

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820168

研究課題名(和文)メタマテリアルレドームを用いた成形ビームアンテナの高機能化

研究課題名(英文)High functionality of contoured beam antenna using metamaterial radome

研究代表者

道下 尚文(Michishita, Naobumi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・電気情報学群・准教授)

研究者番号：30535357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：アンテナを保護するレドーム材料をメタマテリアルレンズに置き換えることでビーム成形や高利得化を簡易な放射器で実現することを目的とし、ビーム成形に必要なレンズ形状をレイトレース法により求めた。負屈折率レンズを用いることでレドームの細径化が図れることがわかった。また、メタマテリアルレドームを実現するために、カットオフ導波路と積層セラミックコンデンサの組み合わせによる小形メタマテリアル構造を提案し、設計法ならびに損失特性を明らかにした。さらに3次元積層誘電体メタマテリアル構造の試作を行った。

研究成果の概要(英文)：To shape radiation patterns of mobile base station antennas, this study proposes replacement of the antenna radome by a metamaterial lens for simplicity of antenna configuration. The lens shape is designed by ray tracing method. The radome diameter can be reduced by using negative refractive index lens. To achieve the metamaterial radome, small metamaterial structure composed of multilayer ceramic capacitors in the cutoff waveguide is proposed. The design method and insertion loss characteristics are shown. Three-dimensional dielectric metamaterial structure is fabricated.

研究分野：工学

キーワード：メタマテリアル レドーム 移動通信基地局用アンテナ 成形ビーム

1. 研究開始当初の背景

レーダーや移動通信基地局用の成形ビームアンテナは、レドームで保護されている。従来、ビーム成形や高利得化は、移相器や放射器の数により達成されてきた。ITSレーダー用アンテナとして、従来の誘電体レンズと給電回路でビームパターンを成形した放射器との組み合わせにより、小形高利得アンテナが実現されている。しかし、従来の給電回路による放射器のビームパターン成形には限界があり、設計の自由度を上げる必要がある。

負の屈折率を有するメタマテリアル構造のアンテナ応用に関する研究は、主に、負の位相速度、周波数選択性、あるいは負屈折率の実証を目的とした検討が多い。一方、高周波でも低損失なメタマテリアル構造の実現のために、負の実効誘電率を示すカットオフ導波路と負の実効透磁率を示す誘電体共振器を用いた誘電体メタマテリアル構造が提案されている。この誘電体メタマテリアル構造による広角走査用レンズアンテナの小形化が示されている。しかし、レドームを構成することを考えると、誘電体共振器によるメタマテリアル構造の3次元化は、コスト、製造法の観点から困難である。

2. 研究の目的

本研究では、レドーム材料をメタマテリアルレンズに置き換えることで、アンテナ全体を簡素化することを目的とする。レドーム材料には安価で容易に入手できるチップ素子からなる積層誘電体メタマテリアルを用いる。チップ素子値と負屈折率の関係を明らかにし、高利得化および垂直・水平面ビームパターンの成形に必要な屈折率分布を求め、成形ビームアンテナの高機能化を目指す。

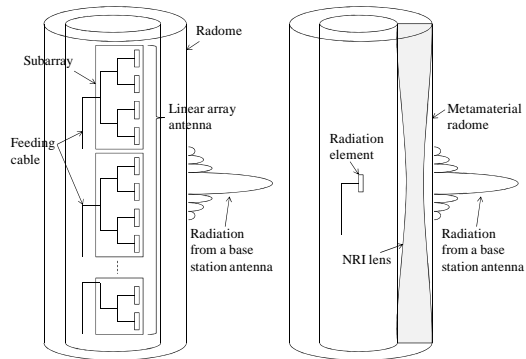
3. 研究の方法

ビーム形成に必要なレドーム厚、屈折率分布および放射器の数を電磁界解析により求め、具体的なメタマテリアル構造の設計指針をまとめる。次に、小形メタマテリアル構造として、安価で容易に入手可能な積層セラミックコンデンサとカットオフ周波数以下の平行平板の組み合わせを考える。まず、積層セラミックコンデンサの各構造パラメータと左手系帯域との関係を電磁界解析により求め、各屈折率用の構造の損失を理論的に見積もる。得られた低損失なメタマテリアル構造をスタック化した3次元積層誘電体メタマテリアル構造を設計し、実際にレドームを試作する。

4. 研究成果

(1) 図1に示すのは、従来および提案する基地局アンテナの構成である。従来の基地局アンテナでは、線形アレーアンテナがサブアレーに分割され、それぞれのサブアレーは複数の放射素子からなる。例えば、16素子アレー

では4つの放射素子からなるサブアレー4組で構成される。給電ケーブルはサブアレーごとに接続されるため、周波数共用化においてレドーム内にはケーブル用の広い空間が必要となる。



(a)従来型 (b)提案型
図1 基地局アンテナの構成

通常誘電体材料で製作されたレンズは一般的に凸形状である。このレンズ効果をレドームに付加する場合、レドームは厚くなり、基地局アンテナの直径は増大する。これは風圧荷重の点からも問題となる。一方、負屈折率レンズの焦点距離は短くできるため、メタマテリアルレンズからなるレドームは細径でビーム形成することができる。

そこで、基本的なレンズ整形のための設計パラメータを図2に示す。レンズはz軸に対し軸対称構造であり、給電放射パターンと開口分布を与えることで、レンズ形状をレイトレース法により求める。レンズ表面の修整には、レンズ内・外面における屈折の法則とエネルギー保存則を同時に満たすように設計する。

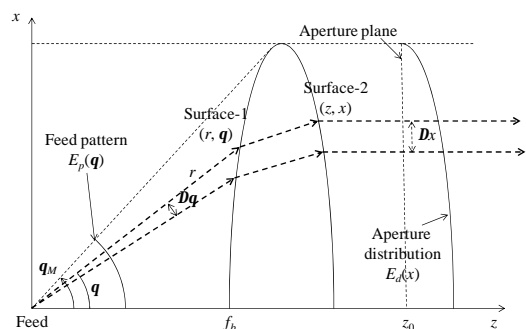


図2 アンテナ構成

メタマテリアルレンズの屈折率を-4とし、給電からレンズ端部の見込み角 θ_M を85度、開口分布のエッジレベルを1/15、レドームの全長を1500mmとしたときのレンズ形状を求めた結果を図3に示す。ここで、給電放射パターンのビーム方向は60度とした。この放射パターンは約1波長のダイポールアンテナで実現できる。図3から、負屈折率メタマテリアルレンズレドームの半径は300mmまで低減でき、細径でビーム成形が可能であることがわかった。また、放射器も1つに削減することができた。

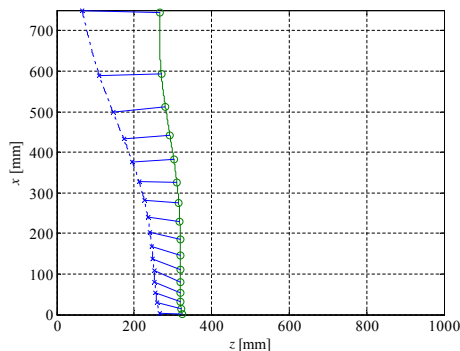
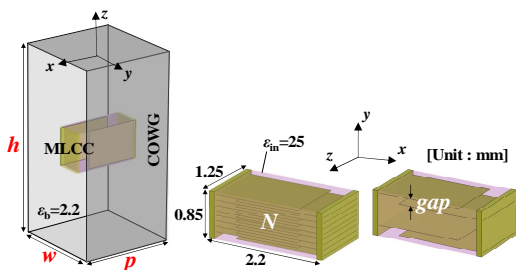


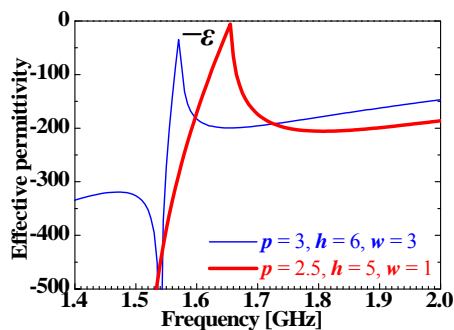
図3 メタマテリアルレンズ形状

(2) 図4(a)に示すように, 検討するメタマテリアルの単位セルは, h, w, p [mm]の三つの寸法で構成される方形のカットオフ導波管(COWG)とする. 単位セルの基本モデルとして, $h = 6$ mm, $w = 3$ mm, $p = 3$ mmとする. COWG内部の中心にあるMLCCの外形寸法は図4(b)に示す通り, 1.25 mm \times 2.2 mm \times 0.85 mmである. MLCCの内部には, 上下 N 枚ずつ(合計 $2N$ 枚)の内部電極が積層され, 近接する二枚の電極間の間隔は gap である. また, 電極間で比誘電率 $\epsilon_{in} = 25$ の誘電体が充填している.

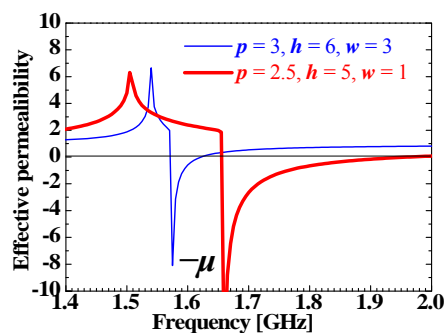


(a) 単位セル (b) MLCCの寸法と内部構造
図4 MLCCを用いた小形メタマテリアル構造

シミュレーション解析には CST MW-Studio の Time Domain Solver を用いる. 単位セルの x 方向上の両端に導波管モードの Port 1 と Port 2 を設け, 入射電界が y 方向, 入射磁界が z 方向となるように解析を行なう. 単位セルの両端に De-embed された S パラメータから, 実効比誘電率 ϵ , 比透磁率 μ を算出する. 図5(a)と(b)内にある青い実線は $N = 8$, $gap = 0.05$ mm のときの基本モデルの ϵ と μ の周波数特性を示す. 左手系メタマテリアルとしての動作帯域は $-\mu$ の帯域と同じで, 比帯域幅が 2.82% となる. この際, $-\mu$ の共振周波数である 1.575 GHz において, 単位セルサイズ ($p = 3$ mm) は約 $\lambda/64$ となる. 次に, 単位セルサイズを $h = 5$ mm, $w = 1$ mm, $p = 2.5$ mm とすると, 図5(b)に示す赤い実線のように, 最大 300 MHz (比帯域幅 16.6%) の帯域幅が得られる. この際, 共振周波数の 1.66 GHz において, $p = 2.5$ mm $\approx \lambda/72$ となり, 非常に小形の単位セルサイズで広帯域特性を有する左手系メタマテリアルの実現が可能であることが分かる.



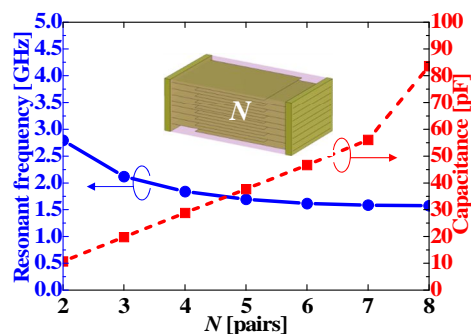
(a) 実効比誘電率



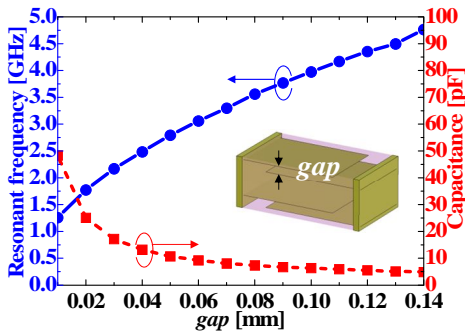
(b) 実効比透磁率

図5 実効比誘電率, 透磁率 ($N = 8$)

図6に, $h = 6$ mm, $w = 3$ mm, $p = 3$ mm の基本モデルにおいて, N と gap を変化させたときの MLCC の静電容量と動作帯域の共振周波数の結果をまとめて示す. 図6(a)は, $gap = 0.05$ mm を固定し, N を 2 から 8 まで変化させたときの結果である. 電極枚数が多いほど, MLCC の静電容量が増加し, 動作帯域の共振周波数が低周波化することが確認できる. 次に, 図6(b)では, $N = 2$ を固定し, gap を 0.01 から 0.14 mm まで変化させると, MLCC の静電容量が減衰し, 共振周波数が上昇する. このように, MLCC の内部電極の枚数と間隔により, MLCC の静電容量が決まり, 左手系メタマテリアルとしての動作周波数が決定される.



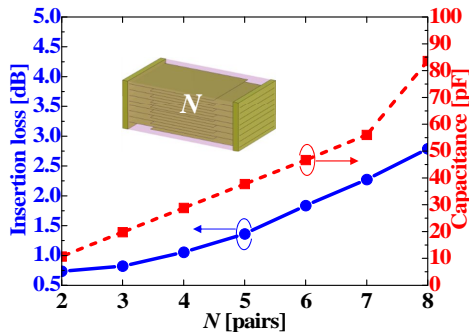
(a) N を変化



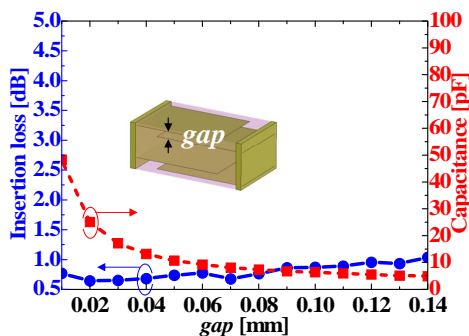
(b) gap を変化

図 6 MLCC の静電容量と共振周波数の関係

図 7 は、基本モデルにおいて、 N と gap を変化させたときの MLCC の静電容量と損失の結果をまとめて示す。図 7 (a) において、電極枚数を減らすと静電容量と損失ともに減衰していき、 $N=2$ のとき、損失は約 0.74 dB となる。これに対して、図 7 (b) では gap を変化させても損失は 1 dB 程度の変動幅に収まっている。即ち、単位セルの挿入損失は、MLCC の静電容量に依らず、単に電極枚数が多いほど金属部分による導体損失が大きくなるだけであり、電極枚数を変えなければ損失は殆ど変動しないことが分かる。



(a) N を変化



(b) gap を変化

図 7 MLCC の静電容量と挿入損失の関係

(3) 以上の検討結果から、メタマテリアルレドームを実現するために、低損失な 3 次元積層誘電体メタマテリアル構造を設計した。MLCC の実装密度と挿入損失の関係から、10 GHz 帯において低損失となる組み合わせを考

め、図 8 に示すように、誘電体基板上に 480 個の MLCC を実装した基板を 5 層スタックした 3 次元メタマテリアル構造を試作した。今後は、試作構造の反射、透過特性を測定する予定である。

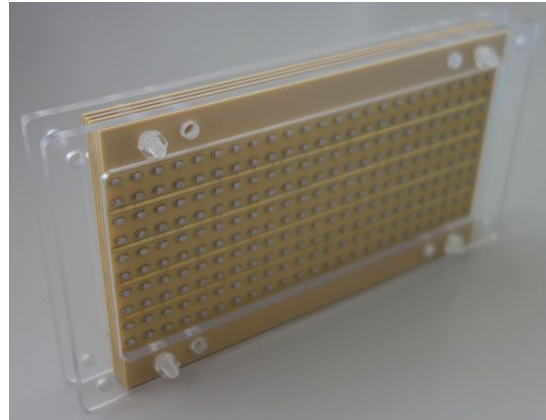


図 8 3次元メタマテリアル構造

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)

Naobumi Michishita and Yoshihide Yamada, Metamaterial Radome Composed of Negative Refractive Index Lens for Mobile Base Station Antennas, International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2014.10.15, Hanoi, Vietnam.

グェントゥワンハン, 道下尚文, 森下久, 積層セラミックコンデンサとカットオフ導波管の組合せを用いた左手系メタマテリアル構造の設計手法, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 24 日, 徳島県徳島市.

Tuan Hung Nguyen, Naobumi Michishita, and Hisashi Morishita, A fundamental study on miniaturization of small metamaterial structure using multilayer ceramic capacitor, Asian Workshop on Antennas and Propagation, 2014.5.16, Kanazawa, Japan.

グェントゥワンハン, 道下尚文, 森下久, 積層セラミックコンデンサを用いたメタマテリアル構造の小形化手法, 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月 19 日, 新潟県新潟市.

グェントゥワンハン, 道下尚文, 森下久, 積層セラミックコンデンサを用いた小形メタマテリアル構造, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013 年 9 月 19 日, 福岡県福岡市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

道下 尚文 (MICHISHITA, Naobumi)

防衛大学校・電気情報学群・

電気電子工学科・准教授

研究者番号: 3 0 5 3 5 3 5 7