

研究終了報告書

「電磁材料に基づく同一周波数上での新規分散処理技術の開拓」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：若土 弘樹

1. 研究のねらい

本研究では近年研究代表者らによって世界で初めて報告された電磁材料・波形選択メタサーフェスを用いることで、異なる同一周波数電波を新概念「パルス幅」に基づいて分散処理できる技術を開拓した。これによってソフト側だけでなく、材料・デバイスなどハード側においても電波を操作する自由度が高まり、将来的にはソフトとハードと協調的に分散処理性能を未知のレベルまで引き上げることに貢献できると期待される。提案研究は1) 基礎材料・理論開発フェーズ、2) デバイス開発フェーズ、3) システム開発フェーズから構成され、電磁材料の特性や理論に関わる基礎開発から、同材料に基づいたデバイスやシステムへの応用まで展開する計画であった。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は1) 基礎材料・理論開発フェーズ、2) デバイス開発フェーズ、3) システム開発フェーズにおいて以下の主たる成果を獲得した。

1) 理論開発フェーズでは、波形選択メタサーフェスの振る舞いを定式化することで、そのメカニズムを物理的に解明した。当該フェーズでは電磁応答と使用される回路定数等の設計諸元とを結び付けた理論式を導出した(2頁図1)。これによって、所望の電磁応答を実現できるメタサーフェスの設計諸元を容易に求められるようになった。

2) デバイス開発フェーズでは波形選択メタサーフェスに基づいたアンテナを新たに考案した(3頁図2)。同アンテナは同一周波数でも放射パターン等の特性をパルス幅に応じて変化できることが分かった。従来の一部のアンテナ(例:アレーアンテナ)においても放射パターン等を同一周波数で変化可能であるものの、提案されたアンテナの特徴はパルス幅を変えるだけで自律的に(電源不要で)振る舞いを変化できる点に優位性がある。

3) システム開発フェーズでは波形選択性の概念をメンテナンスフリーなIoTタグに導入した(4頁図3)。従来タグのIDは周波数領域における電磁応答のみと結び付けられていたものの、考案されたタグのIDは時間領域で変化する電磁応答とも結び付けられるようになった。このため、より高い次元を活用して、多くのIoTタグを選別できるようになると期待される。

(2) 詳細

提案研究の実施計画は以下に示す3つのフェーズから構成された。1) 基礎材料・理論開発フェーズではメタサーフェスの振る舞いを定式化することによって、そのメカニズムを解明した。また、2) デバイス開発フェーズではアンテナ等をメタサーフェスに基づいて構成することで、新たな機能性を有する通信デバイスを開発した。3) システム開発フェーズでは上記の開発された材

料・デバイスを IoT アプリケーションまたはシステムとして応用・展開した。

1) 基礎材料・理論開発フェーズ

当該フェーズでは波形選択メタサーフェスの振る舞いを定式化して、そのメカニズムを物理的に解明した。加えて、現実的にどの程度の周期性を有する通信信号に応答できるかを明らかにした。以下ではこのうち、波形選択メタサーフェスの振る舞いの定式化について紹介する。

波形選択メタサーフェスは交流波形をダイオードブリッジにおいて全波整流することで、入力周波数を無数の成分へと変換している。ただし、大部分のエネルギーは直流にあらわれるため、たとえ交流信号でも直流回路で広く知られている過渡現象を利用できるようになる。図1には、波形選択メタサーフェスの過渡応答(パルス幅に応じた選択性)を簡易的に近似可能な等価回路を考案した例を示す。ただし、ここでは過渡応答のみに焦点を当てるため、導体間の回路部のみに着目して等価回路を導き出した。また、ダイオードブリッジ内部の回路は直流電源に接続され、かつダイオードの抵抗成分が直列に接続されると仮定した(ただし、ダイオードの抵抗成分は立ち上がり電圧における電位と電流の関係から導出)。その結果、波形選択メタサーフェスの電磁応答が定常状態に達する目安となる時定数を効果的に推定できることが分かった。特に、ここではダイオードの寄生抵抗成分が時定数の推定において重要な役割を果たすことが分かった。本成果によって、波形選択メタサーフェスの過渡応答と回路定数等の設計諸元とを結びつけ、物理的関係性を明らかにすることができた。また、所望の電磁特性を得るために必要な回路部の条件を容易に導き出す手法を提案することができた。本研究成果は *Applied Physics Letters* 誌から発表された。

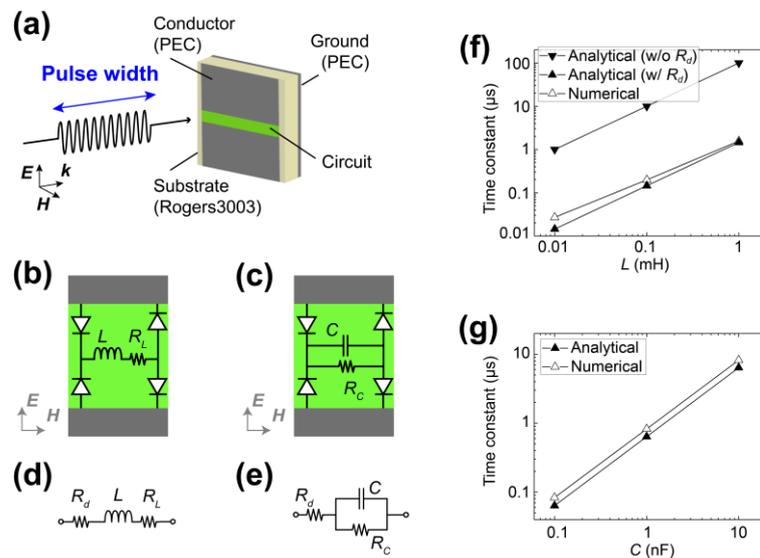


図1: 波形選択性を推定する簡易等価回路モデルの考案. (a)評価モデル. (b, c)インダクタ型およびキャパシタ型波形選択メタサーフェスの回路部と(d, e)その簡易等価回路モデルならびに(f, g)算出された時定数の比較結果. 本成果は *Applied Physics Letters* 誌にて掲載.

2) デバイス開発フェーズ

ここでは波形選択メタサーフェスに基づいたアンテナや波面成形(ビームフォーミング)等に利

用可能な通信デバイスを開発した。その一例として、以下では本研究で考案されたアンテナについて報告する。

まず、ここでは簡易的に評価するため、等方的に電波信号を放射するモノポールをグランド板に接続した(実質的に自由空間に配置されたダイポールと等価)(図2)。ただし、異なるパルス幅信号を効果的に透過させる3種類の波形選択メタサーフェスを周囲に配置した。その結果、外部に配置した3つのレシーバの受信電力は異なるパルス幅(時間)で最大化された。また、同アンテナの放射パターンは明確な指向性を持ち、かつパルス幅に応じて変化することが分かった。従来のアンテナにおいても、パラボラアンテナのように機械的に姿勢を変化させることや、アレーアンテナのように位相を電氣的に調整することによって放射パターンを再構築することができるアンテナが存在している。ただし、これに対して本研究で考案されたアンテナの優位性は、パルス幅を変えるだけでパッシブかつ自律的に特性を変化させることができる点にある。本研究成果は *Nature Communications* 誌から発表された。また、本研究は英国ノッティンガム大学 Christopoulos 名誉教授、イタリアローマ第三大学 Bilotti 教授らとともに実施された。

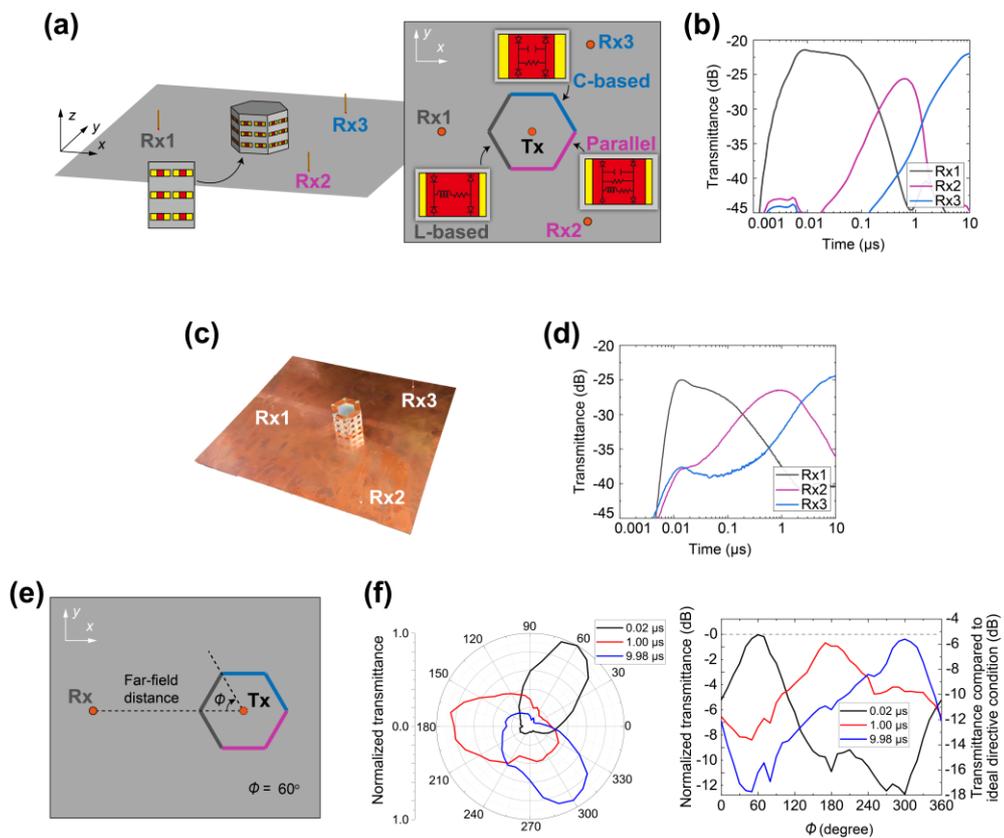


図2: 波形選択アンテナ. (a)アンテナ構成. パルス幅に応じて入射波を透過する波形選択メタサーフェスのパネルとともにアンテナを構成. (b)透過率の数値解析結果. (c)試作試料と(d)その透過率の測定結果. (e)放射パターンの測定における構成と(f)その測定結果. 本成果は [Nature Communications](#) 誌にて掲載([名古屋工業大学プレスリリース記事](#)).

3) システム開発フェーズ

本フェーズでは波形選択メタサーフェスを Wi-Wi モジュールにおける反射波の抑制(後述)や IoT のセンシングアプリケーションとして活用した。後者では特に IoT タグの選別性能を向上させ

るため、従来の周波数の応答に基づいたタグ ID の選別方法に加え、パルス幅の応答に基づいたタグ ID の選別方法を提案した。

ここでは提案手法を簡便に評価するため、マイクロストリップ上に特定の周波数で共振し、通信信号を遮断する試作試料を製作した(図3)。加えて、波形選択メタサーフェス内でパルス幅の選別に用いられる回路部を導入した。このメタサーフェスを有線並びに無線環境下で評価した所、有線環境下では周波数領域ならびに時間領域において 10 dB 以上の散乱パラメータの変化を観測した。また、無線環境下では大部分のエネルギーが周囲へと拡散してしまうため変化量は減少したものの、時間領域においても散乱パラメータは 5 dB 程度変化することが分かった。以上から、同一のネットワーク内の限られた周波数資源の環境下においても、波形選択メタサーフェスのコンセプトを用いることで、より多くの IoT タグを選別できるようになると期待される。本研究成果は *Electronics Letters* 誌から発表された。本研究は本さきがけ領域の研究者である大阪大学・内山准教授と慶應義塾大学・杉浦准教授とともに実施された。

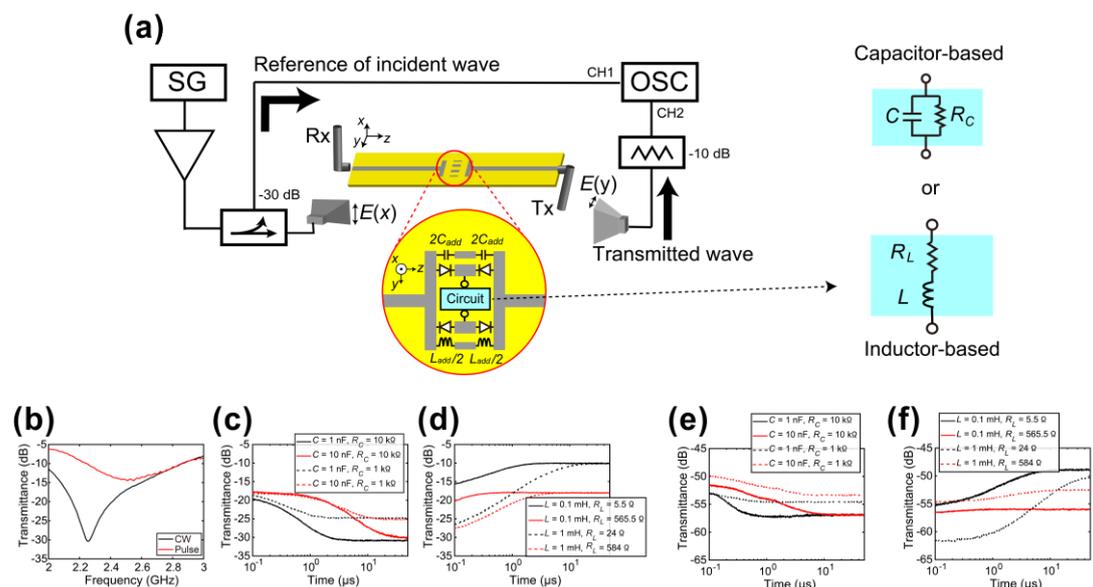


図3: 波形選択性を導入したメンテナンスフリーIoT タグの試作. (a)測定系と試作試料の構成. 典型的なマイクロストリップに波形選択性に必要な回路構造を導入. 簡易的に有線環境下 (a)のモノポールの代わりに同時ケーブルをVNAに接続)でキャパシタ型回路を用いた場合の (b)周波数領域における応答と(c)時間領域における応答. (d)インダクタ型回路を用いた場合の時間領域応答. aの無線環境下で(e)キャパシタ型ならびに(f)インダクタ型回路を用いた場合の時間領域応答. 本成果は [Electronics Letters](#) 誌にて掲載.

3. 今後の展開

図1で考案された等価回路モデルによって、波形選択メタサーフェスの電磁応答が定常状態に達する目安である時定数を簡易的に推定できるようになった。さらに、代表者らは同回路モデルを発展させ、様々な周波数やパルス幅の依存性を加味した、より包括的な等価回路モデルを考案することに成功した (*Journal of Physics D: Applied Physics*, 55, 015304, 2022)。これら理論開発フェーズでの取り組みでは、波形選択メタサーフェスの振る舞いと回路定数等の設計諸元との物理的関係性が定式化されただけでなく、微細構造を有する波形選択メタサーフェスを均一なインピーダンスシートで表現できるようになった。したがって、計算負荷の大きな大規模空間の数値シミュレーションにおいても、波形選択メタサーフェスの微細構造のモデリングが不要となり、効率的に電磁応答を評価できるようになった。したがって、波形選択メタサーフェスをより高度で複雑に組み合わせたデバイスやシステムを考案する上で、重要な解析アプローチとなる。

図2の波形選択アンテナは、波形選択メタサーフェスを基本的なアンテナの1つであるモノポールアンテナに簡易的に融合させたため、透過率、放射効率、指向性などの各種性能は限定的であった。このため、具体的なアプリケーションシナリオに沿ってアンテナ構成を最適化することで、さらなる性能向上が期待される。

図3のメンテナンスフリータグへの応用については、今後大阪大学・内山准教授、慶應義塾大学・杉浦准教授らとともに、IoT タグとしての利用価値を高めるため、タグの小型化を図るとともにワイヤレスセンシングへと利用予定である。今後 2-3 年程度で研究レベルの評価を完了させ、その後社会実装を目指す計画である。

4. 自己評価

本研究は通信端末などの電磁デバイスや電磁材料において、従来は周波数のみに応じて電磁性能や電磁応答等が変化することが当たり前と考えられてきたことに対し、新たにパルス幅次元を加え、同一周波数での分散処理性能を高めることを目的として実施された。すなわち、本研究は基礎・萌芽的な要素を多分に含んだ研究であった。しかしながら、本さきかけ領域内では異なる専門性を持つ研究者らとの活発な交流や共同研究によって、採択時当初に総括ならびにアドバイザーから指摘・提案された、上位レイヤとの関連性を踏まえて研究を展開できたと自己評価する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:12件

1. 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, H. Wakatsuchi, "Pulse-Driven Self-Reconfigurable Meta-Antennas," *Nature Communications*, vol. 14, p. 633, 2023.

当該論文では波形選択メタサーフェスを融合させることで、アンテナ性能を同一周波数でもパルス幅に基づいて制御できることを報告した。提案手法は自由空間波だけでなく表面波にも有効であることを示し、考案されたアンテナはセンサ等としても利用されるなど、応用シナリ

オについても報告した。

2. H. Homma, M. R. Akram, A. A. Fathnan, J. Lee, C. Christopoulos, and H. Wakatsuchi, "Anisotropic Impedance Surfaces Activated by Incident Waveform," *Nanophotonics*, vol. 11, no. 9, pp. 1989-2000, 2022.

当該論文ではパルス幅に応じて等方性表面インピーダンスと異方性表面インピーダンス間で切り替えることのできる波形選択メタサーフェスを報告した。同メタサーフェスは同一周波数でもパルス幅に応じて表面波を伝搬(ガイド)させる方向を変化できることから、パルス幅に応じて狙ったアンテナへと表面波信号を伝送することができる。

3. K. Asano, T. Nakasha, and H. Wakatsuchi, "Simplified Equivalent Circuit Approach for Designing Time-Domain Responses of Waveform-Selective Metasurfaces," *Applied Physics Letters*, vol. 116, p. 171603, 2020.

当該論文では波形選択メタサーフェスの電磁応答を簡易的な等価回路で模擬するための手法を提案した。提案手法では使用される回路定数を用いることで、電磁応答が定常状態に達する目安となる時定数を推定できるだけでなく、時間領域応答を予測できるようになった。

(2) 特許出願

該当なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 若土弘樹, "波形選択メタサーフェスとその通信応用デバイス," 情報処理学会, 全国大会, 東京, 2023年3月(招待講演).
2. 名古屋工業大学プレスリリース, Towards a New Antenna Paradigm with Waveform-Selective Metasurfaces (<https://www.nitech.ac.jp/eng/news/2023/10207.html>) (5(1)代表的な論文発表における論文1に関するプレスリリース)
3. 若土弘樹, "メタサーフェスのパルス幅選択性に基づく分散処理技術," 情報処理学会, 全国大会, オンライン, 2022年3月(招待講演).
4. R. Higashiura and H. Wakatsuchi, "Reconfigurable Antennas Based on Waveform-Selective Metasurfaces," XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, pp. Tu-FIP-D10-3, Rome, Italy, 28 Aug. - 4 Sept. 2021.
5. H. Wakatsuchi and M. Tanikawa, "Transient Wavefront Shaping Based on Waveform-Selective Metasurface," XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, pp. Tu-FIP-D10-4, Rome, Italy, 28 Aug. - 4 Sept. 2021.
6. H. Wakatsuchi, R. Higashiura, H. Takeshita, and D. Nita, "Multi-Band Waveform-Selective Metasurfaces Transmitting Continuous Waveforms Based on More Than One Frequency," *Metamaterials'2020 the 14th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena*, pp. X-284-X-286, New York, US, 28 Sept. - 3 Oct. 2020.