

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820137

研究課題名(和文)3次元超広帯域リフレクタレーの設計法と3Dプリンタを用いた製作法の確立

研究課題名(英文) Design of an ultra-wideband 3D reflectarray and its fabrication using 3D printing technology

研究代表者

今野 佳祐 (Konno, Keisuke)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：20633374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：まず、広帯域な散乱特性を実現するための素子として、対数周期ダイポール素子に着目し、その散乱特性が広帯域であることを数値的に明らかにした。次に、3Dプリンタを用いて素子の試作を行い、その広帯域な散乱特性を実証した。さらに、リフレクタレーの設計と試作を行い、数値シミュレーションと電波無響室内の実験を通して、対数周期ダイポール素子から成るリフレクタレーの広帯域な散乱特性を示した。

その一方で、リフレクタレーの設計法の高速化と高機能化に関する研究も行い、従来法に比べて数十倍～数百倍程度の高速化を実現すると共に、リフレクタレーの高利得化を実現した。

研究成果の概要(英文)：A wideband scattering performance of a log-periodic dipole array element was clarified numerically and experimentally. A reflectarray which was composed of the log-periodic dipole elements was designed and fabricated. Scattering performance of the fabricated reflectarray was demonstrated via measurements in our radio anechoic chamber.

On the other hand, an efficient design method of a reflectarray was proposed. CPU time of the proposed design method was kept much smaller than that of the conventional methods. Moreover, an optimization method of the reflectarray was also proposed. Numerical simulation was performed and gain enhancement of the reflectarray was observed.

研究分野：電磁波工学・アンテナ

キーワード：リフレクタレー 対数周期ダイポールアレー スーパーコンピュータ モーメント法

1. 研究開始当初の背景

近年の無線通信に対する大容量化・高速化の要求に応えるため、広い帯域を用いた通信システムの実現が求められている。本研究では、無線通信システムにおけるアンテナ部分の広帯域化を行い、大容量で高速な通信を実現する目的で、超広帯域なリフレクトアレーに関する研究を行った。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3点を目的としている。  
 1点目は、3次元構造を持つ素子から成るリフレクトアレーが広帯域な散乱特性を持つことを明らかにすることである。2点目は、リフレクトアレー設計法の高速度化である。3点目は高機能なリフレクトアレー設計法の実現である。

3. 研究の方法

まず、広帯域な散乱特性を示すような素子として、広帯域な放射特性を持つことが分かっている対数周期ダイポール素子に着目し、その散乱特性を明らかにした。電磁界数値シミュレーション法の1つであるモーメント法を用いて、対数周期ダイポール素子の数値シミュレーションを行い、素子構造と散乱特性の関係を明らかにした。次に、3Dプリンタと導電性塗料を用いて、対数周期ダイポール素子を試作、電波無響室内で実験を行い、その散乱特性を測定した。最後に、素子を10個並べたリフレクトアレーを試作し、その散乱特性を測定することで、対数周期ダイポール素子から成るリフレクトアレーの広帯域性を明らかにした。

また、リフレクトアレー設計法を高速化するために、ベクトル型スーパーコンピュータを用いたハードウェア的なアプローチと、多層媒質のグリーン関数を用いたモーメント法の構築というアルゴリズム的なアプローチの2つを行った。前者のアプローチでは、ベクトル型スーパーコンピュータ向けに電磁界数値解析プログラムを最適化し、ベクトル演算効率を99%以上にまで向上させることで高速化を図った。後者のアプローチでは、リフレクトアレー設計の際に計算時間のボトルネックになりやすい誘電体の部分をグリーン関数に取り込むことで、数値計算時の未知数を大幅に減らし、高速化を図った。

そして、高機能なリフレクトアレーの設計法の一例として、高利得化のアルゴリズムを構築した。素子の大きさを逐次的に変化させ、利得が大きくなったかどうかを電磁界数値シミュレーションで確かめた。電磁界数値シミュレーションの回数が膨大になるので、高速化のために前処理付き共役勾配法とベクトル型スーパーコンピュータを併用した。

4. 研究成果

図1に試作したリフレクトアレーの写真、図2にその散乱パターンをそれぞれ示す。リ

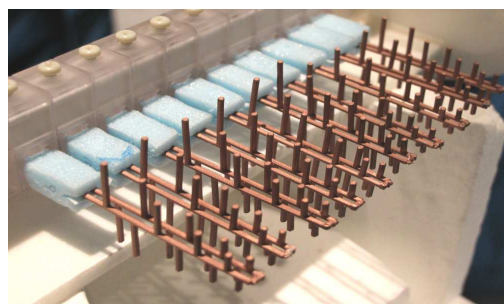


図1：試作リフレクトアレー

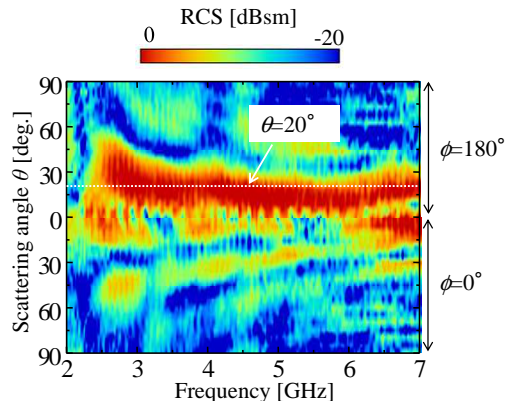


図2：試作リフレクトアレーの散乱パターン

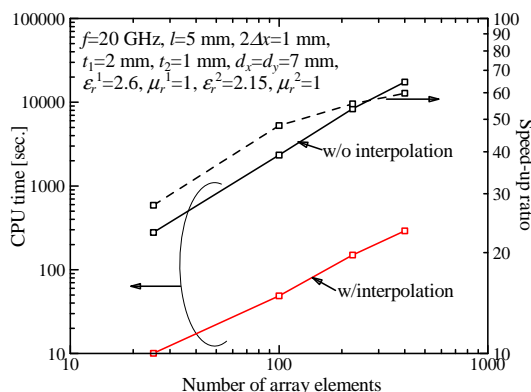


図3：リフレクトアレーの高速設計法

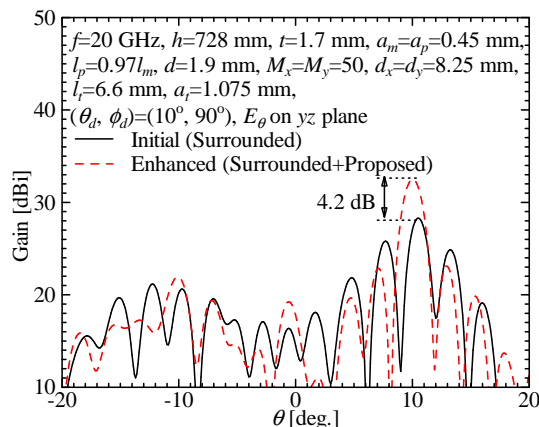


図4：リフレクトアレーの高利得化の数値例

フレクトアレーの素子数は10素子であり、主ビームの方向が仰角20°方向になるように設計した。なお、広帯域な特性を示すように、素子の寸法は数値シミュレーションで予め調整してある。図2から明らかなように、3~7 GHz程度の周波数帯において、主ビーム

が設計方向と一致していることが分かる。したがって、対数周期ダイポール素子を用いて広帯域なリフレクトアレーが実現できることが分かった。

多層媒質のグリーン関数を用いたモーメント法によって、400 素子のマイクロストリップアレーの数値シミュレーションを行ったときの計算時間を図3に示す。なお、数値計算を短縮するために、Taylor 展開を用いた数値補間法を提案し、行列方程式の構築を高速化している。図3から分かるように、提案補間法を用いると、数値計算時間がおおよそ十分の1程度まで低減できることが分かる。このモーメント法では、誘電体部分の電流を未知数として取り扱う必要がないので、行列方程式が非常に小さくでき、400 素子のアレーでも未知数は数千程度である。その一方で、自由空間のグリーン関数を用いたモーメント法だと、誘電体部分の電流を未知数として扱う必要があるため、未知数が数十万程度になってしまう。このような問題は、必要な計算機資源が膨大になり、パソコンで解くことができない。したがって、多層媒質のグリーン関数を用いたモーメント法は、未知数を非常に小さくできる上、提案法によって更なる高速化が実現できるため、マイクロストリップリフレクトアレーの設計に有効であると言える。

リフレクトアレーの高利得化の数値例を図4に示す。従来法で設計したリフレクトアレーに比べ、提案した手法で設計したリフレクトアレーの利得は4 dB程度向上している。いくつかの設計例から、提案法は特に素子間隔が狭く、素子間相互結合の強いリフレクトアレーの高利得化に有効であることが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

[1]H. Ito, K. Konno, H. Sato, and Q. Chen, ``Wideband Scattering Performance of Reflectarray Using Log-periodic Dipole Array,’’ IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 1305-1308, 2017(査読有).

[2]K. Konno, Q. Chen and R. J. Burkholder, ``Fast Computation of Layered Media Green's Function via Recursive Taylor Expansion,’’ IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 16, no., pp. 1048-1051, 2017(査読有).

[3]K. Yokokawa, K. Konno and Q. Chen, ``Scattering performance of log-periodic dipole array,’’ IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 740-743, 2017(査読有).

[4]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(査読有).

[5]K. Konno, K. Takeda, and Q. Chen, ``Beam scanning capability and suppression of endfire radiation of dipole array antennas coupled to two-wire transmission line,’’ IEICE Commun. Express, vol. 4, no. 12, pp. 358-362, 2015(査読有).

[6]K. Itoh, K. Konno, Q. Chen, and S. Inoue, ``Design of compact multiband antenna for triple-band cellular base stations,’’ IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 14, pp. 64-67, 2015(査読有).

[7]K. Konno and Q. Chen, ``The numerical analysis of an antenna near a dielectric object using the higher-order characteristic basis function method combined with a volume integral equation,’’ IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no. 10, pp. 2066-2073, Oct. 2014. (査読有)

[学会発表] (計16件)

[1]K. Konno, Q. Chen, and R. J. Burkholder, ``Efficiency Improvement with a Recursive Taylor Expansion of Bessel Functions for Layered Media Green's Function,’’ Proc. IEEE AP-S Int. Symp., pp. -, July, 2017(Accepted).

[2]関口 貴志, 今野 佳祐, 陳 強, ``平行二本線路と結合したダイポールアレーアンテナの指向性の設計,’’ 信学技報, vol. 116, no. 345, AP2016-123, pp. 1-6, 2016年12月8日, 機械振興会館(東京都).

[3]今野 佳祐, 陳 強, ``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トアレーの高利得化,’’ 信学ソ体, BS-1-8, pp. 15-16, 2016年9月21日, 北海道大学(札幌市).

[4]K. Konno, Q. Chen, and R. J. Burkholder, ``Numerical Analysis of Finite Periodic Array Antenna Using Novel Characteristic Basis Function Method,’’ Proc. IEEE AP-S Int. Symp., pp. 49-50, June 27, 2016, The El Conquistador resort, U.S.A. (Puerto Rico).

[5]関口 貴志, 今野 佳祐, 陳 強, ``損失性

インダクタを装荷した平行二本線路と結合したダイポールアレーアンテナの特性,'信学総体, B-1-57, p. 57, 2016年3月15日, 九州大学(福岡市).

[6]K. Konno, R. J. Burkholder, and Q. Chen, "Fast numerical analysis of finite periodic dipole array antenna embedded in thin-stratified medium using novel characteristic basis function method," IEICE General Conf., BCS-1-8, pp.1-2, March 17, 2016, Kyushu University (Fukuoka).

[7]伊東 大貴, 今野 佳祐, 陳 強, "対数周期ダイポールアレーを用いた広帯域リフレクトアレー," 信学技報, vol. 115, no. 450, AP2015-194, pp. 21-25, 2016年2月19日, スパリゾートハワイアンズ(いわき市).

[8]伊東 大貴, 今野 佳祐, 陳 強, "対数周期ダイポール素子を用いた広帯域リフレクトアレーの研究," 信学ソ体, B-1-100, p. 100, 2015年9月11日, 東北大学(仙台市).

[9]関口 貴志, 武田 健太, 今野 佳祐, 陳 強, "平行二本線路と結合したダイポールアレーアンテナによるビーム走査の研究," 信学ソ体, B-1-29, p. 29, 2015年9月8日, 東北大学(仙台市).

[10]伊東 大貴, 横川 佳, 今野 佳祐, 陳 強, "トップロード型モノポール素子を用いたリフレクトアレーによる散乱波の広角化," 信学総体, B-1-97, p. 97, 2015年3月12日, 立命館大学(草津市).

[11]今野 佳祐, 陳 強, "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トアレーの高速設計," 信学総体, CS-1-12, pp. 1-2, 2015年3月11日, 立命館大学(草津市).

[12]今野 佳祐, 陳 強, "大規模な低姿勢リフレクトアレー設計法の高速化に関する一検討," 信学技報, vol. 114, no. 433, EST2014-96, pp. 87-91, 2015年1月29日, 大阪大学(豊中市).

[13]K. Konno and Q. Chen, "Numerical Analysis of Planar Dipole Antennas in the Vicinity of Dielectric Object Using HO-CBFM," Proc. IEICE Int. Symp. Antennas. Propag., TH2B-01, pp. 245-246, Dec. 4 2014, Grand Hi-Lai Hotel, Kaohsiung (Taiwan).

[14]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12日,

山形大学(米沢市).

[15]横川 佳, 今野 佳祐, 陳 強, "対数周期ダイポールアレーの散乱特性に関する研究," 信学技報, vol. 114, no. 294, AP2014-137, pp. 51-54, 2014年11月12日, 山形大学(米沢市).

[16]今野 佳祐, 陳 強, "CBFMを用いた大規模アレーアンテナの数値解析の高速化," 信学ソ大, BS-1-1, pp. 1-2, 2014年9月23日, 徳島大学(徳島市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今野 佳祐 (KONNO KEISUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20633374