

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：13903

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2022

課題番号：17KK0114

研究課題名（和文）新規波形選択メタサーフェスを解明する数値解析シミュレーション法

研究課題名（英文）Numerical simulation method for unveiling new waveform-selective metasurfaces

研究代表者

若土 弘樹（Wakatsuchi, Hiroki）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00725278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では波形選択メタサーフェスによる電磁界の影響を可視化可能な解析手法を新たに開発した。本報告書ではその一例として、パルス幅に応じて吸収率を変化させる波形選択メタサーフェスの解析結果を紹介した。数値解析の結果、提案された解析手法を用いることで、波形選択メタサーフェス特有のパルス幅に応じた吸収率の変化を確認することができた。また、SPICEパラメータを取り込む手法では、回路用のポート数を変化させながら、柔軟にモデリングできることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後の展望として、本手法を用いることで得られる電磁界分布に基づいて、波形選択メタサーフェスの振る舞いを詳細に解明し、電磁特性を向上できるようになると期待される。また、本手法とともに波形選択メタサーフェスを用いた応用デバイスの考案なども想定される。例えば、アンテナ設計の一部に取り込んだ場合の放射パターンの観測や、近年活発に研究開発の進められる知的反射面（Intelligent Reflecting Surface）のビームフォーミングの性能評価にも利用できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research we have developed a new simulation method to visualise how waveform-selective metasurfaces vary electromagnetic field distributions. In this report we introduced an example of a waveform-selective metasurface that changes absorptance in response to the pulse width of the incident wave. As a result of numerical simulations, our study unveiled the intrinsic characteristics of the waveform-selective metasurface, namely, the absorptance varying in accordance with the pulse width. In addition, we showed that the number of circuit ports can be changed by directly introducing SPICE parameters into the simulation method used, specifically, the TLM method.

研究分野：電磁波工学、電磁気学

キーワード：メタマテリアル メタサーフェス パルス 非線形性 電磁界解析 TLM

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

従来、自然界に存在する材料の入射波に対する電磁特性（吸収、透過率など）はその材料を構成する「分子の振る舞い」と「入射波の周波数」によって決定されていた。前者に関しては、波長よりも短い周期構造から成る人工材料メタサーフェス（図1）の登場により、構成分子だけに制限されない特性を得られるようになった[1, 2]。すなわち、周期構造の共振現象によって極めて特異な特性も容易に作り出すことが可能となった。しかしながら、後者の周波数に関しては、メタサーフェスにおいても周波数依存性を有していることから、電磁特性は周波数に応じて大きく変化するものと認識されていた。言い換えると、電磁研究分野での一般的な認識では「周波数が固定された場合の各材料の振舞いは常に一定」と理解されており、同一周波数において異なる電波を識別する材料は存在しなかった。

このような一般的な理解に対して、代表者はメタサーフェスに1) ダイオードの整流作用（周波数成分を主に直流成分へと変換）とそれに対する2) キャパシタなど回路素子の時間領域応答を組み合わせることで、世界で初めて同一周波数でも波形（すなわちパルス幅）に応じて入射波の吸収率を変化可能な新たな電磁特性「波形選択性」を報告した（図2）[3-5]。その結果、同一周波数電波であっても「パルス幅」という新たな概念に基づいて識別できるようになった。さらに基課題[若手研究A、H27-29]では波形選択性による操作を従来の吸収率だけでなく一般的な散乱特性（反射、透過率など）まで拡張し、さらには周囲の状況に応じて柔軟に特性変化できる動的制御機構の導入にも成功した。

波形選択性の基本概念の拡張によって、今後のさらなる応用研究にも期待がかかる。例えば、これら材料を統合することで、波形に応じて任意の同一周波数電波のみを検出するアンテナ（図3）など、周波数だけでなく、パルス幅という新たな自由度を有する次世代マイクロ波デバイスの開発が考えられる。また、周波数資源の枯渇問題に対する新たなアプローチとしての可能性も秘めている。ただし、これまで波形選択メタサーフェスの設計（数値解析手法）には協調解析手法が用いられていた[3-5]。この手法の特徴として、電磁界解析と回路解析を統合することで非線形回路を含む電磁材料を効率的に評価できるメリットが挙げられる。しかしながら、この手法では最終的な解は回路解析で算出されるため、得られる結果は入出力ポートでの情報（吸収率、反射率など）に限定され、波形選択メタサーフェスの振舞いや解析空間内の電磁界分布を観測することはできなかった（図4）。

2. 研究の目的

そこで本研究では波形選択メタサーフェスの挙動を可視化可能な電磁界解析手法を開発する（図4）。これによって、応用デバイス開発に貢献するだけでなく、基礎研究の観点からも詳細な波形選択メタサーフェスの振舞いを解明することになり、さらなる波形選択性の研究の発展を目指した。

3. 研究の方法

本報告書では本研究における成果の一例として、図5に示す周期セルから構成される波形選択メタサーフェスの解析結果について紹介する。この周期セルは表面に位置する正方形の金属パッチ、誘電体基板、背面のGND板から構成された。ただし、金属パッチ間には回路素子を配置するためのスペースを設けるため、金属パッチの一部を取り除き、加えて小さな導電性のパッドを2つ配置した。これらの導電部をつなぐように4つのダイオード（ダイオードブリッジ）、RC並列回路を接続した。また、周期セルは完全電気導体 Perfect Electric Conductor (PEC) と完全磁気導体 Perfect Magnetic Conductor (PMC) から構成される導波管内に配置された。

この条件において電磁界解析手法の1つである Transmission Line Modelling 法 (TLM 法) とともに上述のメタサーフェスを評価した。なお、TLM 法とは解析空間を送送線路ならびに回路素子によって近似・表現する手法である[6]。一般に TLM 法では線形の回路素子のみを用いて解析されるものの、本研究では伝送線路にダイオードを導入することで波形選択メタサーフェスをモデリングした[7]。さらに、ダイオードに限定されず広く非線形回路素子を取り込むため、本研究では SPICE パラメータを取り込んだ解析手法についても新たに開発した。

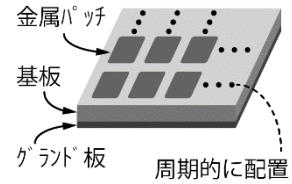


図1. メタサーフェス

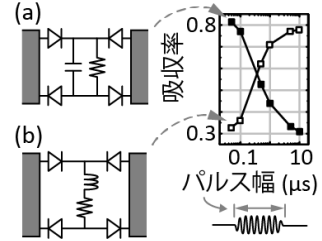
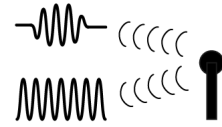


図2. 波形選択性を得るためにメタサーフェスの金属パッチ間に配置された回路とその吸収率（周波数：4.2 GHz 固定）

1) 従来のアンテナ



2) 波形選択性の導入

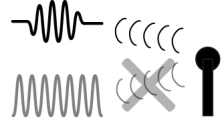


図3. 波形選択性を有するアンテナ

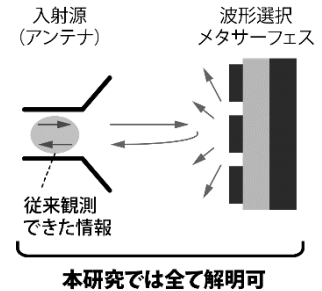


図4. 新たな解析手法によって波形選択メタサーフェスの振舞いや周辺電磁界分布の様子を解明

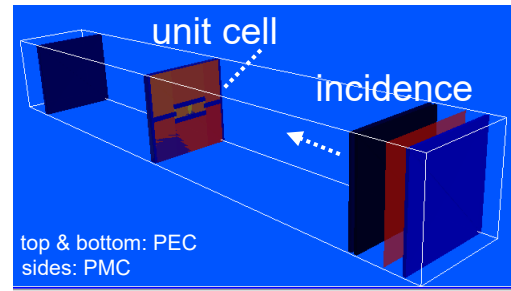
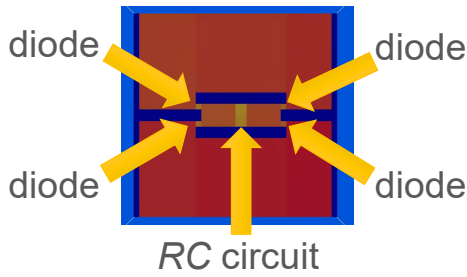


図5. 解析モデルの例. (左) 周期セルと (右) 導波管内に配置された様子.

4. 研究成果

まず、ダイオードを TLM 法に取り込んで解析した結果を図6に示す。この結果から、十分に短い 50 ns 長のパルス変調された正弦波 (図中の 50ns pulse) を照射した場合、十分に長い信号を表す連続波 (図中の CW) と比べ、より大きな吸収率を得られることが分かった。特に 4.0 GHz では両波形間の吸収率に顕著な差異があることが分かった。また、より詳細な吸収率の変化を確認するため、図7ではパルス幅を細かく変化させた。図7から分かるように、パルス幅を長くすることで、吸収率は緩やかに減少することが確認された。この理由としては波形選択メタサーフェス内に組み込まれたダイオードブリッジと RC 並列回路が作用していることが挙げられる。ここで、入射波によって誘起された電荷は、ダイオードブリッジによって全波整流され、内部のキャパシタに蓄積された。その後、並列に接続された抵抗によってエネルギーが消散されるため、十分に短いパルスに対して、このメタサーフェスは高い吸収率を示した。しかしながら、パルス幅が長くなるにつれて、キャパシタは充電されるため、電荷の流入が妨げられ、吸収率が低下した。以上の理由から、図6や図7ではパルス幅の増加とともに吸収率が低下したと説明できる。

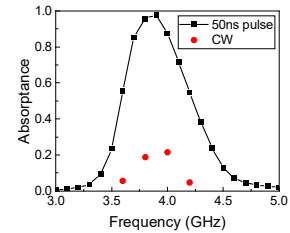


図6. ダイオードを TLM 法に組み込んだモデルの周波数特性

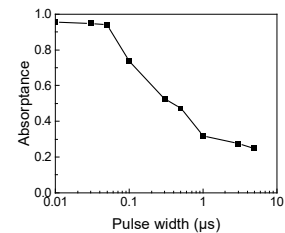


図7. ダイオードを TLM 法に組み込んだモデルのパルス幅依存性. 周波数は 4.0 GHz に固定.

続いて、TLM 法に SPICE パラメータを取り込んで解析した結果を示す。この評価には2種類のモデルを利用した。第一のモデルでは図5左のモデルと同様に計5つのポートでそれぞれ4つのダイオードと RC 並列回路を配置した。ただし、ダイオードは SPICE パラメータによってモデリングされた。第二のモデルでは、図8左のように、1つのポートにこれら全ての回路素子を配置することで、モデリングのプロセスを簡略化させた。これらのモデルに対して、50 ns 長の短パルス照射させた結果を図8右に示す。その結果、5つのポートを用いたモデル (図中の w/ 4 SPICE diodes) は図5のモデル (w/o SPICE model) とほぼ同等の結果を得られることが分かった。一方、1つのポートで全ての回路素子を取り込んだモデル (w/ SPICE circuit) では、吸収率が最大となる周波数は低周波側へとシフトすることが分かった。これは図8左からも分かるように、回路ポートを1つに減らすことで、設けられた金属部が大きくなるとともに、共振周波数に影響が表れたためと考えられる。しかしながら、いずれのモデルにおいても短パルスに対する強い吸収特性を確認することができた。なお、これらのモデルは電磁界分布を可視化可能な TLM 法に基づいていることから、波形選択メタサーフェスやその周囲などの詳細な電磁界をプロットすることも可能である [7]。

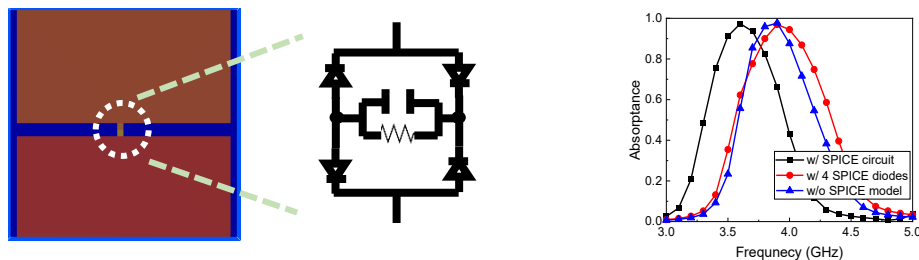


図8. SPICE パラメータの導入. (左) 1 ポートに全ての回路素子を取り込んだ周期セルモデル. (右) 数値解析結果.

本研究では波形選択メタサーフェスによる電磁界の影響を可視化可能な解析手法を新たに開発した。本報告書ではその一例として、パルス幅に応じて吸収率を変化させる波形選択メタサーフェスの解析結果を紹介した。数値解析の結果、提案された解析手法を用いることで、波形選択メタサーフェス特有のパルス幅に応じた吸収率の変化を確認することができた。また、SPICEパラメータを取り込む手法では、回路用のポート数を変化させながら、柔軟にモデリングできることが分かった。今後の展望として、本手法を用いることで得られる電磁界分布に基づいて、波形選択メタサーフェスの振る舞いを詳細に解明し、電磁特性を向上できるようになると期待される。また、本手法とともに波形選択メタサーフェスを用いた応用デバイスの考案なども想定される。例えば、アンテナ設計の一部に取り込んだ場合の放射パターンの観測[8]や、近年活発に研究開発の進められる知的反射面 (Intelligent Reflecting Surface) のビームフォーミングの性能評価[9, 10]にも利用できると思われる。

<引用文献>

1. R. A. SHELBY, D. R. SMITH, and S. SCHULTZ, “Experimental Verification of a Negative Index of Refraction,” *Science*, 292, 77, 2001.
2. N. YU, P. GENEVET, M. A. KATS, F. AIETA, J. TETIENNE, F. CAPASSO, and Z. GABURRO, “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction,” *Science*, 334, 333, 2011.
3. H. Wakatsuchi, S. Kim, J. J. Rushton, and D. F. Sievenpiper, “Waveform-Dependent Absorbing Metasurfaces,” *Phys. Rev. Lett.*, 111, 245501, 2013.
4. H. Wakatsuchi, D. Anzai, J. J. Rushton, F. Gao, S. Kim, and D. F. Sievenpiper, “Waveform Selectivity at the Same Frequency,” *Sci. Rep.*, 5, 9639, 2015.
5. H. Wakatsuchi, J. Long, and D. Sievenpiper, “Waveform Selective Surfaces,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, no. 11, p. 1806386, 2019.
6. C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method: TLM*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1995.
7. H. Wakatsuchi, D. Anzai, and C. Smartt, “Visualization of Field Distributions of Waveform-Selective Metasurface,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 15, 690, 2016.
8. D. Ushikoshi, R. Higashiura, K. Tachi, A. A. Fathnan, S. Mahmood, H. Takeshita, H. Homma, M. R. Akram, S. Vellucci, J. Lee, A. Toscano, F. Bilotti, C. Christopoulos, and H. Wakatsuchi, “Pulse-Driven Self-Reconfigurable Meta-Antennas,” *Nat. Commun.*, 14, 633, 2023.
9. A. A. Fathnan, H. Homma, S. Sugiura, and H. Wakatsuchi, “Method for Extracting the Equivalent Admittance from Time-Varying Metasurfaces and its Application to Self-Tuned Spatiotemporal Wave Manipulation,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 56, 015304, 2023.
10. A. A. Fathnan, K. Takimoto, M. Tanikawa, K. Nakamura, S. Sugiura, and H. Wakatsuchi, “Unsynchronized Reconfigurable Intelligent Surfaces with Pulse-Width-Based Design,” *IEEE Trans. Veh. Technol.* (accepted) (available in arXiv:2212.10033)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Homma Haruki, Akram Muhammad Rizwan, Fathnan Ashif Aminulloh, Lee Jiyeon, Christopoulos Christos, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 11
2. 論文標題 Anisotropic impedance surfaces activated by incident waveform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1989 ~ 2000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Aminulloh Fathnan Ashif, Homma Haruki, Sugiura Shinya, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 56
2. 論文標題 Method for extracting the equivalent admittance from time-varying metasurfaces and its application to self-tuned spatiotemporal wave manipulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015304 ~ 015304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac9b67	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 -

1. 著者名 Ushikoshi Daiju, Higashiura Riku, Tachi Kaito, Fathnan Ashif Aminulloh, Mahmood Suhair, Takeshita Hiroki, Homma Haruki, Akram Muhammad Rizwan, Vellucci Stefano, Lee Jiyeon, Toscano Alessandro, Bilotti Filiberto, Christopoulos Christos, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Pulse-driven self-reconfigurable meta-antennas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 633
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36342-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Wakatsuchi, D. Ushikoshi, S.M. Mahmood, R. Higashiura, C. Smartt, and C. Christopoulos
2. 発表標題 Antenna Applications Based on Waveform-Selective Metasurfaces Varying Time-Domain Responses at the Same Frequency
3. 学会等名 Metamaterials'2019 the 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	クリストーボウロス クリトス (Christopoulos Christos)	ノッティンガム大学・Department of Electrical and Electronic Engineering・Emeritus Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	スマート クリス (Smartt Chris)	ノッティンガム大学・Department of Electrical and Electronic Engineering・Senior Research Fellow	

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		
英国	ノッティンガム大学		