

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630175

研究課題名(和文)新しい電磁界特性の創出：メタサーフェイスによる波形選択性

研究課題名(英文)Creating a new kind of electromagnetic characteristics: waveform selectivity through 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)・助教

研究者番号：00725278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では人工周期構造であるメタサーフェイスを用いて新たな電磁界特性「波形選択性」の創出を目指した。なお、研究代表者の先行研究では同一周波数でもショートパルス吸収し、ロングパルスを透過する特性を開発していた。本研究ではこれとは対照的にロングパルスをより強く吸収する特性を実現した。さらに、中間の任意パルスのみ選択的に透過または吸収する波形選択性を開発した。

研究成果の概要(英文)：This study developed artificially engineered periodic structures, the so-called metasurfaces, together with circuit elements including schottky diodes, which led to creating a new kind of electromagnetic characteristics, namely, waveform selectivity. As a previous study we had reported metasurfaces that absorb short pulses, which are in general typical waveforms of electromagnetic noise, while transmitting long pulses or continuous waves even at the same frequency. In contrast, this study developed metasurfaces that absorb long pulses more effectively than short pulses. Additionally, we realised other types of waveform selectivities that allowed us to absorb or transmit arbitrary pulses in between, while both of short and long pulses were respectively transmitted and absorbed. As a consequence, these new characteristics are expected to give us an additional degree of freedom to control electromagnetic waves and sense different waves even at the same frequency.

研究分野：電気電子工学

キーワード：メタマテリアル メタサーフェイス 周波数 パルス

1. 研究開始当初の背景

【1. 背景】近年の無線通信分野における大きな問題の1つとして周波数資源の枯渇が知られている。すなわち、通信に利用可能な周波数帯域(とりわけマイクロ波帯)は既に様々な通信機器に占有されており、新たなアプリケーションに対する周波数帯の割り当てが難しくなっている。この問題に対して、これまでの研究による対策はミリ波帯などの新たな周波数帯域の開拓のみに限定されてきた。

【2. 研究代表者による取り組み】一方、研究代表者らはメタサーフェスと呼ばれる「二次元上に人工的に構築された電波波長よりも短い周期構造」(図1)を用いて、非線形に表面電流を吸収できる原理を開発した[H. Wakatsuchi et al., *Phys. Rev. Lett.*, 111, 245501, 2013 および *Electron. Lett.*, 49, 1530-1531, 2013]。すなわち、アンテナ通信に使用される微弱信号を透過しながら、機器の動作に影響を及ぼさず高強度の表面電流のみ吸収した。さらに、開発されたメタサーフェスは「同一周波数でも」パルス波を吸収し、連続波を透過(図2)する「波形への依存性」を示すことが分かった。この特性は異なる励振時間の信号を抽出できるため、現在占有されている周波数帯域であっても新たなアプリケーションに利用可能であり、周波数資源の枯渇問題の解決策として期待される。ただし、任意に波形を選択する原理を確立するには、連続波のみを吸収する特性、特定の励振時間のパルスのみ透過または吸収する特性の開発が必須となる。

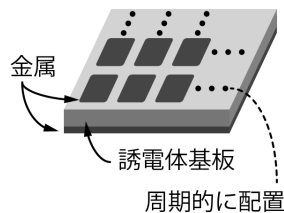


図1. メタサーフェス

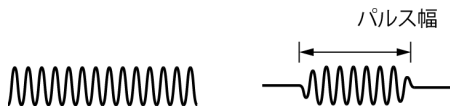


図2. (左) 連続波と(右) パルス波

2. 研究の目的

そこで、本研究では波形選択性の原理を確立するため、以下2点の達成を目指した。

1. 連続波を吸収し、パルス波を透過するメタサーフェスの開発
2. 任意の励振時間を持つパルス波のみ透過または吸収するメタサーフェスの開発

3. 研究の方法

波形選択性は以下の点に着目して開発された。まず、ダイオードによって整流された正弦波信号に対して、キャパシタやインダクタは図3のような時間領域応答を持つ。これはキャパシタは一定の時間からそれ以上エネルギーを蓄えられないためであり、インダクタは最初に強い起電力を生じて信号の進入を防ぐためである。

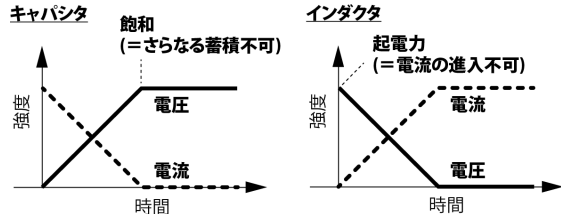


図3. 整流された正弦波信号に対するキャパシタとインダクタの時間応答

すなわち、ここから

- ・キャパシタは連続波を遮断
- ・インダクタはショートパルス遮断

ということが言える。この特性に加えて、図4のように抵抗と組み合わせた回路をメタサーフェスのパッチ間に配置することによって、パルスもしくは連続波のどちらかを吸収できると予測される(キャパシタに関しては実証済み[H. Wakatsuchi et al., *Phys. Rev. Lett.*, 111, 245501, 2013])。さらに、キャパシタ、インダクタの両方を組み合わせることにより、任意のパルス幅(特定の波形)のみ透過または吸収できると見込まれる。

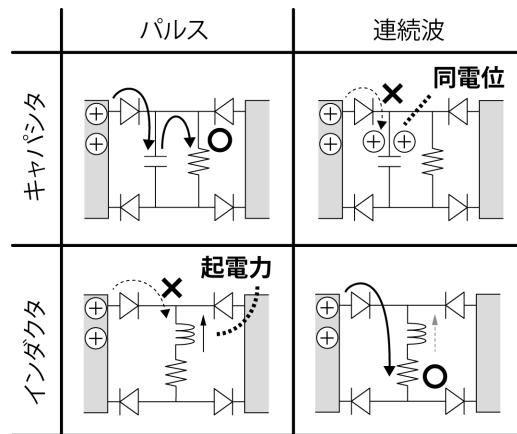


図4. メタサーフェスのパッチ間に組み込まれる回路の例と期待される吸収効果

このような吸収原理に基づいたメタサーフェスを数値解析により評価した(実験結果は[H. Wakatsuchi et al., *Sci. Rep.*, 5, 9639, 2015]を参照)。ここでのシミュレーションは電磁界解析シミュレータ HFSS を回路解析シミュレータ Designer と組み合わせた協調解析により行われた(図5)。この手法で

は最初に電磁界解析においてメタサーフェイスの散乱パラメータを算出し、その後、散乱パラメータは回路シミュレータにおいて回路モデルとして使用された。なお、回路素子であるダイオード、キャパシタ、インダクタは電磁界解析でランプト・ポートに置き換えてモデリングされ、これらの素子は回路解析において実際に挿入された。その結果、仮想的にこれらの回路素子を電磁界解析モデル上で実装したことと等価になるものの、計算時間は電磁界解析単体の場合に比べて飛躍的に短縮された。

ステップ①

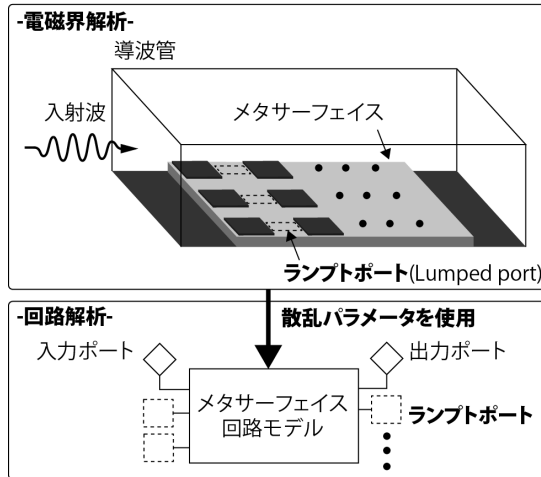


図5. 数値解析手法

4. 研究成果

【1. 連続波の吸収】従来のキャパシタを用いたメタサーフェイス（以下、キャパシタ型メタサーフェイス）の回路構造に対して、新たにインダクタを用いたメタサーフェイス（以下、インダクタ型とする）の吸収特性を図6 a, b に示す。なお、ここで周波数は4.2 GHz に固定されており、パルス幅（励振時間）をスイープしたところ、図6 a2, b2 の黒線のような特性を得ることができた。この結果から分かるように、従来とは異なり、同一周波数でも連続波（ロング・パルス）に対してより強い吸収特性を示す波形選択性を実現できた。なお、この構造の周波数特性や実験結果は研究代表者の論文[H. Wakatsuchi et al., *Sci. Rep.*, 5, 9639, 2015]から確認できる（詳細な構造寸法や材料についても記述）。

なお、この結果で重要となってくるのが時定数である。時定数はそれぞれのメタサーフェイスに用いられた抵抗値  $R$ 、インダクタンス  $L$ 、キャパシタンス  $C$  から計算され、図6 a2, b2 の黒線における吸収率が飽和するパルス幅を決定する（具体的にはキャパシタ型では  $\tau = RC$ 、インダクタ型では  $\tau = L/R$ ）。すなわち、図6 a2, b2 内の赤線、青線のように時定数を増加または減少させることで元の吸収特性の曲線を全体的に右または左へと容易にシフトすることができる。

【2. 任意中間パルスの透過および吸収】さ

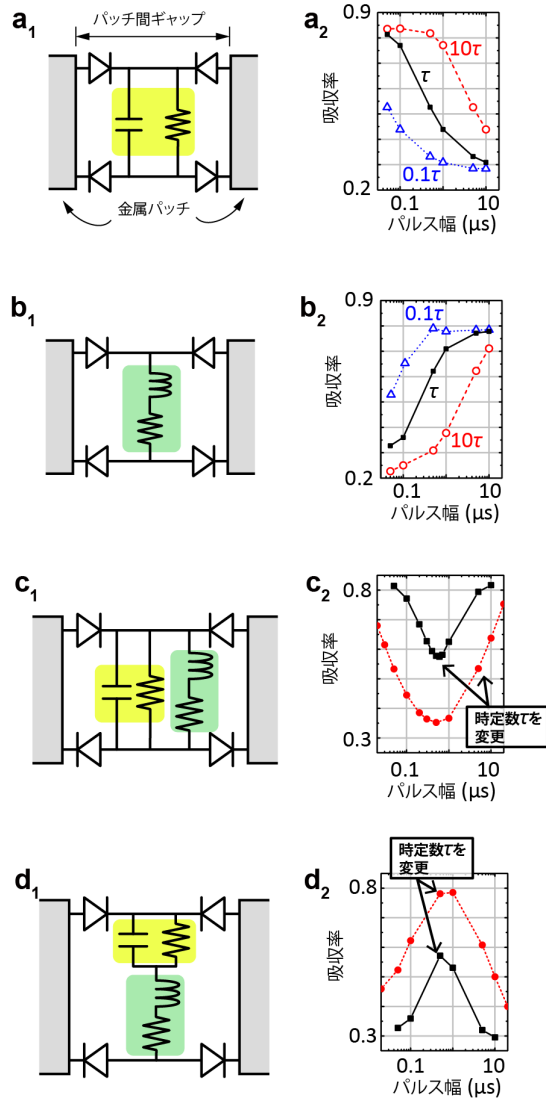


図6. (a) キャパシタ型および(b) インダクタ型波形選択メタサーフェイスの金属パッチ間(図1参照)で用いられた回路構造とその吸収特性(周波数は4.2 GHz). 時定数を変更することで(使用される回路素子を変更することで)容易に特性を変化可能。(c) 並列型および(d) 直列型波形選択メタサーフェイスで用いられた回路構造とその吸収特性. ここではキャパシタ型およびインダクタ型で用いられた構造を組み合わせ使用. 同様に時定数を変化させることで吸収特性の変化量を操作可能.

らにキャパシタ型メタサーフェイスとインダクタ型メタサーフェイスで用いられた回路構造を組み合わせることで、特定の(中間の)パルスのみ選択的に吸収または透過できるメタサーフェイスを開発した。具体的には両回路構造を図6 c1, d1のように並列および直列に接続した(以下、それぞれ並列型および直列型メタサーフェイス)。この内、並列型メタサーフェイスでは図6 c2 の黒線でプロットされたように、ショート・パルスでキャパシタの回路部分で吸収させ、ロング・

パルスをインダクタの回路部分で吸収させることで、ショート・パルスおよび連続波の両方に対して強い吸収特性を得た。しかしながら、中程度のパルス幅信号に対しては吸収率が低下することを確認した(例えば  $0.5 \mu\text{s}$  付近)。この理由としては、このパルス幅レンジにおいて、それぞれ独立したキャパシタ型メタサーフェイスとインダクタ型メタサーフェイスが比較的弱い吸収特性を示すためである。また、図 6 a2, b2 で示されたように時定数を変更することでそれぞれの構造の波形選択特性を制御できるため、図 6 c2 中の赤線で示されたように、より大きな吸収率変化を実現できた。

一方、直列型メタサーフェイスでは、インダクタおよびキャパシタの回路部分によってそれぞれショート・パルス、ロング・パルスの流入を遮断することから、ショート・パルスおよびロング・パルスの両方に対して限定的な吸収特性を示した(図 6 d2 内の黒線参照)。ただし、中程度のパルス幅では一時的に吸収特性が上昇した( $0.5 \mu\text{s}$  付近)。これはこの領域においては独立したキャパシタ型およびインダクタ型メタサーフェイスが相対的に高い吸収特性を持つためである。なお、並列型メタサーフェイスと同様に時定数を変化させることで吸収特性の変化量をより大きくすることができた(図 6 d2 内の赤線参照)。

【3. 自由空間電波に対する評価】上記の評価では波形選択性を金属表面を伝播する表面波(図 7 a)に対して評価したものであった。一方、ここでは垂直入射電波(図 7 b)

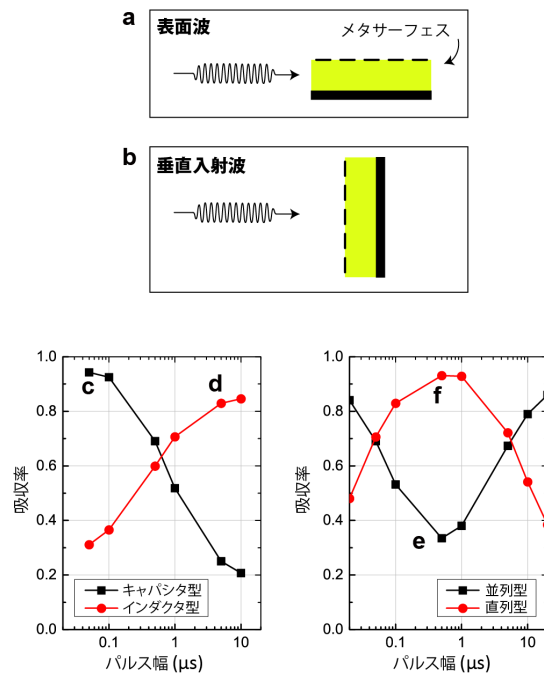


図 7 .(a, b) 表面波と垂直入射波 . (c-f) 垂直入射に対する各波形選択メタサーフェイスの吸収特性 .

に対して評価した結果を図 7 c - f に示す。この図からも確認できるように波形選択性は表面波だけでなく、自由空間から到来するような垂直入射波に対しても実現可能であり、より広範囲の新規マイクロ波アプリケーションの創出に貢献できると期待される。

### 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 5 件)

[1] H. Wakatsuchi, D.F. Sievenpiper, and C. Christopoulos, "Designing flexible and versatile metamaterial absorbers," *IEEE EMC Magazine* (招待論文) (採録決定) .

[2] H. Wakatsuchi, D. Anzai, and Chris Smartt, " Visualization of field distributions of waveform-selective metasurfaces," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 15, 690-693, 2016.

[3] H. Wakatsuchi, "Time-domain filtering of metasurfaces," *Sci. Rep.*, 5, 16737, 2015.

[4] H. Wakatsuchi, " Waveform-selective metasurfaces with free-space wave pulses at the same frequency," *J. Appl. Phys.*, 117, 164904, 2015.

[5] 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. (読売新聞 2015 年 6 月 1 日朝刊を含む新聞 4 誌で紹介)

[学会発表](計 3 件)

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

[2] 若土弘樹, " 波形選択メタサーフェス ", 電子情報通信学会 総合大会, B-1-118, p. 118, 草津, 2015 年 3 月 .

[3] H. Wakatsuchi, J.J. Rushton, S. Kim, and D.F. Sievenpiper, "Metasurfaces to select waveforms at the same frequency," *8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics - Metamaterials2014*, Copenhagen, Denmark, Aug. 2014.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

名称：フィルタ  
発明者：若土弘樹  
権利者：名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2014-154363  
出願年月日：2014年7月30日  
国内外の別：国内

名称：波形選択フィルタを用いた通話システム、通信端末  
発明者：安在大祐、若土弘樹  
権利者：名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2014-257559  
出願年月日：2014年12月19日  
国内外の別：国内

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔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・若手研究イノベータ養成  
センター・テニュアトラック助教

研究者番号：00725278

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：