

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420351

研究課題名(和文) 新たな反射性能を有するメタ・サーフェス設計法の確立と適用領域の開拓

研究課題名(英文) Design Method Establishment and Pioneering Application Area of Meta-Surface with New Reflection Performance

研究代表者

堀 俊和 (Hori, Toshikazu)

福井大学・産学官連携本部・客員教授

研究者番号：10343188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、反射位相を任意に制御できるメタ・サーフェス(Meta-Surface：MTS)の設計・構成技術を確認するとともに、反射面における特異な反射性能を有する新たな反射面を実現し、アンテナ・伝搬領域における適用領域の開拓を行うことである。

研究においては、周波数選択板と地板から構成されるMTSを取り上げ、光学近似理論を用いた簡易設計法を提案した。これを用いて、MTS反射板、完全磁気導体特性を持つMTS、偏波変換MTS、反射角制御MTS等の新たな反射性能を有する特異な反射面の設計法・構成法を確認した。さらに、これらの研究成果をアンテナ・伝搬領域に応用し、その実現の可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a design and configuration technique of the meta-surface (MTS) where the reflection phase can be controlled optionally as well as achieve new MTS with the peculiar reflective performance in the surface of MTS and reclaim the scope in the antenna and propagation area.

Since putting it in the study, MTS which consists of frequency selective surface and the ground plane was taken up and a simple design method using optical approximate theory was proposed. Peculiar design method of MTS and construction with the new reflective performance which were MTS reflector, MTS with the perfect magnetic conductor characteristics, polarization conversion MTS and reflection angle control MTS, etc. were established. These study results were applied to antenna and propagation area and its achieved possibility was made clear.

研究分野：アンテナ・伝搬

キーワード：メタ・サーフェス 周波数選択板 偏波変換 反射位相 反射振幅 反射方向 アンテナ 電波伝搬

1. 研究開始当初の背景

メタ・サーフェス (Meta-Surface : 以下、MTS と略す) は、自然界には存在しない反射特性を持つ人工表面 (超表面) のことであり、その表面に入射した電磁波の反射を制御できる特徴を有している。

しかし、MTS 表面において任意の反射特性を実現するための最適設計法は確立していません。適用領域の開拓のためには、MTS の簡易構成法の確立が望まれていた。特に、アンテナ・伝搬の領域では、特異な反射面を用いたアンテナの小形化および高性能化、電波伝搬特性の制御への適用が期待されていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、反射特性を任意に制御できる MTS の簡易設計法・構成法の確立を図るとともに、新しい反射特性を持つ特異な反射面の設計法を確立し、MTS のアンテナ・伝搬領域での適用領域の拡大を図ることを目的とする。

(2) 本研究の具体的目的は、以下の 3 つにまとめられる。

- ① 任意の反射特性を持つ MTS の簡易設計法・構成法を確立する。特に、有限構造の MTS の反射特性についても検討する。
- ② MTS の反射面における直線・円偏波変換、直交偏波変換、反射方向制御等の新たな反射性能を有する特異な反射面の設計法を確立する。
- ③ 実現した特異な反射面を用いてアンテナの小形化および高性能化、電波伝搬特性の制御等、アンテナ・伝搬領域での適用領域の拡大を図る。

3. 研究の方法

(1) 任意の反射特性をもつ有限構造 MTS の設計法の確立 :

図 1 に示す周波数選択板 (Frequency Selective Surface : 以下、FSS と略す) と地板から構成される MTS について、図 2 に示す光学近似理論を用いた新たな簡易設計法を提案する。これにより、MTS の構成要素である FSS の空間フィルタ特性を適当に選ぶことにより、任意の反射特性を持つ MTS の実現が可能になる。

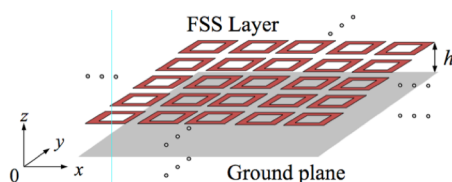


図 1 MTS の構成例

(2) 新しい反射性能を有する特異な MTS の設計法の確立 :

光学近似理論を用いた新たな簡易設計法に基づいて、MTS の低姿勢設計法、完全磁気導

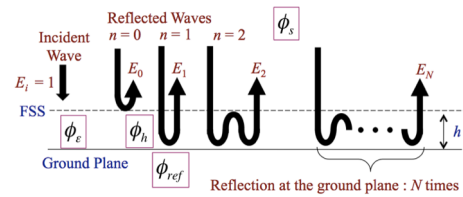


図 2 光学近似理論による反射波の振る舞い

体 (Perfect Magnetic Conductor : 以下、PMC と略す) の簡易設計法、等を確立するとともに、MTS の構成要素である FSS の組合せにより、直線・円偏波変換、直交偏波変換、反射方向制御等の新たな反射性能を有する特異な反射面を実現する。

(3) 特異な反射面によるアンテナ・伝搬領域での適用領域の拡大 :

特異な反射特性を持つ MTS の適用領域開拓の一環として、MTS 反射板による反射板付きアンテナの低姿勢化、偏波変換 MTS による直線偏波給電円偏波アンテナの実現、直交偏波変換 MTS によるモノスタティック RCS 低減反射板の実現、反射角制御 MTS による電波伝搬特性制御、等についてその実現を図る。

4. 研究成果

(1) MTS の低姿勢設計および反射板付きアンテナの低姿勢化 :

光学近似理論を用いた新たな簡易設計法の提案により、MTS の厚さと FSS の空間フィルタ特性の関係が定式化され、MTS の低姿勢設計が可能となった。検討の結果、PMC 動作比帯域幅およびダイポールアンテナの反射板として用いたときの利得を考慮すると、ループ型 FSS を空間フィルタとして用いた MTS が優れていることを明らかにした。このループ型 FSS を用いた 0.1 波長の薄さの MTS の試作・実験により、MTS の低姿勢設計法の妥当性が確認された。

(2) 誘電体基板を用いた MTS の設計 :

MTS を構成する FSS と地板との間に誘電体基板を挟んだ構成の MTS の低姿勢設計法を確立し、帯域特性を明らかにした。検討の結果、比誘電率の波長短縮の効果以上の低姿勢化を可能とする構成が存在することを明らかにした。また、誘電体が損失を持つ場合、特定の誘電正接値において PMC 特性を持たないことが明らかとなり、誘電体基板を用いた場合 MTS の設計に限界が有ることを明らかにした。

(3) PMC 特性を持つ MTS の設計 :

光学近似理論を用いた新たな簡易設計法に基づいて、周波数に無関係に PMC 特性を持つ MTS を実現するための FSS の空間フィルタ特性を明らかにした。検討の結果、FSS の空間フィルタ特性は、図 3 に示すように、

振幅特性が帯域通過フィルタの特性であるのに対し、位相特性は帯域通過フィルタの特性とは異なり、傾きが逆の周波数特性を持つことが明らかとなった。この特性を持つ MTS として、負の透磁率を持つ媒質、周波数が低くなるにつれて比誘電率が增加する媒質を用いた構成を提案し、PMC 特性を持つ MTS 実現の可能性を明らかにした。

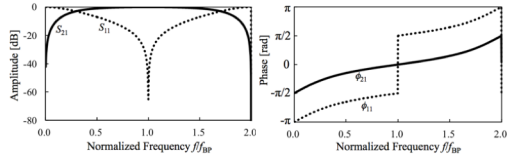
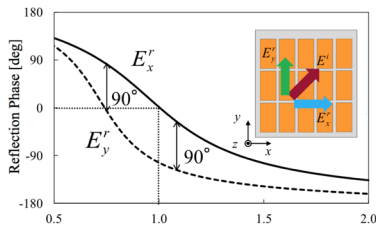


図3 PMC 特性を持つ MTS に要求される FSS の空間フィルタ特性

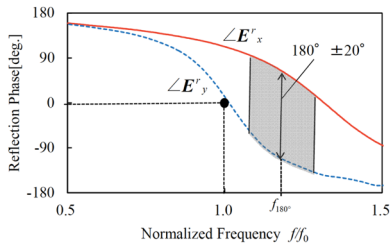
(4) 偏波変換 MTS の設計 :

光学近似理論を用いた新たな簡易設計法に基づいて、図4に示すように同振幅で直交する波の MTS での反射位相を 90° あるいは 180° とすることにより、直線・円偏波変換あるいは直交偏波変換が可能となる MTS の設計法を確立した。

直線・円偏波変換 MTS として、パッチ型 FSS を空間フィルタとして用いた MTS を設計し、広帯域な軸比特性を持つことが明らかとなった。直交偏波変換 MTS についても、同様に広帯域な偏波変換特性が得られている。



(a) 直線・円偏波変換 MTS の反射位相



(b) 直交偏波変換 MTS の反射位相

図4 偏波変換 MTS の反射位相

さらに、図5に示すように、上記で検討した空間フィルタ特性を持つ直交偏波変換 FSS を円筒状に構成し、円筒中心にダイポールアンテナを設けた水平偏波水平面内無指向性アンテナを実現した。このアンテナにおいて、ダイポールアンテナからの放射波(垂直偏波)は円筒状 FSS により直交偏波変換され、水平面内に水平偏波を放射している。検討の結果、交さ偏波-21dB のリップルの少ない指向性を

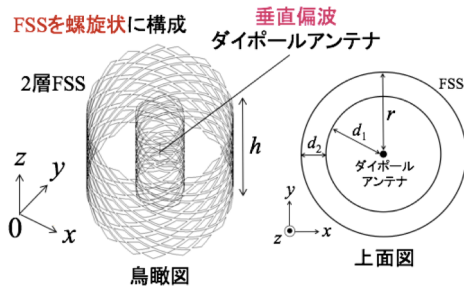


図5 円筒状直交偏波変換 MTS を用いた 水平偏波無指向性アンテナ

を持ち、従来の水平偏波水平面内無指向性アンテナに比べて優れた特性を持つことを明らかにした。

(5) 反射角制御 MTS の設計 :

MTS を構成するユニットセルのセル間に一定の反射位相差を設けることにより、垂直入射波の反射角を傾けることが出来る。光学近似理論を用いた新たな簡易設計法に基づいて、この任意の反射位相を持つユニットセルを並べることによる反射角制御 MTS の設計法を確立した。

また、2層構造 FSS において、FSS の1層目と2層目の配置位置を互いにずらすことにより MTS の反射位相が変化することを用いて、垂直入射波の反射波の方向を 45° まで可変出来ることを明らかにした。

(6) MTS 反射板付ダイポールアンテナ :

MTS 反射板付ダイポールアンテナの高利得化とビーム方向制御のための最適構成法を明らかにした。検討の結果、図6に示すように、MTS のユニットセルの配置範囲を最適な値とすることにより高利得化が図れ、また、設計周波数を中心周波数より低くすることで、より広帯域な特性が得られることを明らかにした。

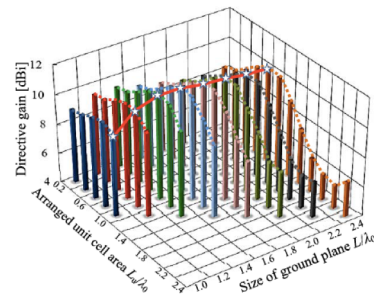


図6 MTS 反射板付ダイポールアンテナの高利得化のための MTS の最適構成

(7) モノスタティック RCS 低減 MTS 反射板: RCS (Radar Cross-Section : 以下、RCS と略す) を低減可能なモノスタティック RCS 低減

反射板として、MTSの応用が考えられている。光学近似理論を用いた新たな簡易設計法により求めた所望の反射位相を持つユニットセルの配列により、モノスタティック RCS 低減 MTS 反射板の設計法を確立した。ここで、ユニットセルの反射位相は、反射波が到来方向に戻らないように設定されている。検討の結果、反射波レベルは 30dB 程度低減できることを明らかにした。

(8) メタ・スペースの設計：

任意の反射特性を持つ特異な反射面の設計法の確立に基づき、屋内伝搬環境および OTA (Over the Air) 測定環境を自由に制御できるメタ・スペース (超伝搬空間) の実現が可能である。光学近似理論を用いた新たな簡易設計法により求めた所望の反射位相を持つユニットセルの配列により、任意の反射面を構成出来、メタ・スペース実現の可能性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 堀 俊和、メタ・サーフェスの設計技術とアンテナ・伝搬への応用、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol.J99-B、No.9、2016、pp.646-654
- ② R. Kuse, T. Hori, M. Fujimoto, T. Seki, K. Sato and I. Oshima, Equivalent Circuit Analysis of Meta-Surface Using Double-Layered Patch-Type FSS, IEICE Trans. Commun, 査読有、Vol.E-99B、No.11、2016、pp.2373-2380
- ③ R. Kuse, T. Hori and M. Fujimoto, Variable-Reflection-Angle Meta-Surface Using Double-Layered Patch-Type FSS, IEICE Commun. Express, 査読有、Vol.5、No.8、2016、pp.290-296
- ④ R. Kuse, T. Hori, M. Fujimoto, T. Seki, K. Sato and I. Oshima, Effect of Miniaturization of the Unit Cell of a Meta-Surface Using Double-Layered FSS, IEICE Commun. Express, 査読有、Vol.4、No.12、2015、pp.376-381
- ⑤ 村上 靖宜、堀 俊和、藤元 美俊、AMC 反射板付ダイポールアンテナのための反射板の最適構成、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol.J98-B、No.11、2015、pp.1212-1220
- ⑥ 村上 靖宜、堀 俊和、藤元 美俊、誘電体基板を用いた人工磁気導体の低姿勢設計と帯域特性、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol.J98-B、No.2、2015、pp.172-179

[学会発表] (計 3 8 件)

- ① T. Hori、Horizontally Polarized Omnidirectional Antenna Using Orthogonal Polarization Conversion FSS, iWAT2017, Mar. 1-3, 2017, Athens (Greece)
- ② 堀 俊和、メタ・サーフェスのアンテナ・伝

搬への応用、2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、Sept. 20-23, 2016、北大 (札幌)

- ③ T. Hori、Low-Profile Design of Meta-Surface with Frequency Selective Surface and Its Application, AWAP2016、招待講演、Jan. 27-29, 2016、Busan (Korea)
- ④ R. Kuse、Variable Reflection Angle Meta-Surface with Polarization Conversion Function, 2015 IEEE AP-S, July 19-24, 2015、Vancouver (USA)
- ⑤ 堀 俊和、気儘なアンテナ研究のターゲット -広帯域・円偏波・高利得-、招待講演、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会、招待講演、Mar. 19-20, 2015、福井大 (福井)
- ⑥ R. Kuse、Filtering Characteristics of FSS for Realizing Perfect Magnetic Conductor without Frequency Dependence, iWAT2015, Mar. 4-6, 2015、Seoul (Korea)
- ⑦ その他、国際会議 1 5 件、国内発表 1 7 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 俊和 (HORI Toshikazu)

福井大学・産学官連携本部・客員教授

研究者番号： 1 0 3 4 3 1 8 8