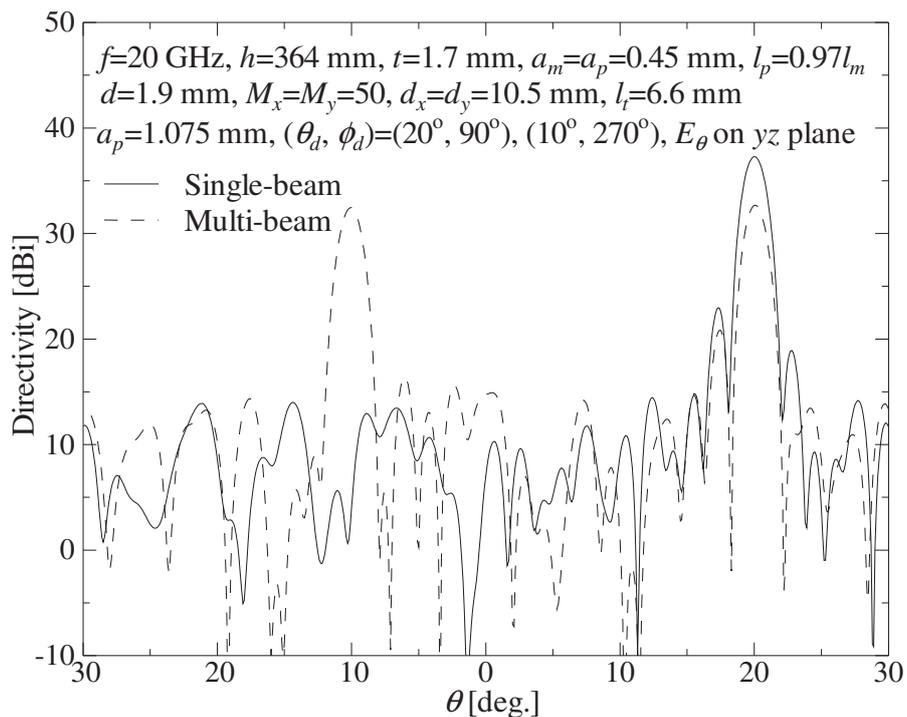


図 6: マルチビームリフレクタレーの指向性.

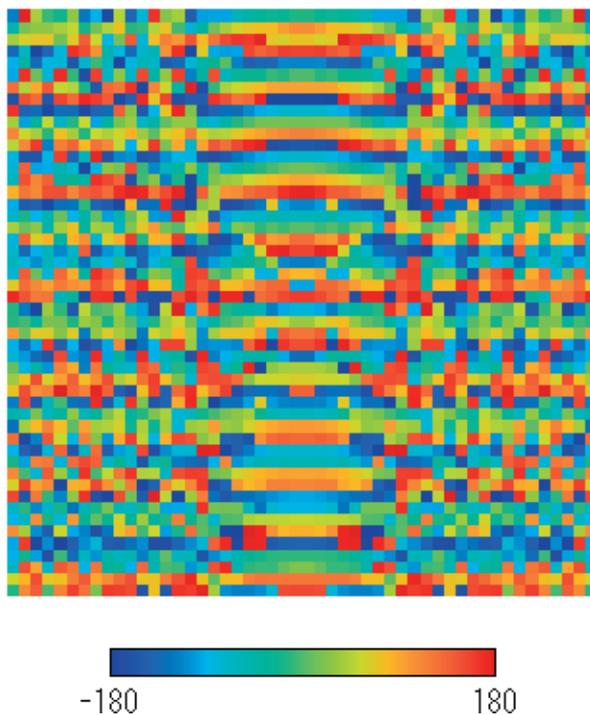


図 7: マルチビームリフレクタレーの開口面位相分布.

同様のリフレクタレーを Core i7 搭載の PC で設計し、その数値シミュレーションをするのに要した時間は 60,720 秒であり、CPU 比 162 倍の高速化を実現した。

次に、設計した 50×50 素子マルチビームリフレクタレーの指向性を図 6 に、開口面の位相

分布を図7にそれぞれ示す。図6から、所望の方向 ($20^\circ, 90^\circ$) および ($10^\circ, 270^\circ$) に2つのビームがそれぞれ形成されていることが分かる。シングルビームリフレクトアレーとは各素子の長さが異なり、結果的に開口面の位相分布が変わっていることが図7から分かる。なお、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12.5%に下がり、指向性利得はその結果4.8 dB低下している。設計に要した時間は20,097秒であり、設計中にリフレクトアレー構造全体の数値シミュレーションを5,092回行ったことから、1回あたりの数値シミュレーション時間は約4秒である。リフレクトアレー構造全体を解析するとき、未知数 $N = 10,610$ の行列方程式を解く必要があるが、PCでこの規模の行列方程式を解くと最低でも数時間がかかる。したがって、スーパーコンピュータによる高速化が、マルチビームリフレクトアレーの設計には不可欠である。

5 むすび

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、ベクトル型スーパーコンピュータによる高速化チューニングを行った。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、提案法の有効性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.
- [3] 今野 佳祐, 陳 強, 澤谷 邦男, 亀田 卓, 末松 憲治, “起電力法によるリフレクトアレー設計法の一検討,” 信学技報, vol. 112, no. 491, AP2012-164, pp. 1-5, 2013年3月.
- [4] 今野 佳祐, 陳 強, 澤谷 邦男, 亀田 卓, 末松 憲治, “起電力法を用いた線状素子リフレクトアレーの設計,” 信学総大, B-1-138, p. 138, 2013年3月.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 今野 佳祐, 陳 強, “アレー給電による大規模な低姿勢リフレクトアレーの高利得化,” 信学技報, vol. 114, no. 294, AP2014-138, pp. 55-59, 2014年11月.
- [8] D.M. Pozar and T.A. Metzler, “Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size,” *Electr. Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 657-658, April 1993.
- [9] 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.
- [10] M. Zhou, E. Jørgensen, O.S. Kim, S.B. Sørensen, P. Meincke, and O. Breinbjerg, “Accurate and efficient analysis of printed reflectarrays with arbitrary elements using higher-order hierarchical Legendre basis functions,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 814-817, 2012.
- [11] R. Remski, “Analysis of PBG surfaces using Ansoft HFSS,” *Microw. J.*, vol. 43, no. 9, pp. 190-198, Sept. 2000.
- [12] I. Bardi, R. Remski, D. Perry, Z. Cendes, “Plane wave scattering from frequency-selective surfaces by the finite-element method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 641-644, March 2002.
- [13] 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.
- [14] Q.-Y. Li, Y.-C. Jiao, G. Zhao, “A novel microstrip rectangular-patch/ring-combination reflectarray element and its application,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1119-1122, 2009.
- [15] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, “Design of single-feed reflectarray antennas with asymmetric multiple beams using the particle swarm optimization method,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 9, pp. 4598-4605, Sept., 2013.
- [16] 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.