

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05527

研究課題名(和文) 波形選択無線通信システム - 新規電磁界特性の融合

研究課題名(英文) Waveform-selective wireless-communication systems - integration of new electromagnetic property

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) 18,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年研究代表者らは人工周期構造メタサーフェスを用いて新たな電磁特性「波形選択性」を創出した。本研究では波形選択性の基礎特性を向上・拡張し、我々の生活で重要な役割を担う無線通信デバイスとして応用することを目指した。特に現実的な通信環境において電磁界は過渡的に変化することから、周辺電磁界に応じて波形選択性を制御可能なメタサーフェスの開発に焦点を当てた。

研究成果の概要(英文)：Recently, our research group has developed circuit-based metasurfaces that exhibit a new type of electromagnetic characteristics called waveform selectivity. In this study, we aimed at extending the fundamental capability of waveform selectivity so that it can be applied for wireless communication devices including antennas. Electromagnetic fields generally vary in a realistic communication environment. Hence, we particularly focused on developing the waveform selectivity that can be arbitrarily controlled in response to such transient external fields.

研究分野：電気電子工学

キーワード：メタマテリアル メタサーフェス

1. 研究開始当初の背景

【1. 背景】従来、自然界に存在する材料の入射波に対する電磁応答（透過や吸収など）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、メタサーフェス（図1）など「人工的に構築された波長よりも短い周期構造」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[参考文献 *Science*, 292, 77, *Science*, 334, 333]。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任意に作り出すことが可能になった。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、これまで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電磁特性は一定」と理解されており、同一周波数において異なる信号を識別する材料は存在しなかった。例外として非線形材料とともに構成される人工媒質は入力信号の強度に応じて電磁特性を変化可能であるものの、同一レベルでの識別は不可能であった[参考文献 *PRL*, 91, 3, 037401, *Nature*, 444, 597]。

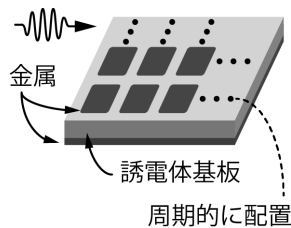


図1. メタサーフェス

【2. 研究代表者による取り組み】このような一般的な理解に対して、研究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）に応じて入射波の透過・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）。その結果、同一周波数信号でも「パルス幅」という新たな概念に基づいて選択的な電波信号の識別を実現した。この極めて特異な特性は高い注目を受け、研究成果は *Physical Review Letters* 誌で発表され、*Nature* 誌などでも紹介された。

2. 研究の目的

本研究では波形選択性の基礎特性を向上・拡張し、我々の生活で重要な役割を担う無線通信デバイスとして応用することを目指した（図3）。特に現実的な通信環境にお

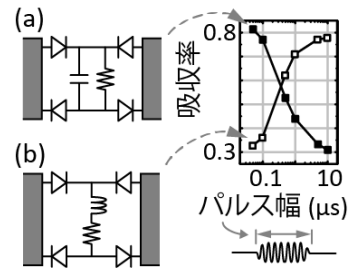


図2. 波形選択メタサーフェスの金属パッチ間に配置された回路構造とその吸収特性（周波数は4.2 GHzに固定）

- 1) 従来のアンテナ 2) 波形選択性の導入



図3. 通信応用のイメージ

いて電磁界は過渡的に変化することから、周辺電磁界に応じて波形選択性を制御可能なメタサーフェスの開発に焦点を当てた。

3. 研究の方法

【1. 原理】波形選択性の基本原理は次のとおりである。メタサーフェスはその金属周期構造に応じて入射波に対して強い共振現象を示す。この時、導電部（金属）には電荷が誘起され、入射波の周波数成分 f に応じてその表面を移動することになる。とりわけ、共振時には導電部間に正負の電荷が集中し、強い電界を発生させる。これをダイオードにより整流することで（図2参照）入射波のエネルギーは非常に多くの周波数成分（0, f , $2f$, $3f$, ...）へと変換される。ただし、4つのダイオードから構成されるダイオード・ブリッジを用いることで、大部分のエネルギーは周波数ゼロ成分へと変換される。この周波数に対するキャパシタおよびインダクタの時間領域応答を利用することで波形選択性を実現することができる。具体的にキャパシタと抵抗を並列に接続した場合、短いパルスのエネルギーを一時的にキャパシタに蓄え、抵抗にて消散することで、強い吸収特性を得ることができる。ただし、同一周波数でも連続波（Continuous Wave: CW）はキャパシタを完全に充電するため、このような強い吸収特性を得ることはできない。これに対して、インダクタと抵抗を直列に接続した場合、インダクタの起電力の存在によって短いパルスの流入は遮断されるため、吸収特性は限定的となる。しかしながら、この起電力は周波数ゼロ成分の影響によって次第に弱まることから、連続波のエネルギーは直列抵抗へと流入し、効率的に吸収されることになる。

以上から分かるように、これら回路定数は波形選択性の応答を決定することになる。特

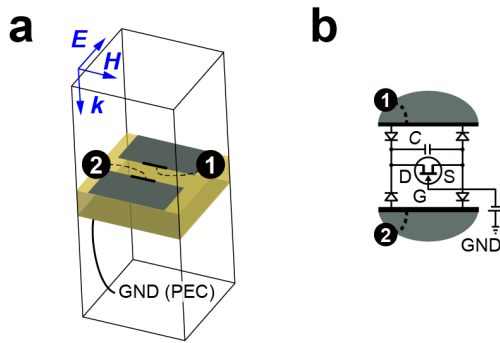


図4 波形選択メタサーフェスの周期ユニットセル。(a) 基本構造。(b) 抵抗素子をjFETと置換(参照: 図2a)

にここで焦点となった動的制御可能な波形選択性の実現に向けて、従来の抵抗素子に代わり、jFET (junction gate Field-Effect Transistor) を導入した(図4)。一般的にも知られるように、jFETはgateにかかるバイアスに応じて、drain-source間の電流値を変化させることができる。すなわち、gate電圧に応じ、drain-source間の抵抗成分を変化させることになる。したがって、最終的に波形選択性の制御につながると推察された。

【2. 数値解析手法】本研究では一般的に用いられる電磁界解析手法に代えて、協調解析(co-simulation)手法を用いて波形選択メタサーフェスを設計・評価した(図5)。この手法では電磁界解析において使用される全ての回路素子をlumped portへと置き換え、その後回路解析において実際の素子へと接続した。これによって、電磁界解析において直接回路素子を接続する場合と等価になるものの、計算時間を飛躍的に短縮し、設計パラメータの最適化ならびに本研究の進展に大きく貢献した。なお、本手法は具体的にAnsys社の電磁界シミュレータHFSSおよび回路シミュレータDesignerを用いた(Electronics Desktop R18)。パルス波の反射、透過、吸収率は入射波および散乱波の波形全体のエネルギーを比較することで算出した。一方、連続波では定常状態における数周期分のエネルギーを比較することで、これらの値を算出した。

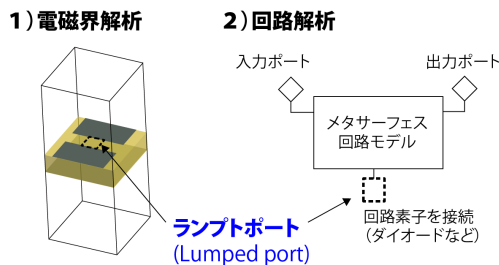


図5 協調解析手法の概略. 第一にlumped portとともに電磁界解析を行い、使用される回路素子はその後回路解析において接続.

【3. 測定手法】波形選択性の測定では同一周波数(厳密には同一励振周波数)においてパルス幅を変更することになる。通常パルス測定では信号発生器を用いるものの、広い周波数範囲において詳細な波形選択応答を観測するため、本研究では信号発生器(Anritsu社製MG3692C)に加え、パルス幅制御機能を有するベクトル・ネットワーク・アナライザ(Keysight Technologies社製N5249A)を一部使用した。ここで生成された波形は波形選択メタサーフェスの配置された導波管へと入射された。信号発生器を用いた場合の散乱波波形の観測にはオシロスコープ(Keysight Technologies社製DSOX6002A)を用いた。また、jFETの特性を測定するため、SMU(Source-Measure Unit、Keysight Technologies社製B2902A)を用いた。gate部への電圧の印加には直流電源(Keysight Technologies社製E3631A)が使用された。

4. 研究成果

まず、上記数値解析手法を用いて波形選択性を評価した結果を図6に示す。ただし、数値計算における安定性の問題などから、ここでは簡易的にjFETの代わりに抵抗値を変化させた抵抗素子を用いて評価した(既出図4b参照)。ここで、コンデンサの静電容量(同図中Cに該当)を1nF、抵抗値を100kと設定した時、図6aの結果を得た。すなわち、この波形選択メタサーフェスはパルス(50ns長)に対して3.2GHz付近で強い吸収特性を示し、同一周波数でも連続波に対しては限定

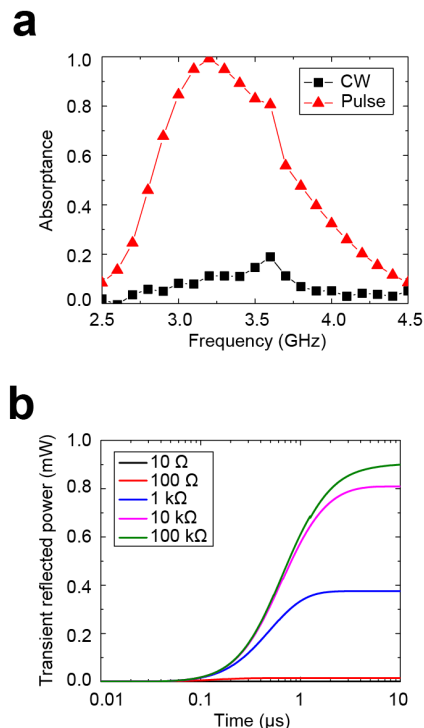


図6 数値解析結果。(a) 周波数領域における吸収特性と(b) 時間領域における過渡応答(周波数: 3.2 GHz)。

的な吸収特性を示した。この振る舞いは上述の動作原理より説明できる(3.1参照)。ここで、抵抗の役割を解明するため、図6bの通り、3.2 GHzにおいて抵抗値を変化させ、過渡的な反射電力を算出した。この図より、初期応答(0.1 μ s程度まで)においては限定的な反射電力となる一方、定常状態では抵抗値の増加に伴い反射電力は上昇することが分かった。これは初期応答では入射波の整流されたエネルギーをキャパシタへと充電し、後に抵抗にて消散できるためと説明できる。ただし、小さな抵抗値ではその後も効率的にこの吸収メカニズムを得られるものの、大きな抵抗値ではキャパシタが完全に充電されることになる。このため、限定的な吸収特性となり、大きな反射電力を示すことになったと考えられる。以上により、抵抗値を変化させることでパルスと連続波に対する吸収率の差異を制御できることが分かった。すなわち、抵抗値を十分に大きくすることで、両波形間の差異を増大させて波形選択性を発現できることが分かった(図6b中100kなど)。その一方で抵抗値を低下させることで、これらの差異を減少させ、波形選択性を抑制できることが分かった(同図中10、100など)。

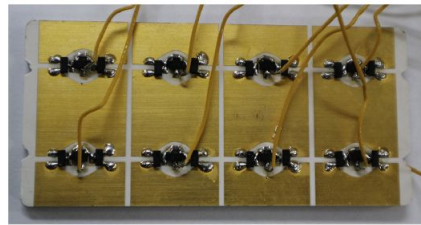
以上の数値解析結果を踏まえて、本研究ではjFETを用いた測定試料を製作し、その特性を図7のように測定した。なお、ここでは予めベクトル・ネットワーク・アナライザを用いることで、同試料の動作周波数を3.6 GHz付近と特定し、同周波数上において図7中の特性を観測した。図7aの通り、測定試料にはjFETのゲート端子へとワイヤを接続した。ここにかかるゲート電圧 V_g を変化させ、パルス波および連続波の反射波形を観測した結果をそれぞれ図7b、cに示す。まず、ゲートに電圧を印加しなかった場合($V_g=0.0$ V)、図6の数値解析から予測された通り、限定的な反射特性となった。これは上述のように両波形において効率的な吸収作用を得られたためである。しかしながら、ゲート電圧を-1.4 Vへと変化させ、drain-source間の電流値を抑制した所(すなわちdrain-source間の抵抗成分を増加させた所)、パルス波に対しては限定的な反射特性となり、連続波に対しては強い反射特性を示した。この測定結果も図6の数値解析結果同様、パルスに対しては強い吸収特性が得られ、一方連続波に対しては限定的な吸収特性となったためと考えられる。すなわち、実証実験においてもゲート電圧を制御することで波形選択性を任意に発現または消失できることを確認した。

5. 主な発表論文等

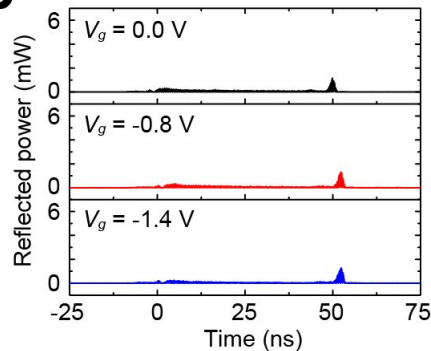
[雑誌論文](計5件)

[1] A. Li*, Z. Luo*, H. Wakatsuchi*, S. Kim*, and D. Sievenpiper, "Nonlinear, Active, and Tunable Metasurfaces for Advanced Electromagnetics Applications,"

a



b



c

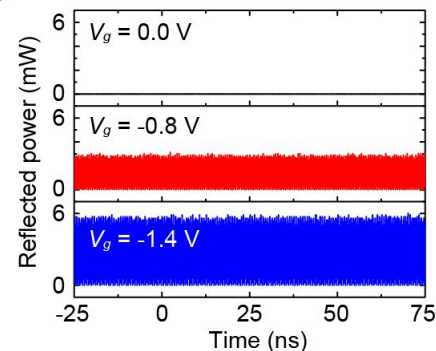


図7. 測定結果.(a)測定試料.ゲート電圧 V_g に対する(b)パルスおよび(c)連続波の反射特性.

IEEE Access, vol. 5, pp. 27439-27452, 2017 (*: equal contribution) (invited).

[2] H. Wakatsuchi, D. F. Sievenpiper, and C. Christopoulos, "Designing Flexible and Versatile Metamaterial Absorbers," *IEEE EMC Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 76-82, 2016 (invited).

[3] H. Wakatsuchi, F. Gao, S. Yagitani, and D. F. Sievenpiper, "Responses of Waveform-Selective Absorbing Metasurfaces to Oblique Waves at the Same Frequency," *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 31371, 2016.

[4] H. Wakatsuchi, D. Anzai, and C. Smartt, "Visualization of Field Distributions of Waveform-Selective Metasurface," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 690-693, 2016.

[5] H. Wakatsuchi, "Time-Domain Filtering of Metasurfaces," *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 16737, 2015.

〔学会発表〕(計7件)

[1] H. Wakatsuchi and D.F. Sievenpiper, "Waveform-Selective Scattering Control through Circuit-Based Metasurfaces at the Same Frequency," IEEE APS/URSI 2017, San Diego, US, July 2017.

[2] 牛越大樹, 浅野耕生, 若土弘樹, "開放空間における波形選択メタサーフェスの特性," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, vol. C-2-39, pp. 47, 東京, 2017年9月.

[3] 井手虹介, 牛越大樹, 浅野耕生, 石井智, 若土弘樹, "光に応じた波形選択メタサーフェスの制御," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, vol. C-2-40, pp. 48, 東京, 2017年9月.

[3] 浅野耕生, 牛越大樹, 若土弘樹, "波形選択メタサーフェスの電磁界干渉問題への応用," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, vol. C-2-41, pp. 49, 東京, 2017年9月.

[4] 牛越大樹, 浅野耕生, 三治健一郎, 池田正和, 安在大祐, 若土弘樹, "2.4GHz帯における波形選択メタサーフェスの開発," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, vol. C-2-45, pp. 55, 札幌, 2016年9月.

[5] 浅野耕生, 牛越大樹, 三治健一郎, 池田正和, 安在大祐, 若土弘樹, "波形選択メタサーフェスの動作周波数と設計パラメータ," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, vol. C-2-46, pp. 56, 札幌, 2016年9月.

[6] 若土弘樹, "波形選択メタサーフェスによる散乱パラメータ操作," 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, vol. C-2-47, pp. 57, 札幌, 2016年9月.

[7] H. Wakatsuchi and C. Smartt, "Field Visualisation of waveform-selective metasurfaces," *Metamaterials'2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*, Oxford, UK, 7-10 Sept. 2015.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若土 弘樹 (WAKATSUCHI, Hiroki)

名古屋工業大学 大学院工学研究科

電気・機械工学専攻 准教授

研究者番号: 00725278