

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01324

研究課題名（和文）パルス分割多重化：電磁材料に基づいた通信デバイスの創生と通信特性の解明

研究課題名（英文）Pulse division multiplexing: development of EM-material-based communication devices and their communication characteristics

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） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は最終的に既存の確立された多重化技術で用いられる時間・空間・周波数などから独立した概念として、パルス幅に着目して多重化を試みるものである。すなわち、新次元「パルス幅」を用いて通信の自由度を向上させる。本研究ではパルス分割多重化に向けた第一歩として、同一時刻に到来する異なるパルスを分離可能なシステムについて考案した。提案システムは数値解析ならびに実証実験において検証され、同一周波数でもパルス幅に応じて異なる電波を抽出できることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の5G、6G、IoTなどを始めとした、無線通信の先端技術に対する需要はこれまでに無い高まりを見せている。例えば、IoT機器は年間20億台以上のペースで増加し、ひと月あたりのデータ流通量も今後5年間で現在の3倍超になると予測されている。本研究を発展させ、真にパルス分割多重化の技術が完成されれば、新たな多重化方式として伝送レートを飛躍的に向上できると期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study lies in developing a novel multiplexing technique based on "pulse width", a parameter independent of existing multiplexing parameters, such as time, space and frequency. Put simply, the use of the pulse width enhances the degree of freedom in wireless communications. To initiate the pulse division multiplexing, we have developed a filtering system capable of separating different pulses arriving at the same time. The proposed system has been verified through numerical and experimental demonstrations. Our results confirmed that pulses with varying widths can be retrieved separately, even when they have the same frequency.

研究分野：電磁波工学

キーワード：メタマテリアル メタサーフェス パルス 通信 多重化 フィルタ

1. 研究開始当初の背景

伝送レートは1秒あたりに送信される情報量を表し、伝送路によって異なる。ただし、各伝送路における伝送レートは設計値等に基づく理論的な上限が存在する。これまで100年以上にわたり、時間・空間・周波数などに基づいた通信信号の多重化技術が開発され[1]、複数の信号を同時に伝送させることで伝送レートは向上し、大容量な無線通信サービスを利用できるようになった。しかしながら、近年の5G、6G、IoTなどを始めとした、無線通信の先端技術に対する需要はこれまでに無い高まりを見せている。例えば、IoT機器は年間20億台以上のペースで増加し、ひと月あたりのデータ流通量も今後5年間で現在の3倍超になると予測されている[2]。以上から、既存の伝送レート上限を超えるための新たなアプローチが必要となる。

これに対し、研究代表者は電磁材料・メタサーフェスの研究を進めてきた。同材料は周期的な金属形状を調節することで、自然界に存在しない電磁特性であっても人工的に作り出すことができる[3]。ここで、近代表者は回路構造を導入したメタサーフェスを報告した。同材料の内部では、ダイオードの直流成分への周波数変換によって過渡応答を引き起こし、メタサーフェス固有の周波数応答と連動させた。その結果、世界で初めて、同一周波数でも波形(パルス幅)に応じて電磁応答を変化させる「波形選択性」を実現した[4]。

さらに最新の研究では、このメタサーフェス(以下、波形選択メタサーフェス)はビット誤り率などの通信特性を効果的に操作できることも分かってきた[5]。しかしながら、現実的な通信環境では様々な電波が同時に飛び交うものの、波形選択メタサーフェスには同時刻に入射した異なるパルス信号を選別できない欠点があった。ここで、代表者は同時刻で選別する問題さえ解消されれば、合成された通信信号をパルス幅に応じて分割する“パルス”分割多重通信システムを構築でき、パルス信号の多重化によって伝送レートは向上するのではないかと考えた。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究は最終的に既存の確立された多重化技術で用いられる時間・空間・周波数などから独立した概念として、パルス幅に着目して多重化を試みるものである。すなわち、新次元「パルス幅」を用いて通信の自由度を向上させる。ただし、本研究ではパルス分割多重化に向けた第一歩として、同一時刻に到来する異なるパルスを分離可能なシステムについて考案した。

3. 研究の方法

波形選択メタサーフェスの基本的なメカニズムは以下のように理解することができる。考案されたメタサーフェスのユニットセルは厚さ1.5mmの誘電体基板(Rogers3003)上に銅箔を置き、5mm×16mmの周期的な開口を18mm周期で設けたスリット構造に基づいている。銅開口端間の各ギャップを横切って、共振周波数を調整し、サブ波長周期性を維持するためのコンデンサ(図1の $C_{add}$ )を接続した。さらに、ダイオード・ブリッジを使って入力波形を整流することで、入力波形の周波数は無数の成分へと変換された。しかしながら、 $|\sin|$ のフーリエ展開からわかるように、入射エネルギー波のほとんどは周波数成分へと変換されるため、古典的な直流回路ではよく知られているように、ダイオード・ブリッジ内にコンデンサーやインダクターなどの回路部品を追加することで、過渡応答を発生させた。例えば、キャパシタ( $C$ )ベースの波形選択メタサーフェスとして、キャパシタ(1nF)を抵抗(1kΩ)に並列接続した場合(図1

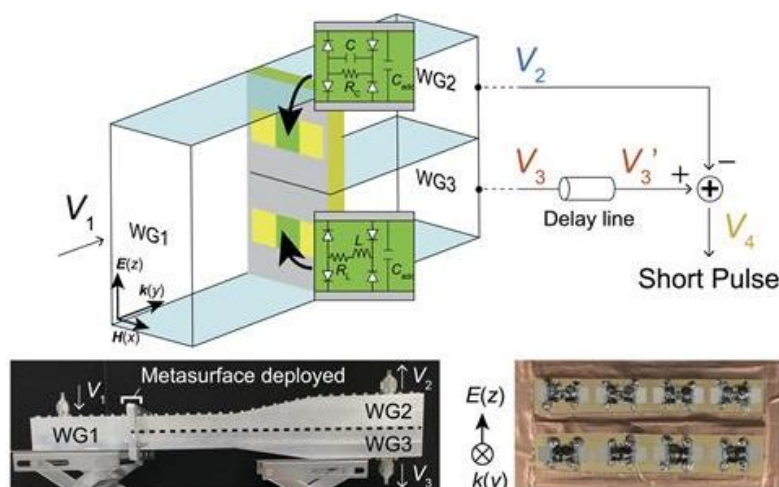


図1. メタサーフェスフィルタの基本構成と測定試料.

の  $C$  と  $R_c$  を参照) 短パルスのエネルギーはキャパシタで完全に蓄積される。このエネルギーはその後ダイオード・ブリッジ内で効率的に消散されたため、透過率が低下するが、連続波(CW)ではキャパシタは完全に充電されたため、スリット構造の固有共振メカニズムは維持され、入射波を強く透過させることができる。一方、インダクタ(1 mH)を抵抗(5.5  $\Omega$ )と直列に接続し、インダクタ( $L$ )ベースの波形選択メタサーフェスとして使用した場合、まったく異なる伝送メカニズムが得られた(図1の  $L$  と  $R_L$  を参照)。この場合、初期状態ではインダクタの起電力により、誘導電荷がダイオード・ブリッジに侵入することは阻害されたものの、整流された電荷のゼロ周波数成分により、この力は徐々に消失した。従って、スリット構造の本質的な伝送メカニズムは、短パルスでは正常に維持されたものの、CWでは抑制された。以上の理由から、これらの波形選択メタサーフェスは、同じ周波数であっても、入射パルスの持続時間によって異なる挙動を示したが、角度依存性などの他の変数を利用しない限り、すべてのパルスが同時に発生したときに、他のパルスの中から特定のパルスだけを検知することはできなかった。このため、この同時入射の問題を図1の上部に示したメタサーフェス・フィルタで対処した。ここでは、50 ナノ秒の短パルスとCWの両方が同じ正弦関数(すなわち、同じ周波数)に基づき、同時に導波路WG1に入射すると仮定し、さらに、両波形は(単純化のため)同一の一般的な正弦関数(sin)を用いて設計した。このため、CW波形は単に正弦関数を繰り返し、波形の前半部分と後半部分は同一であった。このような状況の下で、入射導波路WG1は、それぞれ  $C$  ベースと  $L$  ベースの波形選択メタサーフェスのユニットセルを持つ2つの導波路WG2とWG3に分割されたことにより、 $C$  ベースの波形選択メタサーフェスを用いたWG2(図1のWG2)は、定常状態で効率よくCWを伝送することができた。しかしながら、 $L$  ベースの波形選択メタサーフェスを用いたWG3(図1のWG3)は、初期の時間領域において短いパルスとCW波形の一部を強く伝送した。これは、WG2ではCWを選択的に取り出すことができるが、WG3では短パルスだけを出力できないことを示している。この問題に対処するため、WG3に遅延線を追加接続し、WG3で短パルスとCWを含む波形をWG2でCWのみを含む波形で減算する逐次干渉キャンセル(SIC)素子を実装した(図1の  $V_4$  参照)。なお、図1の上部では、追加のコンデンサーを使用することで、波形選択メタサーフェスの動作周波数を下げ、スーパーセルのサブ波長周期性の維持が可能となる。

#### 4. 研究成果

このメタサーフェスフィルタを数値実験と実験の両方で検証した。数値シミュレーションでは、電磁界ソルバーとANSYS Electronics Desktop(2022 R2)の回路ソルバーを統合した協調解析手法を採用した。なお、電磁界シミュレーション単独手法に比べ、協調解析手法の計算効率は非常に高く、実証システム的设计パラメータを容易に最適化することができる特徴がある。考案されたメタサーフェス・フィルタは、WR284の標準寸法に基本的に準拠しつつ、2つの導波路に分割(具体的には、上部と下部のスペースに分割)したカスタマイズ方形導波管を用いて実験的にも評価された(図1下)。カスタマイズされた方形導波管は任意波形発生器(M9502A、Keysight Technologies社製)とオシロスコープ(Waverunner 9404M、Teledyne LeCroy社製)に接続することで、時間領域波形を観測した。

まず、周波数領域におけるメタサーフェスフィルタのシミュレーション結果を図2aにプロッ

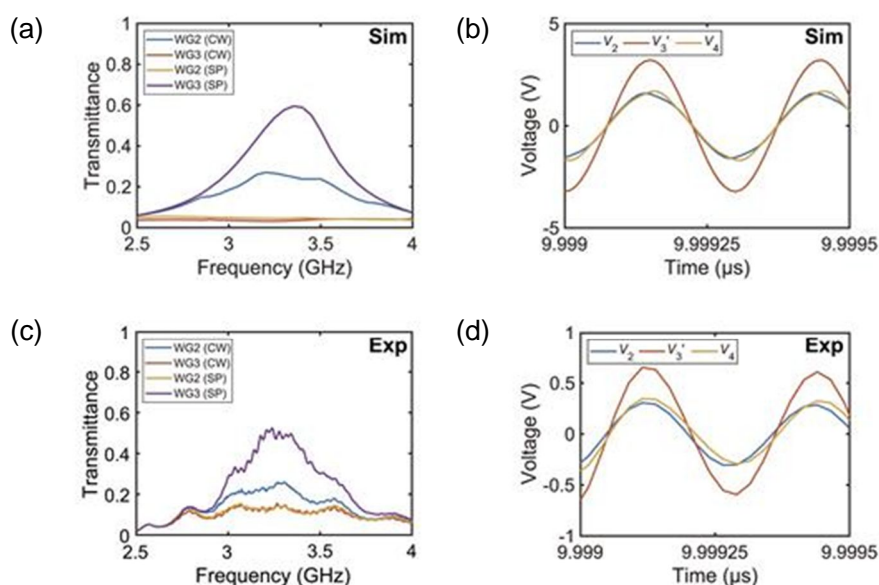


図2. 周波数領域(左)と時間領域(右)における数値解析(上段)ならびに測定結果(下段).

トした。この図から、特に 3.0 GHz から 3.5 GHz の間で、上で説明した波形選択透過メカニズムによって透過率が大きく変化していることがわかる。次に、3.35 GHz における時間領域プロファイルを計算したところ、図 2b のようになった。この結果によると、WG3 の遅延線後に得られる電圧波形、すなわち  $V_3'$  は、WG2 の波形、すなわち  $V_2$  に比べて大きな大きさを示した。これは  $V_3'$  が短パルスと CW の両方を含んでいるためである。しかしながら、SIC が  $V_3'$  を  $V_2$  で減算しているため、出力電圧  $V_4$  は  $V_2$  と同一となった ( $V_{pp}$  の偏差は 6 % 程度)。メタサーフェスユニットセルの存在により入射波の大きさは小さくなったものの、短パルスも CW も同じ正弦関数に基づいているため、図 2b に示すシミュレーション結果から、入射短パルスの復元に成功していることがわかる。さらに、提案したメタサーフェスフィルタを、図 1 の下部に示した測定系と測定試料の両方を用いて実験的に検証した (図 2c および d 参照)。このとき、 $R_c$  を 1 k $\Omega$  から 500  $\Omega$  に変更すると、 $V_2$  と  $V_4$  が良好に一致した ( $V_{pp}$  の偏差は 19 % 程度)。測定結果は数値解析結果と比べてわずかな差異を生じたものの、これはシミュレーションで十分に考慮されなかった回路寄生パラメータ等によるものと考えられる。しかしながら、この測定結果は、短パルスが CW と共に導波管に入射された場合でも、短パルスの波形を復元できることを裏付けている。

#### < 引用文献 >

1. W. Webb and L. Hanzo, Quadrature Amplitude Modulation, IEEE Press-John Wiley, 2004.
2. 総務省, R2 年情報通信白書.
3. R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, *Science*, 292, 5514, 77, 2001.
4. H. Wakatsuchi et al., *Physical Review Letters*, 111, 24, 245501, 2013.
5. Wakatsuchi et al., *Scientific Reports*, 5, 1, 9639, 2015.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ashif Aminulloh Fathnan, Haruki Homma, Shinya Sugiura, and Hiroki Wakatsuchi	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 15304
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 Daiju Ushikoshi, Riku Higashiura, Kaito Tachi, Ashif Aminulloh Fathnan, Suhair Mahmood, Hiroki Takeshita, Haruki Homma, Muhammad Rizwan Akram, Stefano Vellucci, Jiyeon Lee, Alessandro Toscano, Filiberto Bilotti, Christos Christopoulos, and Hiroki Wakatsuchi	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
1. 著者名 Fathnan Ashif Aminulloh, Takimoto Kairi, Tanikawa Mizuki, Nakamura Kazutomo, Sugiura Shinya, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 72
2. 論文標題 Unsynchronized Reconfigurable Intelligent Surfaces With Pulse-Width-Based Design	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TVT.2023.3284831	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 Takeshita Hiroki, Fathnan Ashif Aminulloh, Nita Daisuke, Nagata Atsuko, Sugiura Shinya, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 15
2. 論文標題 Frequency-hopping wave engineering with metasurfaces	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-44627-8	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 -

1. 著者名 Takimoto Kairi, Takeshita Hiroki, Fathnan Ashif Aminulloh, Anzai Daisuke, Sugiura Shinya, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 11
2. 論文標題 Perfect pulse filtering under simultaneous incidence at the same frequencies with waveform-selective metasurfaces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 81116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0161337	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 -

1. 著者名 Qian Yingjie, Cheng Yongzhi, Luo Hui, Chen Fu, Fathnan Ashif Aminulloh, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 7
2. 論文標題 Design of a Dual Band Waveform Selective Metasurface Absorber Based on the Combination of Two Resonator Structures Loaded with Nonlinear Circuits	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Theory and Simulations	6. 最初と最後の頁 2300590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adts.202300590	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 該当する

1. 著者名 Takeshita Hiroki, Nita Daisuke, Cheng Yongzhi, Fathnan Ashif Aminulloh, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 123
2. 論文標題 Dual-band waveform-selective metasurfaces for reflection suppression	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 191703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0167094	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 該当する

1. 著者名 Takimoto Kairi, Nakamura Kazutomo, Njogu Peter, Suzuki Kota, Sugimoto Masato, Fathnan Ashif, Kondo Takashi, Mori Masayuki, Anzai Daisuke, Wakatsuchi Hiroki	4. 巻 59
2. 論文標題 Inkjet printed intelligent reflecting surface for indoor applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electronics Letters	6. 最初と最後の頁 1~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/el12.13037	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 -

1. 著者名 Ino Jun, Wakatsuchi Hiroki, Sugiura Shinya	4. 巻 13
2. 論文標題 Noncoherent Reconfigurable Intelligent Surface With Differential Modulation and Reflection Pattern Training	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 656 ~ 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2023.3338489	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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 瀧本海里, 竹下紘基, 杉浦慎哉, 若土弘樹
2. 発表標題 波形選択メタサーフェスに基づいたパルス分割多重通信システムに関する基礎検討
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 2021年

1. 発表者名 A. A. Fathnan and H. Wakatsuchi
2. 発表標題 Controlling Beam Directions using Self-reconfigurable Time-varying Metasurfaces
3. 学会等名 XXXXVth URSI General Assembly and Scientific Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Takimoto, A. A. Fathnan, S. Sugiura, and H. Wakatsuchi
2. 発表標題 Passive Reconfigurable Intelligent Surfaces with Varying Electromagnetic Response in Accordance with the Pulse Width at the Same Frequency
3. 学会等名 The Seventeenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena - Metamaterials 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. A. Fathnan, H. Takeshita, D. Nita, S. Sugiura, and H. Wakatsuchi
2. 発表標題 Enabling Frequency-hopping Selectivity with Locally Self-tuned Metasurfaces
3. 学会等名 The Seventeenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena - Metamaterials 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Wakatsuchi
2. 発表標題 Additional Selectivity at the Same Frequencies with Waveform-Selective Metasurfaces and their Applications
3. 学会等名 The Seventeenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena - Metamaterials 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長屋健太郎, 杉浦慎哉
2. 発表標題 知的反射面を用いた広帯域シングルキャリア伝送における簡易位相シフト決定法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Phuc Viet Trinh, 杉浦慎哉
2. 発表標題 A Study on Secure RIS-Aided Wireless Communications over Generalized Millimeter-Wave Fading Channels
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024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
研究 分担 者	杉浦 慎哉  (Sugiura Shinya)  (30394927)	東京大学・生産技術研究所・准教授    (12601)	

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	The University of Nottingham			
イタリア	Roma Tre University			
中国	武漢科技大学			