

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04535

研究課題名(和文)高機能メタマテリアル電波吸収体の開発

研究課題名(英文)Development of Advanced Metamaterial Radio Wave Absorber

研究代表者

須賀 良介 (Suga, Ryosuke)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：20398572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、メタマテリアル電波吸収体の広帯域化と帯域幅の設計について検討した。中心周波数5GHz、-15dB帯域250MHzを有する電波吸収体の等価回路を設計し、所望の特性が得られたことから、本設計手法の有効性を示した。さらに2層積層した場合に実現可能な最大帯域幅の理論限界についても明らかとした。

さらに両偏波かつ全ての入射角度に対するSパラメータの推定方法について提案した。4つの入射角度におけるインピーダンスから両偏波、全入射角度におけるSパラメータを推定できることが分かった。本手法により推定した反射係数及び偏波変換係数は電磁界解析値と0.1以内の差で一致し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来より金属エレメントを周期的に配列した電波吸収体や反射板の研究例が多く報告されており、特に近年では、5Gシステムにおける通信エリア拡大に向けて、メタマテリアル吸収体や反射板に関する期待が高まっている。しかし、これらのデバイスの全ての入射角に対するバイスタティックレーダークロスセクションの測定もしくは数値解析には、一般的に非常に高価な測定もしくは解析装置が必要であったり、非常に多くの時間を要する。本研究において開発した推定手法は電波吸収体に限らず、上記の反射板にも適用可能であり、多くの周期構造平面デバイスの開発に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the bandwidth design of a metamaterial radio wave absorber was investigated. The absorber with the center frequency of 5 GHz and -15 dB fractional bandwidth of 250 MHz was designed and its feasibility was indicated. The theoretical limit of the maximum bandwidth for a two-layered absorber was also clarified.

A method for estimating the S-parameters for both polarizations and all incident angles was proposed. It was found that the impedances of four incident angles are need to estimate the S-parameters. The estimated reflection coefficients and polarization conversion coefficients agreed with those of the electromagnetic field analysis within 0.1 and the effectiveness of the proposed method was indicated.

研究分野：マイクロ波・ミリ波工学

キーワード：マイクロ波 電波吸収体 周期構造 偏波 入射角度 帯域幅

1. 研究開始当初の背景

裏面に金属板の付いた誘電体上に金属エレメントを周期的に配列した構造であるメタマテリアル電波吸収体はフレキシブルであり非常に薄く軽く、さら特別な材料を必要とせず非常に安価な製造プロセスにて製造可能といった特徴がある。これまでに、マイクロ波からテラヘルツ帯に亘る広い周波数帯域において、薄型化や複数の周波数で吸収特性を実現する吸収体について数々の報告がなされている。その一方で、従来報告されているメタマテリアル電波吸収体の設計は、比較的長い計算時間を必要とする電磁界解析により所望の吸収特性が得られるよう構造パラメータを変化させているためその設計性は低く、また所望の特性とそれを実現するための構造との関係は議論されていない。電波吸収体の等価回路を示している報告例もあるが、動作の定性的な説明に留まっており、所望の特性を実現するための具体的な設計には適用できない。また電波吸収体の動作原理や設計指針も示されていない状況である。すなわち現状の技術では、今後とも増加していく多種多様な無線システムに対する迅速な電波吸収体の開発は困難である。

2. 研究の目的

研究代表者は、既に吸収メカニズムを良く反映し、さらに電波吸収体の物理構造設計にも使用可能な等価回路を開発し、更にその回路を構成する回路素子値と物理構造との関係についても検討を進めている。これまでに設計・試作した 5GHz 帯用電波吸収体は手で簡単に曲げることができ、また概ね所望の特性を持つ電波吸収体を実現出来ている。この電波吸収体は厚さ 0.3mm(波長の 1/200)であり、その重さも 800g/m² と非常に軽量である。

本研究では、このメタマテリアル電波吸収体の適用可能範囲を拡大するために、その高機能化を目的とする。上記の等価回路を基に、電波吸収体の高機能化、具体的には所望の入射波の到来角度や偏波、さらには周波数帯域幅に対して吸収特性を実現するためのメタマテリアル電波吸収体の設計手法を確立する。

3. 研究の方法

・吸収特性の広帯域化

広帯域化を目的とした 2 枚の金属パッチを積層した構造について、その等価回路化とこれを用いた帯域幅の設計、また摂動素子による広帯域化とその偏波変換抑制について検討する。

・吸収動作の分析と新しい設計手法の開発

電波吸収体の新しい設計手法について検討するため、電波吸収動作を詳細に分析する。

4. 研究成果

吸収特性の広帯域化

図 1 に示す二層型円形パッチ配列電波吸収体について、平面波が垂直入射した場合を想定し、等価回路を用いた帯域幅設計について検討した。電磁界解析により、本電波吸収体は 2 つの並列共振器の直列接続により表すことができることがわかったため、図 2 に示す等価回路を用いて検討する。なお、同回路は自由空間の波動アドミタンスで正規化している。設計に必要な両共振器の無負荷 Q 値 Q_0 及び共振角周波数 ω_1 , ω_2 を算出するために、比共振角周波数差 $(\omega_2 - \omega_1)/\omega_0$ 及び比帯域幅の設計式を導出した。ここで ω_0 は中心角周波数である。

その結果、本電波吸収体が狭帯域であることを前提とし、任意の反射レベル $|S_{11}|^2$ を持つ最大の帯域幅を得るための比共振角周波数差は、

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{1 + 3|S_{11}|}{1 - |S_{11}|}} \frac{1}{Q_0} \quad \dots (1)$$

より求まることを示した。また

$$A = 2Q_0 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad \dots (2)$$

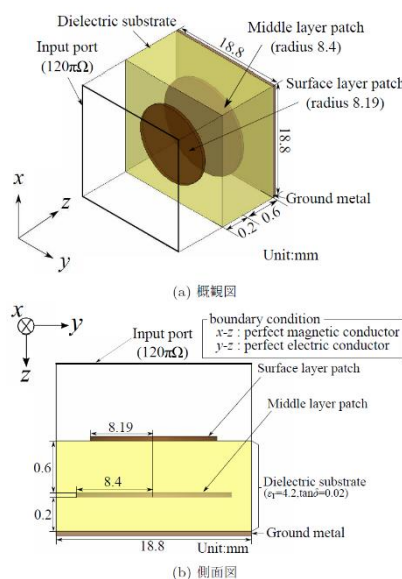


図 1 二層型パッチ配列電波吸収体

$$B = Q_0 \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \quad \dots (3)$$

とすると、電波吸収体の正規化入力インピーダンス Z_{in} は、

$$Z_{in} = \frac{2(1 + A^2 + B^2) - j2A(1 + A^2 - B^2)}{1 + 2(A^2 + B^2) + (A^2 - B^2)^2} \quad \dots (4)$$

により表され、この Z_{in} と反射係数 S_{11} は、
上式の分子を N 、分母を D として、

$$S_{11} = \frac{\frac{N}{D} - 1}{\frac{N}{D} + 1} = \frac{N - D}{N + D} \quad \dots (5)$$

と表すことができる。(1)式を $|S_{11}|^2$ について解き、
(3)式を用いて整理すると

$$|S_{11}|^2 = \frac{(B^2 - 1)^2}{(B^2 + 3)^2} \quad \dots (6)$$

が得られ、(5)式より

$$(N - D)^2(B^2 + 3)^2 - (N + D)^2(B^2 - 1)^2 = 0 \quad \dots (7)$$

が得られる。中心周波数における所望の反射係数を
決定すれば(1)式より B が求まり、求めた B を(7)式に
代入することで A が求まり、比帯域幅 A/Q_0 が導出で
きる。

本設計手法を用いて一例として、中心周波数 5 GHz、-15dB、帯域幅 250MHz を有する電波吸収体の等価回路を設計した。図3に示す結果より、所望の特性が得られたことがわかり、本設計手法の有効性を示した。

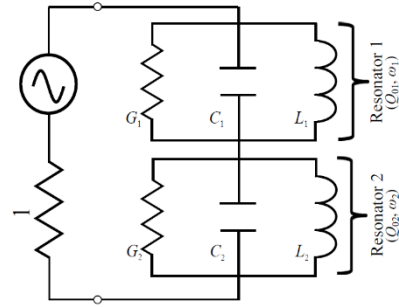


図2 1/120π S で正規化した二層型円形パッチ配列電波吸収体の等価回路

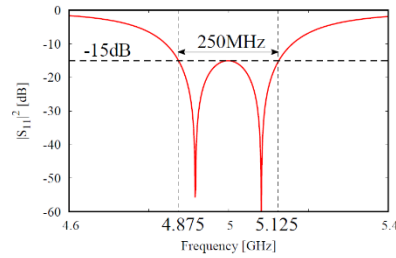
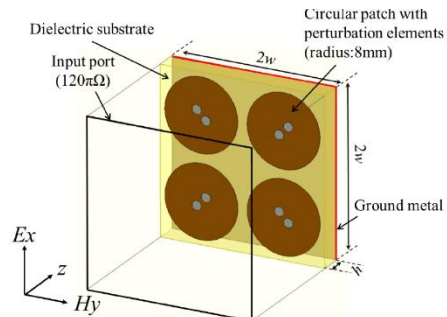


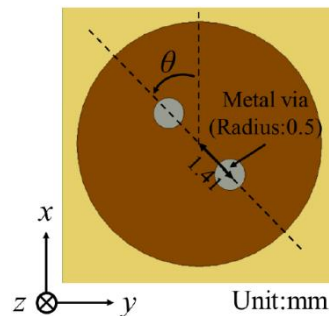
図3

次に摂動素子を使ったパッチ配列電波吸収体の広帯域化について検討した。摂動素子による縮退分離により直交する2つの共振周波数を実現できるため、広帯域な電波吸収体を実現できる。本構造における問題は、偏波変換率の低減と両共振周波数における共振抵抗の設計である。図4に摂動素子を用いた電波吸収体の(a)斜視図と(b)摂動素子の装荷位置を示す。半径 8mm の金属パッチを周期 $w=16.1\text{mm}$ で誘電体基板(比誘電率 4.2, 誘電正接 0.02, 基板厚 h) 上に配列している。また半径 0.5mm の金属ビアを想定した摂動素子を x 方向から角度 θ 傾けた位置に装荷している。なお、偏波変換を抑制するために隣接パッチからの再放射波が互いに逆相となるよう、隣接するパッチに付加する摂動素子の配置位置を 90 度ずつ回転させている。

図5に電磁界解析によって求めた、 θ に対する二つの共振周波数における共振抵抗 R_L および R_H を示す。 θ を大きくすると R_L は大きく、また R_H は小さくなること、さらに h を大きくすると両値ともに大きくなることがわかる。したがって、ビアの配置角度 θ と基板厚 h を適切に設計することで、二つの共振抵抗を所望の入力インピーダンス $120\pi\Omega$ に近づくことを示した。



(a) 斜視図



(b) 摂動素子の装荷位置

図4 摂動素子を用いた電波吸収体の構造

吸収動作の分析と新しい設計手法の開発

更なるメタマテリアル電波吸収体の高機能化や評価時間の短縮に向け、隣接パッチ間の結合を等価回路によりモデリングし、両偏波かつ全ての入射角度に対する S パラメータの推定方法を提案した。図6に示す様に電波吸収体に対して θ, ϕ の角度から平面波が入射する場合を想定する。図7にこの電波吸収体の隣接パッチ間結合を考慮した等価回路モデルを示す。各パッチを6ポートのブラックボックスとしてモデル化し、その中のポート1~4は隣接パッチ間、ポート

5および6は自由空間との入出力ポートである。本研究では、下記の3つの仮定に基づき、6ポートZ行列から電波吸収体のSパラメータを推定する。

- ・パッチは正方格子状に配列されている。
- ・パッチは回転対称形状である。
- ・空間高調波が全てエバネセントになるようにパッチの配列周期は決定されている。

入射角度 θ , ϕ が決まると、 x, y 方向に隣接するパッチ間に生じる位相差 δ_x, δ_y が一意に定まる。また周期構造であることを考慮し、対向するポート間へ次の境界条件を与える

$$\begin{aligned} I_2 &= -I_1 e^{-j\delta_x} \\ V_2 &= V_1 e^{-j\delta_x} \\ I_4 &= -I_3 e^{-j\delta_y} \\ V_4 &= V_3 e^{-j\delta_y} \end{aligned}$$

さらに、構造の二軸対称性と相反性を踏まえてZパラメータの各要素を整理すると、入出力ポートであるポート5および6について次の関係式が得られる。

$$\begin{bmatrix} V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

$$Z_{xx} = a - b \frac{(1 + \cos \delta_x)(c - \cos \delta_y)}{(c - \cos \delta_x)(c - \cos \delta_y) - d^2(1 - \cos \delta_x)(1 - \cos \delta_y)}$$

$$Z_{yy} = a - b \frac{(1 + \cos \delta_y)(c - \cos \delta_x)}{(c - \cos \delta_x)(c - \cos \delta_y) - d^2(1 - \cos \delta_x)(1 - \cos \delta_y)}$$

$$Z_{xy} = bd \frac{\sin \delta_x \sin \delta_y}{(c - \cos \delta_x)(c - \cos \delta_y) - d^2(1 - \cos \delta_x)(1 - \cos \delta_y)}$$

$$Z_{yx} = Z_{xy}$$

$$a = Z_{55}, b = Z_{15}^2/Z_{12}, c = Z_{11}/Z_{12}, d = Z_{13}/Z_{12}$$

これらは x, y 偏波に対するインピーダンス行列であるため、 ϕ 方向に座標回転しTMおよびTE波に対するインピーダンス行列 Z' に変換する。

$$\begin{aligned} Z' &= \begin{bmatrix} Z_{MM} & Z_{ME} \\ Z_{EM} & Z_{EE} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

求めたいSパラメータはこの Z' を用いて

$$S = \begin{bmatrix} S_{MM} & S_{ME} \\ S_{EM} & S_{EE} \end{bmatrix}$$

$$= \sqrt{Z_0^{-1}} [Z' - Z_0'] [Z' + Z_0']^{-1} \sqrt{Z_0}$$

と求めることができる。ここで、 Z_0' はTMおよびTE波の特性インピーダンス行列であり、

$$Z_0' = \begin{bmatrix} 120\pi \cos \theta & 0 \\ 0 & 120\pi / \cos \theta \end{bmatrix}$$

である。

本手法を用い、図6に示す電波吸収体のSパラメータを推定した結果を図8に示す。同図には電波吸収体の動作周波数における(a)TM波の係数 S_{MM} 、(b)TE波の反射係数 S_{EE} 、また(c)TE波を入射してTE波として反射することを想定した偏波変換係数 S_{ME} の入射角 ϕ 特性を示している。同図より各Sパラメータの推定値と電磁界解析値の差の最大値はそれぞれ0.03, 0.06, 0.005であった。この結果より、4つの入射角度における電波吸収体のイン

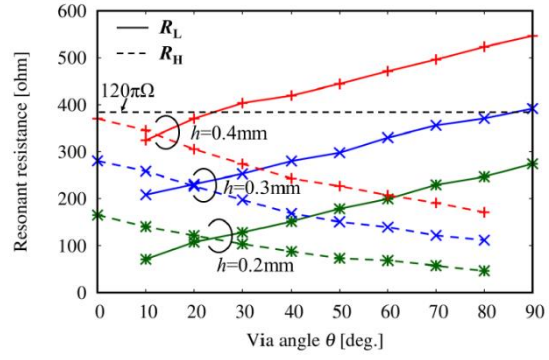


図5 ビア装荷角度 θ に対する共振抵抗の変化

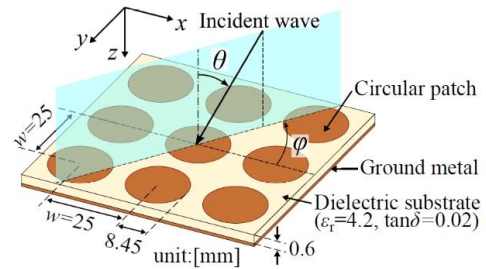


図6 電波吸収体の構造と入射角度

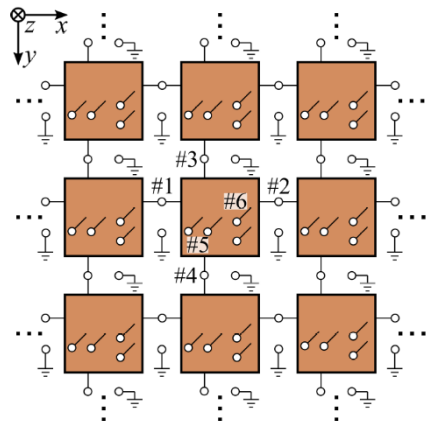


図7 等価回路モデル

ピーダンスからあらゆる入射角度における S パラメータを推定できることを示した。

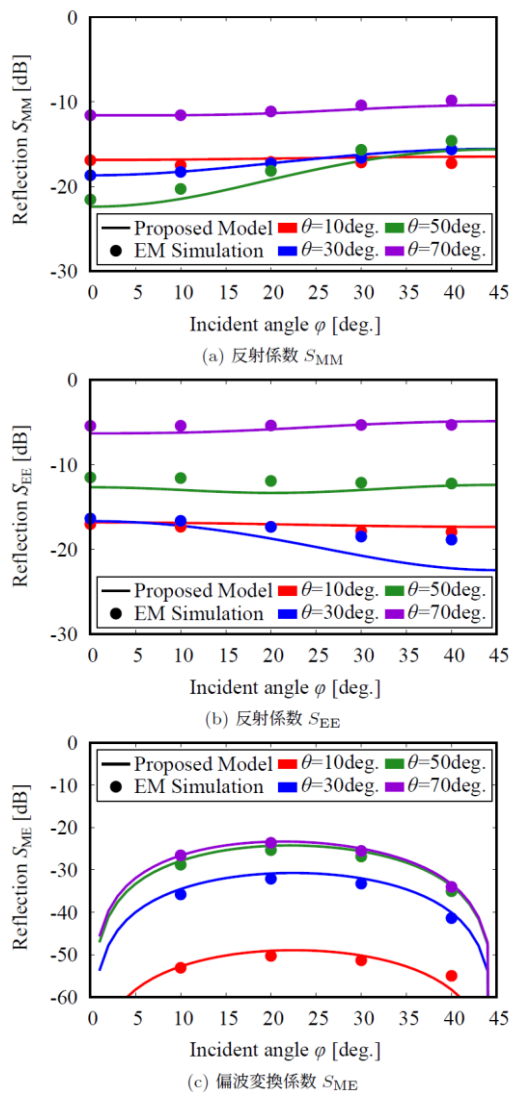


図 8 推定した S パラメータ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sota Matsumoto, Ryosuke Suga, Kiyomichi Araki, Osamu Hashimoto	4. 巻 vol. E104-C
2. 論文標題 Design of Ultra-Thin Wave Absorber with Square Patch Array Considering Electromagnetic Coupling between Patch Array and Back-Metal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Electron.	6. 最初と最後の頁 681-684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2021ECS6005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松本壮太, 高橋友朗, 須賀良介, 荒木純道, 橋本 修
2. 発表標題 重ね合わせの原理に基づいた円形パッチ配列電波吸収体の反射係数の導出
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本壮太, 押野隼也, 須賀良介, 荒木純道, 橋本 修
2. 発表標題 円形パッチ配列電波吸収体の周期境界条件に基づく斜入射における入力インピーダンスの導出
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉昂大, 須賀良介, 荒木純道, 橋本修
2. 発表標題 二層型円形パッチ配列電波吸収体の広帯域化に向けた等価回路を用いた帯域幅設計
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sakamoto, R. Suga, K. Araki, and O. Hashimoto
2. 発表標題 Input Impedance Design of a Circular Patch Array Absorber Considering Perturbation Elements Position
3. 学会等名 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本壮太, 須賀良介, 橋本 修
2. 発表標題 低導電率スクエアパッチアレー薄型電波吸収体におけるパッチアレーと導体板間の電磁界結合の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本壮太, 須賀良介, 荒木純道, 橋本 修
2. 発表標題 パッチと導体板間の電磁界結合を考慮したスクエアパッチアレー薄型電波吸収体の構造設計に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本壮太, 須賀良介, 荒木純道, 橋本 修
2. 発表標題 スクエアパッチアレー電波吸収体の電磁界結合を考慮した設計に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 押野隼也, 松本壮太, 須賀良介, 荒木純道, 橋本 修
2. 発表標題 6ポート回路モデルを用いた任意の偏波及び入射角度における円形パッチ配列電波吸収体のSパラメータ推定
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関