

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06093

研究課題名(和文) 高機能誘電体レドームを搭載したミリ波レーダ用アンテナの開発と設計法に関する研究

研究課題名(英文) Study on development and design method of millimeter wave radar antenna with high performance dielectric radome

研究代表者

伊藤 桂一(Keiichi, Itoh)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：20290702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は任意形状の誘電体レドームを開発し、その形状を最適化ならびに試作する方法を確立することである。従来には見られない画期的な形状を探索するために、誘電体レドームの設計には対象物の形状を直接変えることができるトポロジー最適化を用いた。試作が容易な滑らかな形状を得るために正規化ガウス関数ネットワーク(NGnet)を取り入れた3次元トポロジー最適化を行い、設計性能は極めて良好であることを示した。また、設計結果より3Dプリンタによる誘電体レンズの試作も可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a dielectric radome with an arbitrary shape, and to establish a method to optimize and fabricate its shape. In order to search for an unique shape as compared with the conventional shape, the topology optimization that can directly change the shape of the object is used for the design of the dielectric radome. To obtain a smooth shape, 3-dimensional topology optimization using the normalized Gaussian network (NGnet) is proposed. From some design example, the presence method has good performance. Moreover, it is shown that the optimized dielectric lens can be fabricated by the 3D printer.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：トポロジー最適化 誘電体レンズ 誘電体レドーム ミリ波 3Dプリンタ FDTD法

1. 研究開始当初の背景

ミリ波帯アンテナシステムの実用化が近年大幅に進んでいる。ミリ波は直進性が強く、広い帯域幅を有することから、ミリ波帯アンテナの用途は短距離、大容量通信に適しているとされ、60GHz帯、76GHz帯の自動車の衝突防止用レーダが代表的な実例として挙げられる。また、ミリ波は透過特性がよく、空間分解能も高いことから、可視光領域では観測できない物体、環境の識別や非破壊検査を可能にする。応用例としては地表レーダ、気象観測用レーダ、ミリ波イメージングなどがあり、吹雪、霧などの見通しが困難な気象条件下や火災、雪崩などの災害現場において威力を発揮することが期待される。災害探査レーダとして利用するには、土壌、植生、生体などに対する検出感度および精度に関する準備的な検討と、それに適した周波数の選択が重要となる。

また、波長が短いためにミリ波帯アンテナは小型化が容易であり、携帯性に優れることから携帯型レーダへの応用も期待される。レーダ用アンテナの性能としては高指向性と高利得が要求され、対象物からの微弱な反射波も検出できるような工夫が必要である。さらに、災害探査用途であれば現地の劣悪な環境下でも利用できるようにアンテナを保護するレドームも必要である。そして、小型かつ高利得なアンテナの実現にはアンテナの効率改善が必須となる。

高効率なアンテナを開発するために誘電体レンズに着目した。これまで提案してきた小型球形の誘電体レンズではミリ波帯ではレンズ直径が非常に小さくなるため、アンテナへの固定も困難となることと予想される。誘電体球と同程度の厚みをもった誘電体層をアンテナ開口面全体を覆うように装荷し、その表面の形状をレンズの場合と同等以上の効果が得られるように加工できれば、アンテナ開口面を堅牢に保護しながらアンテナの効率を改善することができる高性能レドームを開発することができると思われるに至った。

さらに、外来信号を遮断して特定の周波数だけを通すことができれば、微弱な反射波でも検出しやすくなり、物体検出精度の飛躍的な向上が期待できる。そこで、本レドームにFSS(周波数選択膜)を組み入れることで高機能化することを考えた。

以上述べたミリ波帯アンテナの開発にはアンテナ試作および測定環境が必須となるが、秋田高専では幸いにも電波暗室が設備されており、実習工場はミリ波帯アンテナに要求される微細で複雑な形状の加工も対応できる技術と設備を有している。故に、高額な試作品を外注することなく、本校全体がアンテナラボとして効率よく研究を遂行できる環境が整っていることも本研究を後押しした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、過酷な使用環境や劣悪な電波環境において、微弱な信号でも検出できる高指向性、高利得、高効率なミリ波帯アンテナを開発することである。これまでのレンズアンテナの研究を進展させ、アンテナの開口面効率を改善し、アンテナ開口面を保護することができる任意形状の高機能誘電体レドームを開発し、その形状を最適化する方法を確立することを目標とする。

本研究では研究期間内に以下の3つについて明らかにする。

(1) トポロジー最適化による任意形状誘電体レドームの形状設計法の確立

誘電体レドームの形状決定には対象物の形状を直接変えることができるトポロジー最適化を用いることで、従来には見られない画期的な形状を探索することができる。トポロジー最適化は設計の自由度が高いため、比較的短時間で収束可能な効率のよい探索法を検討し、実現可能性が高い形状が得られるような設計法を確立する。

(2) アンテナおよび誘電体レンズの試作環境の確立

ミリ波帯アンテナの試作方法を構築する。波長が数ミリ程度となる76GHz帯でも精度よく試作する方法を検討する。また、誘電体レドームの加工について、機械工作、3Dプリンタ、プラスチック成型技術などから低コストかつ最適な加工方法を検討する。特にトポロジー最適化によって得られた複雑な形状を持つ誘電体レンズの試作方法について検討する。

(3) ミリ波測定環境の構築と試作アンテナの評価

76GHz帯におけるミリ波測定環境を構築し、試作アンテナの評価を行う。電磁界解析を活用してミリ波コンポーネントの取り付け位置の設計を行う。また、誘電体レンズ装荷時には等位相面が変化することが予想される。位相面の変化を定量的に評価するための測定環境を構築する。

3. 研究の方法

本研究の目標は、アンテナ開口面を保護し、アンテナの効率を改善することができる任意形状の高機能誘電体レドームを開発し、その形状を最適化する方法を確立することである。レドームの設計方法、試作方法の確立とミリ波帯測定環境の構築に重点を置いて研究を進める。

(1) 誘電体レドームの形状最適化手法の確立

本研究では誘電体レドームの形状最適化を行うために2つの設計法について検討する。一つは従来型としてパラメータ最適化による設計であり、もう一つはトポロジー最適化による任意形状設計である。

パラメータ最適化は遺伝的アルゴリズム(GA)の一つである microGA と電磁界解析の一手法である FDTD (有限差分時間領域) 法を組み合わせ設計する。これに対して、トポロジー最適化は形状を構成する要素を物性値によって2値化し、各要素を直接変えるため、従来にない新規性の高い形状を設計することが期待できる。トポロジー最適化は実現不可能な形状となる場合も多いことが課題であり、本研究では不連続な材料要素分布を除去する手法を提案し、新規性と実現可能性が高いレドームの形状最適化手法の確立を目指す。

(2) 誘電体レドーム試作方法の検討と試作

レドームの試作にはマシニングセンタなどの3次元加工可能な工作機械による材料切削による方法、金型製作によるプラスチック圧縮成型技術による方法、3Dプリンタによる方法、などが考えられる。この中でも3Dプリンタは複雑な形状でも加工できる利点があり、有望であると考えている。従来型の機械工作と比較することにより、加工精度やレンズ的な性能について明らかにする。

(3) ミリ波帯測定環境の構築と予備実験

既設のマイクロ波帯コンパクトレンジ測定環境にミリ波コンポーネントを組み込み、ミリ波帯において放射パターン測定環境を構築する。試作アンテナの性能評価を行うだけでなく、位相面の分布が定量的に行えるよう測定環境の構築と予備実験を行う。

この他、FSS をアンテナに組み入れた場合の透過、反射特性について数値解析を用いた予備的な検討を行う。また、大規模アンテナにおけるパラメータ最適化の設計性能についても明らかにする。

4. 研究成果

以下に本研究で得られた主な成果をまとめる。

(1) トポロジー最適化による誘電体レンズの形状設計法の確立

本研究では FDTD 法を用い、FDTD セルを基本単位として On/Off 法によるトポロジー最適化を行った。故に、セルごとに誘電体と空気をそれぞれ on と off の状態で与えることによりレンズ形状を表現する。しかし、セルの組み合わせは膨大な数となり、最適化された形状はチェッカーボード状になる可能性が高く、結果として試作困難となる。そこで、滑らかな境界を持つレンズ形状を得るため

に、本研究では正規化ガウス関数ネットワーク (Normalized Gaussian Network: NGnet) をトポロジー最適化を導入した。NGnet は図1に示すように正規化されたガウス関数を基底関数として用いた関数近似器であり、それぞれのガウス基底の重み係数を変化させることにより一定のまとまりをもって on と off を設定することができる。

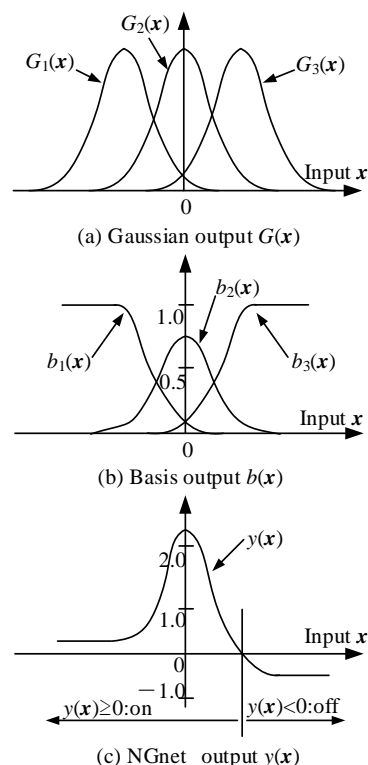


図1 NGnet の出力イメージ

NGnet において基底数や分散を適切に与えることが重要となる。すなわち、基底の数が少ないければ空間は滑らかに分割できるものの形状表現能力が乏しくなることが問題となり、逆に多ければ形状表現能力は向上するものの収束するまでに時間がかかることが懸念される。

本研究ではアンテナ用の小型誘電体レンズの形状設計を例に提案手法の設計性能を明らかにした。誘電体レンズを装荷してアンテナの指向性を狭角化することを設計例として取り上げ、NGnet を用いた3次元トポロジー最適化を行った。

図2に示す1スロットの導波管スロットアンテナのスロット開口面に20mm四方のレンズ設計領域を設けた。ガウス基底数を1辺が2から7個に変えてNGnetを用いたトポロジー最適化を行った結果、収束性と設計性能の両者を考慮すると基底数は3または4個の場合が良いことを明らかにした。トポロジー最適化による設計例として、放射パターンの主ビームを狭角化した場合の設計結果を図3に示す。対称性が得られるように設計領域を4分割し、1/4の領域だけを設計して残りの3/4の領域へコピーした結果、試作可能な滑らか

な境界を持つレンズ形状が得られることを示した。

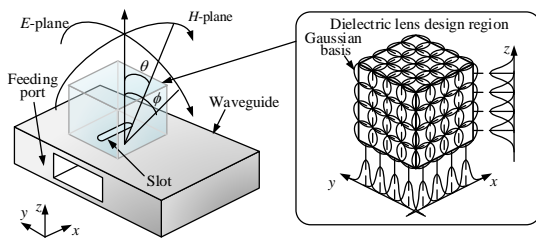


図2 設計条件とNGnetの基底配置

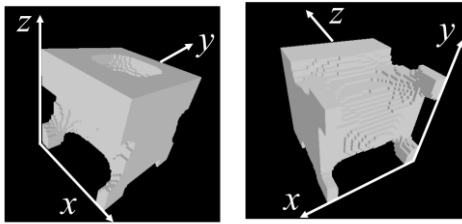


図3 設計条件とNGnetの基底配置

(2)誘電体レンズの3Dプリンタによる試作
本研究ではトポロジー最適化結果をCADデータへ変換し、3Dプリンタによる試作と評価を行った。3Dプリンタを用いれば中空構造など従来の加工方法では試作困難な形状でも試作することができることが期待される。

まず、前述した図2の設計条件においてトポロジー最適化により誘電体レンズを設計した。励振周波数12GHzにおいて、WRJ10規格の導波管に長さ12.5mmのスロットを1個空けてスロットアンテナを構成し、その開口面上に20×20×20mmのレンズ設計領域を設けた。1セル0.5mmであるため、40×40×40個のセルのonとoffをトポロジー最適設計する。設計領域内のセルが誘電体(on)であれば比誘電率を $\epsilon_r=2.6$ 、空気(off)であれば $\epsilon_r=1.0$ とした。誘電体の比誘電率は3Dプリンタのフィラメント材料であるPLA(ポリ乳酸)を想定している。

最適化結果はボクセルデータとして得られるため、STL形式へのデータ形式の変換が必要となる。本研究では各セルの媒質を定義するz方向のID配列idzを用いてSTL形式への変換を行った。変換の手順を図4に示す。誘電体を表すidz=1の辺が2つ並ぶ面、または4隅が直交する面にSTL形式の構成要素である三角形を形成する。ただし、面が連続する場合は三角形を形成しない。これを繰り返すことにより、図4における灰色部、すなわち、モデル内部の不要な三角形を除去した。図5はトポロジー最適化結果のボクセルデータのOpenGL表示とSTL形式に変換したデータの3D表示であり、正確に変換できていることを確認した。

STL形式のCADデータを使って熱溶解積層方式の3Dプリンタ(MUTO MF-500)によるレンズの試作を行い、図5のような中空構造でも

問題なく試作できることを確認した。また、放射パターンを測定した結果は計算結果とよく一致することも確認した。

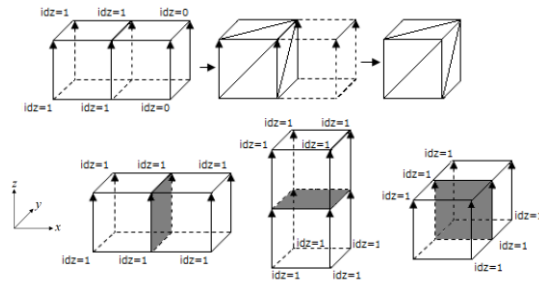
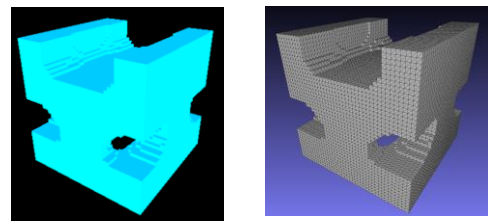


図4 STL形式への変換



(a)openGL表示 (b)STL形式のCAD表示
図5 STL形式のCAD表示

(3)ミリ波帯測定環境の構築と予備実験

秋田高専の電波暗室内に設置されているマイクロ波帯コンパクトレンジシステムをミリ波帯の研究開発に利用するために、マイクロ波/ミリ波兼用システムの構築を試みた。76GHzのミリ波帯において2次元境界要素解析を行い、提案システムにおいてミリ波帯において平面波が得られる条件を解析的に求めた。

既設のマイクロ波帯用システムは図6(a)のように主反射鏡、副反射鏡、一次放射器によって構成される。一次放射器をミリ波帯用に交換することは、交換時に一次放射器の位置がずれる可能性がある、構造上システムの奥側にあるため交換しにくい、などの理由により好ましくない。そこで、本研究では副反射鏡と主反射鏡の間にも焦点があることに着目し、図6(b)のように副反射鏡を外してミリ波帯用ホーンアンテナを設置する。ミリ波アンテナ切替ユニットの固定に既存の一次放射器を利用するため、比較的正確かつ容易にアンテナの着脱が可能となる。本研究では一次放射器の最適な取り付け位置の探索に境界要素法を利用した。

境界要素法の要素の長さは $\lambda/20=0.1973$ mmとして計算を行った。ミリ波帯の放射器となるホーンアンテナは位置および角度を変えて計算できるように設定した。パラボラアンテナから2,000mm先に被測定アンテナを設置して測定することを想定し、システム近傍の電界を計算した。

ホーンアンテナの位置を調整して繰り返し計算を行い、最終的に初期位置と最適な位置とのずれを求めることができた。最適化後の近傍界における電界の振幅分布と位相分

布を図7に示す。最適化後は平面波領域が大幅に拡大し、当初予定していた測定範囲を大幅に上回る可能性があることが分かった。

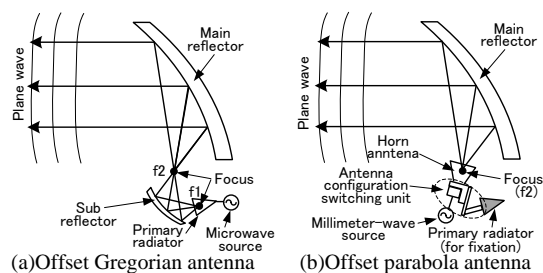
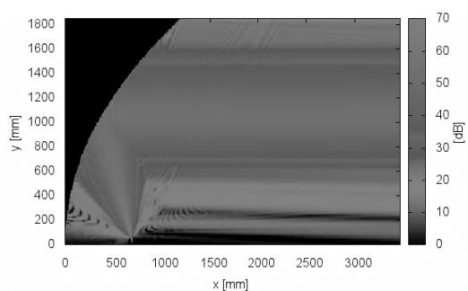
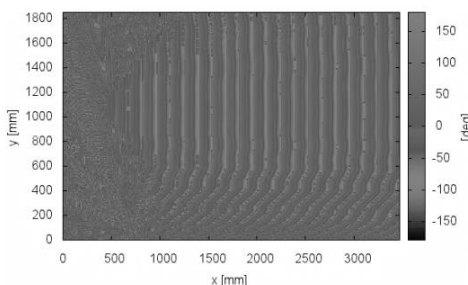


図6 STL形式のCAD表示



(a) 振幅分布



(b) 位相分布

図7 アンテナの近傍界分布

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Keiichi Itoh, Kento Watanabe, Katsumasa Miyata, and Hajime Igarashi, Performance improvement of planar array antenna by small spherical dielectric lens, 査読有, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 50, No. 1-2, pp. 623-630, 2016

[学会発表] (計19件)

- ① 伊藤桂一, 五十嵐一, 正規化ガウス関数ネットワークを用いた誘電体レンズアンテナのトポロジー最適化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 245, EST2017-63, pp. 123-127, 2017
- ② Keiichi Itoh and Hajime Igarashi, Design of small dielectric lens for slot antenna using topology optimization, 査読有, 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields

(Compumag2017), Daejeon, PB-M2-3, 2017

- ③ 伊藤桂一, 五十嵐一, アンテナ用小型誘電体レンズの3次元トポロジー最適化, 電気学会静止器/回転機合同研究会, SA-16-084, RM-16-130, pp. 161-164, 2016
- ④ Keiichi Itoh, Katsumasa Miyata, and Hajime Igarashi, Design and analysis of dielectric cover for planar waveguide slot array antenna, 査読有, The 34th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, OS5, 4296, pp. 216-217, 2015
- ⑤ Keiichi Itoh, Kento Watanabe, Katsumasa Miyata, and Hajime Igarashi, Performance Improvement of Planar Array Antenna by Small Spherical Dielectric Lenses, 査読有, 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015), Kobe, 2P2-B-2, 2015

[その他]

ホームページ等

<http://www.akita-nct.ac.jp/itok/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 桂一 (ITO, Keiichi)
秋田工業高等専門学校・電気・電子・情報系・准教授
研究者番号: 20290702

(2) 研究協力者

宮田 克正 (MIYATA, Katsumasa)
秋田工業高等専門学校・名誉教授

松田 英昭 (MATSUDA, Hideaki)
秋田工業高等専門学校・技術教育支援センター・技術専門職員

熊田 将也 (KUMATA, Masaya)
前秋田工業高等専門学校

信太 仰平 (SHIDA, Kouhei)
秋田工業高等専門学校

煤賀 司 (SUSUGA, Tsukasa)
秋田工業高等専門学校