# 新規波形選択マテリアルの多機能化

研究代表者 若 土 弘 樹 名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授

#### 1 序論

現代生活ではスマートフォンなどの無線通信アプリケーションは欠かすことのできない役割を果たしてい る.しかしながら,通信機器の広い普及に伴い,不要電波によって引き起こされる電子機器の誤作動や故障 など、いわゆる電磁干渉問題は現代における重要課題の一つとして認識されている. このような電磁干渉問 題の一般的な解決手法としては電波吸収体の活用が知られている.電波吸収体は到来する電波のエネルギー を熱へと変換し、効率的に消散・吸収することで不要な反射波を抑制し、通信環境を良好に保つことに貢献 している. ただし, 電磁材料の観点から, 自然界に存在する材料は異なる電波をその周波数成分の違いに応 じて識別し、異なる振舞い(例えば、強い吸収特性)を示すことが可能であったものの、同一周波数上での 異なる電波を選別することは容易ではなかった.一方、近年研究開発の進められる人工材料メタサーフェス [1, 2]は電波波長よりも短い金属の周期構造によって構成され、周期構造の応答によって電磁特性を決定で きるため、所望の電磁特性を容易に設計できるようになった. さらに、メタサーフェスの特性は非線形性を 導入することで更に自由度を高められることが知られている.特に、ダイオードを含む回路素子から構成さ れた波形選択メタサーフェス[3, 4]は従来見分けることのできなかった異なる同一周波数電波を波形,すな わちパルス幅に基づいて識別し、選択的に吸収できることが報告された.したがって、この「波形選択性」 を利用することで、同一周波数上で発生する電磁干渉問題について、不要電磁ノイズをパルス幅に応じて抑 制し、良好な通信環境の設計に貢献できると期待されていた.しかしながら、実際の通信環境においては複 数の異なる周波数帯の電波が同時に飛び交うことが一般的であるものの、従来型波形選択メタサーフェスの 動作は1つの周波数帯にのみ限定されていた.そこで,本研究では複数周波数帯に渡り応答できる波形選択 メタサーフェスの新たな動作メカニズムの実現を目指した。特に本報告では2つの周波数帯で動作可能なデ ュアルバンド波形選択メタサーフェスについて紹介する.

### 2 材料・理論・方法

本研究で用いられた波形選択メタサーフェスは誘電体基板上に周期的に配置された金属パッチとそのギャップ間に配置された回路,底面のグランド(GND)板から構成された(図 1a).従来の波形選択メタサーフェスの動作はその設計パラメータから1つの周波数帯に限られていたものの,本研究では異なる動作周波数を持つメタサーフェスの周期ユニットセルを組み合わせることで,二つの周波数帯で独立して動作することのできる波形選択メタサーフェスを設計した.なお,波形選択メタサーフェスの基本動作原理は以下の通りである.波形選択メタサーフェスに電波が照射されると,その金属パッチには電荷が誘起され,金属パッチ間の回路素子へと流入する.この時,流入電荷は4つのダイオードから構成されるダイオードブリッジによって全波整流される.このため,周波数成分fを持つ入射波は多くの周波数成分へと分解されるものの,大部分のエネルギーは周波数ゼロ成分へと変換される.波形選択性はこの周波数ゼロ成分と、キャパシタやインダクタなどの時間応答を組み合わせることによって実現される.

具体例として、波形選択メタサーフェスに異なるパルス幅の電波が照射された際の応答を以下の図 1b に 示す.ダイオードブリッジ内にキャパシタと抵抗が並列に接続されたキャパシタ型波形選択メタサーフェス (図 1b, Capacitor-based) に対して、パルス幅の短い入射波(Short pulse:ショートパルス)が照射された 場合、誘起された電荷はキャパシタに蓄えられ、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、その結果強い吸収特性を示すことになる.一方、同一周波数でもパルス幅の長い入射波(Long pulse:ロ ングパルス)や連続波(Continuous wave:CW) に対しては、キャパシタが完全に充電されるため、抵抗部へ の電荷の流入は限定的となり、吸収特性は抑制されることになる.対照的にダイオードブリッジ内にインダ クタと抵抗が直列に接続されたインダクタ型波形選択メタサーフェス(図 1b, Inductor-based) では、ショ ートパルスが照射された場合、インダクタの起電力により誘導電荷の流入は抑制されるため、限定的な吸収 特性となる.しかしながら、連続波が照射された場合、インダクタの起電力は時間の経過とともに徐々に弱 まることになる.このため、抵抗へと電荷が流れ込み、エネルギーが消散されることから、強い吸収特性を



図1. (a) 波形選択メタサーフェス. (b) パルス幅に応じたキャパシタ型波形選択メタサーフェスとインダクタ型波形選択メタサーフェスの応答.

示すことになる.

ここで,波形選択メタサーフェスの動作周波数はその構造(具体的には基板厚みや金属パッチの形状)等に依存するインダクタンス成分とキャパシタンス成分によって決定される.例えば,入射波が図2のような一般的なメタサーフェス(回路なし)へと照射された場合,誘電体基板を通り,底面のGND板で反射されることから,誘電体基板内の位相遅れをインダクタンス成分Loとしてみなすことができる(図2a)[5].加えて,金属パッチ間のギャップ部に電荷が集中することからこれをキャパシタンス成分Coとして表すことができる(図2b)[6].さらに,入射波のエネルギーを消散・吸収するためにギャップ部へと抵抗Roを接続した場合,メタサーフェスは図2cのような簡易等価回路によって表すことができる.したがって,メタサーフェスのアドミッタンスFは次のようになる:

$$Y = \frac{1}{R_0} + j\left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_0}\right). \tag{1}$$

ただし,  $\omega = 2\pi f$  とし, fは周波数とする. メタサーフェスの動作周波数fにおいて, この並列回路は共振現象を示し, アドミッタンスの虚数成分B は0となるため,

$$B = \omega C_0 - \frac{1}{\omega L_0} = 0 \tag{2}$$

となる. また,  $\omega > 0$ であることから

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \tag{3}$$

となる.よって、メタサーフェスの動作周波数fは以下の式(4)のように表すことができる:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}}.\tag{4}$$

この式から、このキャパシタンス成分 C<sub>0</sub>やインダクタンス成分 L<sub>0</sub>を変化させることにより、任意の周波数f で動作するメタサーフェスを設計できることが分かる.ただし、以下では周期構造によって決定される C<sub>0</sub>お よび L<sub>0</sub>を固定し(すなわち周期構造の寸法を固定)、代わりに金属パッチ間にキャパシタを接続することに よって動作周波数の操作を図った.すなわち、この時のメタサーフェス全体の簡易等価回路は以下の図 2d の ように表すことができる.つまり、パッチ間に追加のキャパシタンス成分 C<sub>add</sub>を加えた場合のメタサーフェ



図2. (a)位相遅れによるインダクタンス成分と(b)金属パッチによるキャパシタンス成分. (c)メタサ ーフェスの簡易等価回路. (d)キャパシタをメタサーフェスに接続した場合の簡易等価回路.

スの動作周波数は式(4) と同様に導出すると、以下の式(5)のように表され、低周波数側へとシフトすること がわかる:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_0 + C_{add})}}$$
(5)

このように低周波数帯で動作するメタサーフェスと通常のメタサーフェス(周波数fで動作)の周期ユニット セルを図 3a のようにそれぞれ1つずつ配置することで,2つの周波数帯において動作できることが知られ ている.さらに本研究では、金属パッチ間に波形選択性に必要な回路構造を接続することで波形選択性を2 つの周波数帯において実現できると予測した.

このモデルの吸収特性を評価するため、本研究では ANSYS 社の Electronics Desktop (R18.1)における電磁 界シミュレータ(HFSS) と回路シミュレータ(RF option) を統合した協調解析手法を用いた.ここでは最初 に電磁界シミュレータにおいて図 3a のモデルの電磁界計算を行った.このモデルに周期境界条件を与える ことで、二次元平面上において図 3a の構造が仮想的に無限に広がる構造を模擬した.なお、入射波は上面に 配置された Floquet port から照射された.また、重要な点として、電磁界解析では全ての回路素子を取り除 き、Lumped port へと置き換えた.これら回路素子は後の回路解析(図 3b)において Lumped Port へと接続 することで、電磁界解析において直接これらの素子を接続することと等価となる.ただし、回路解析におい て評価することで、計算効率は飛躍的に向上するため、波形選択メタサーフェスで用いられる寸法等の最適 化にかかる時間の大幅な短縮に貢献した.また、回路シミュレータでは吸収特性を評価するため、入出力ポ



図3.(a)周期ユニットセルを2 個配置したモデル及びその金属パッチ間に配置される回路構造.(b) 回路シミュレーションモデル.

ートの前に電圧計と電流計を接続した.これらの値を掛け合わせることで、入射電力 $P_i$ 、反射電力 $P_r$ を算出し、そこから入射エネルギー $E_i$ 、反射エネルギー $E_r$ ならびに吸収率Aを求めた.具体的には、ショートパルス(50 ns 長に固定)を照射した際の $E_i$ 、 $E_r$ 、Aは次式より算出した:

$$E_i = \int_{t_1}^{t_2} P_i dt, \tag{6}$$

$$E_r = \int_{t_1}^{t_2} P_r dt,\tag{7}$$

$$A = 1 - \frac{E_r}{E_i}.$$
(8)

ただし,  $t_1 = 0 \text{ ns}, t_2 = 100 \text{ ns}$  とし, これらの算出には時間領域応答を観測するために広く利用される過渡解析を用いた. 一方, 連続波を照射した際の入射及び反射エネルギーは効率的に定常状態での時間領域応答を求めるため, Harmonic Balance 法を用いた. また,本研究では定常状態における入射電力 $P_i$ 及び反射電力 $P_r$  を 2 周期分積分することにより $E_i$ ,  $E_r$ , Aを算出した. すなわち,

$$E_i = \int_{t_3}^{t_4} P_i dt, \tag{9}$$

$$E_r = \int_{t_3}^{t_4} P_r dt, \tag{10}$$

$$A = 1 - \frac{E_r}{E_i} \tag{11}$$

とし、 $t_3$ は定常状態における任意時間、 $t_4 = t_3 + 2/f$ , fを励振周波数とすることで2周期分の時間領域応答を算出した.

#### 3 結果

設計した波形選択メタサーフェス(図 3)にショートパルス,連続波を照射した際の吸収率をそれぞれ以下 の図 4a, b に示す.入射電力を-20 dBm とした場合,両波形において 2.4 GHz (以下低周波側) 及び 3.5 GHz (以 下高周波側) 付近で僅かな吸収特性を観測した.なお,この入力レベルではダイオードの立ち上がり電圧を十 分に超える電圧をパッチ間へと印加できないことから,ダイオードブリッジ内の抵抗によるエネルギーの消 散,吸収は行われていないと考えられる.すなわち,基板損失によりエネルギーが僅かに消散されただけと 推測される.次に入力レベルを 0 dBm まで上昇させることで,低周波,高周波側の吸収率は 0.4 以上増加す ることが確認された.これはダイオードの立ち上がり電圧を超える入射電力が照射され,波形選択性の効果 が現れ始めたためと考えられる.よって,低周波側で動作するキャパシタ型波形選択メタサーフェスはショ ートパルスに対して強い吸収特性を示した.しかしながら,高周波側では波形間の差異,すなわち波形選択 性の効果は限定的となった.これはユニットセル間におけるカップリング等の影響が生じ,本来動作しない ユニットセルの金属パッチ上に電荷が誘起されたためと考えられる.以上のことから,低周波側においては 波形選択性が確認された一方,高周波側では独立的に波形選択性を制御できていないと結論付けられた.

ここで,高周波側で動作する波形選択メタサーフェスの周期ユニットセル数を相対的に増やすことで特性 の改善を図った.これにより、本来動作しないキャパシタ型波形選択メタサーフェスの影響が弱まり、高周 波側で意図した特性を得られるものと考えた.具体的には、図 3a の 2 つの周期ユニットセルに周期ユニッ トセルを 1 つ追加し、Lumped port 部分には高周波側で動作するインダクタ型回路を配置した(図 4c).な お、以下では波形選択性の効果が最も得られた入射電力 0 dBm のみを用いて解析した.

その結果,図4dに示す通り、低周波側においては、図4a,bと同様にショートパルスに対して強い吸収特性が確認された.また、連続波には限定的な吸収特性を示すことが分かった.一方、高周波側においては、 波形間の差異は観測されたものの、その大きさは未だ限定的であることが確認された.すなわち、このモデ ルでは十分な効果を得られていないことから、同様の方法で更なる改善を図った.

具体的には図 5a のように、高周波側で動作する周期ユニットセルをさらに1つ追加した.その計算結果 を図 5b に示す.この図から、低周波側ではショートパルスには強い吸収特性を示し、連続波には限定的な



### 図4.図3のモデルに(a)ショートパルスと(b)連続波を照射した際の吸収率.(c)周期ユニットセル にインダクタ型波形選択メタサーフェスの周期ユニットを追加した際のモデルと(d)その吸収特性.

吸収特性を示すことが分かった.一方,高周波側ではショートパルスには限定的な吸収特性を示し,連続波 には強い吸収特性を示すことが分かった.また,図5bの結果をログスケールでプロットしたものを図5c に示す.この結果から,低周波側および高周波側ともに各波形間において10dB以上の波形選択性の効果を 確認することができた.以上のことから,低周波側ではキャパシタ型波形選択メタサーフェス,高周波側に おいてはインダクタ型波形選択メタサーフェスの特性が確認され,2つの周波数帯において動作可能なデュ アルバンド波形選択メタサーフェスを実現することができた.

さらに、本研究では独立的に波形選択性の効果を操作できることを確認するため、ダイオードブリッジ内 の回路を入れ替えたモデルを評価した.すなわち、キャパシタ型波形選択メタサーフェスの3つの周期ユ ニットセルと、キャパシタを接続したインダクタ型波形選択メタサーフェスの1つの周期ユニットセルを周 期的に配置したモデル(図5d参照)についても同様に吸収率を算出した.その計算結果(図5e,f)から、 低周波数側ではショートパルスには限定的な吸収特性、連続波には強い吸収特性を示すことが分かった.一 方、高周波側ではショートパルスには強い吸収特性、連続波には限定的な吸収特性を示した.なお、ここで も低周波側、高周波側ともに各波形間において10 dB 以上の波形選択性の効果を観測することができた (図5f 参照).以上のことより、回路構造を入れ替えた場合においても、2つの周波数帯域において異なる 同一周波数電波をパルス幅に応じて独立的に操作できることが確認された.

### 4 結論

本研究では、複数周波数帯において動作可能な波形選択メタサーフェスの開発を最終目標として、本報告では2つの周波数帯で動作するデュアルバンド波形選択メタサーフェスを設計し、数値解析を用いて吸収特性を評価した.ここでは最初に2.4 GHzにおいて動作するキャパシタ型の周期ユニットセルと3.5 GHzにおいて動作するインダクタ型の周期ユニットセルをそれぞれ1つずつ周期的に配置したモデルを用いて、連続波



図 5. (a) 図 4c の構造にさらに周期ユニットセルを追加したモデル(図 4d 参照). (b, c) 吸収特性. (d) 回路構造を入れ替えたモデルと(e, f) その吸収特性.

とショートパルスに対する吸収特性を計算した.その結果,カップリング現象により各々の周波数帯で独立 した動作を得ることはできなかった.そこで,3.5 GHz側で動作する周期ユニットセルと2.4 GHz側で動作す る周期ユニットセルの数を3:1とし,高周波側における動作を相対的に強めた所,それぞれの周波数帯で独 立した波形選択性を実現することができた.なお,インダクタ型とキャパシタ型の回路構造を入れ替えた場 合においても,独立した動作を観測することができた.本研究では2つの周波数帯における波形選択性の動 作メカニズムについて紹介・提案したものの,同様の手法を用いることでさらに多くの帯域において波形選 択性を実現できると考えられる.また,マルチバンドで動作する波形選択メタサーフェスを応用すること で,複数周波数帯にまたがる通信ネットワークにおいて,異なる電波を波形に応じて同時に制御できるよう になると考えられる.これにより,同一周波数で発生する電磁干渉問題を複数の帯域に渡り,同時に抑制で きる新たな解決手法として活用が期待され,良好な通信環境の設計に貢献できると考えられる.

## 【参考文献】

- D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. Nemat-Nasser, C. Syrus, S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol.84, pp. 4184, 2000.
- [2] D. F. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez Broas, N. G. Alexopolous, E. Yablonovitch, "Highimpedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2059-2074, 1999.
- [3] H. Wakatsuchi, S. Kim, J. J. Rushton, and D. F. Sievenpiper, "Waveform-dependent absorbing metasurfaces," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, pp. 245501, 2013. 30
- [4] H. Wakatsuchi, D. Anzai, J. J. Rushton, F. Gao, S. Kim, and D. F. Sievenpiper, "Waveform selectivity at the same frequency," *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 9639, 2015.

- [5] O. Luukkonen, F. Costa, R. Simovski, and S. A. Teretyakov, "A thin electromagnetic absorber for wide incidence angles and both polarizations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, pp. 3119-3125, 2009.
- [6] D. F. Sievenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. California, Los Angeles, CA, 1999.

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Waveform Selective Surfaces		(under review)
NumericalDemonstrationofNon-ReciprocalWaveform-SelectiveMetasurfaces		(in preparation)
Design of Dual-Band Waveform-Selective Metasurfaces	Progress In Electromagnetics Research Symposium	August 2018 (accepted)

〈発表資料〉