

波形選択メタサーフェスの低電力化と無線 LAN システムへの応用

Development of Low-Power Waveform-Selective Metasurfaces and Its Application to Wireless LAN systems



安在 大祐 (Daisuke Anzai, Ph. D.)

名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授

(Associate Professor, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology)

電子情報通信学会 IEEE 他

受賞: 愛知県若手研究者イノベーション創出奨励事業「第 13 回わかしやち賞」優秀賞 (2019 年) 電気通信普及財団テレコム技術賞奨励賞 (2017 年) 高柳健次郎財団研究奨励賞 (2017 年) IEEE MTT Society Japan Young Engineer Award (2015 年) 他

研究専門分野: 無線通信工学

あらまし

携帯電話, スマートフォン, タブレットなどの無線通信機器は公共の場を含めた様々な場所で利用されており, 無線周波数帯における電磁干渉問題は解決すべき重要な課題の 1 つとなっている. 電磁干渉が同一周波数で生じる場合, 主要な解決手法として用いられてきた電磁波シールドや電波吸収体は所望波と干渉波を識別することができず, 問題解決はより困難となる. 本研究は, 同一周波数帯においても信号の時間波形に応じて吸収・透過特性を操作可能な波形選択メタサーフェスに着目し, 2.4GHz 帯の電磁干渉問題の解決を図る. これまでの波形選択メタサーフェスの課題であった無線通信で想定される低い受信電力での動作, 及び 2.4GHz 帯無線変調波による動作検証に対して, 本研究は検討を行った. 本検討結果から, 実無線通信環境における受信電力での波形選択性の実現可能性が示され, WLAN 信号においても有効に動作する波形選択メタサーフェスを実現できた. これらの結果より, 波形選択メタサーフェスによる 2.4GHz 帯の電磁干渉問題解決に対する可能性が示された.

1. 研究の目的

本研究では信号の時間波形に応じて電磁波の吸収特性や透過特性を変化させる人工電磁材料であるメタサーフェス*1(以下, 波形選択メタサーフェス)に着目する[1-3]. この波形選択メタサーフェスは信号の時間波形により特性が変化するため, 同一周波数上での電磁干渉問題の新たな解決手法の 1 つとして考えられる. これまでに報告されている波形選択メタサーフェスでは, 波形選択性を得るための条件として, 非常に大きなレベルでの受信電力が必要となり, 実用化における課題となっていた. そこで, 本研究は波形選択メタサーフェスの低電力化に取り組み, 加えて, 利用の多い周波数帯として ISM (Industrial, Scientific and Medical) 2.4GHz 帯に対応した波形選択メタサーフェス開発し, その基本的な電磁特性を評価する. 2.4GHz 帯の利用ケースとして WLAN (Wireless Local Area Network) 信号を用いた評価を行い, 2.4GHz 帯という同一周波数帯の電波(例: Bluetooth, WLAN)においてもパルス幅に応じて通信に不要な電波を吸収することによって電磁干渉問題の低減を目指す. 以上より, 同一周波数における電磁干渉問題の解決手段の 1 つとして, 波形選択メタサーフェスの有効性を示すことが本研究の目的である.

2. 研究の背景

現代において携帯電話, スマートフォン, WLAN などの無線通信機器は我々の生活に欠かすことのできない役割を果たし, 公共の場を含めた様々な場所で利用されている. このため, 他機器などから発生する干渉波または外部電磁界雑音によって通信や電子機器の動作に影響を及ぼす, いわゆる電磁干渉問題は現代における重要課題の 1 つである. なお, この問題は通信用電波と電磁ノイズが同一周波数となる場合, 一層解決が困難となる. これまで電磁干渉問題の主要な解決手法として用いられてきた電磁波シールドや電波吸収体は電波の持つ周波数成分の違いに応じて, それぞれに対する振る舞いを変化させることができた. すなわち, 同一周波数上では選別することができないことにも起因している. とりわけ, ISM 帯においては, 広く産業,

波形選択メタサーフェスの低電力化と無線 LAN システムへの応用

Development of Low-Power Waveform-Selective Metasurfaces and Its Application to Wireless LAN systems

科学、医療分野でも利用できることから、電磁界干渉問題は一層深刻な状況にある。例えば、ISM 帯の 1 つである 2.4GHz 帯の電波は WLAN や Bluetooth だけでなく、電子レンジを含む通信用途以外の機器などにも利用されている。さらには今後、IoT (Internet of Things) の普及により、通信の機会が大幅に増えることから ISM 帯の電磁干渉問題はより一層懸念されると考えられる。以上より、同一周波数上における電磁干渉問題に対する新たな技術が必要とされている。

3. 研究の方法と結果

本研究で用いられる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から構成され、金属パッチ間のギャップ部分にはダイオード、キャパシタ、インダクタ、抵抗等の回路素子が接続されている。図 1 は波形選択メタサーフェスの概形を示す。その回路素子の組み合わせによって、短いパルス幅の電波(以下、パルス波)、連続波等、任意のパルス幅に対する吸収率を同一周波数においても制御可能である。

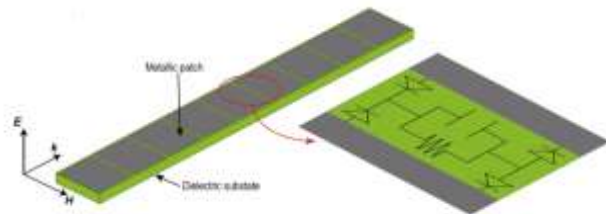


図 1. 波形選択メタサーフェス

次に、波形選択メタサーフェスの動作原理について説明する。波形選択メタサーフェスに電波が照射されると、誘電体基板上の金属パッチ表面に電荷が誘起される。誘起された電荷は設計した動作周波数において強く共振し、金属パッチ間のギャップ部に接続された回路素子へと流れ込む。その後、流入電荷は 4 つのダイオードから構成されたダイオード・ブリッジによって全波整流される。その結果、入射波は非線形効果の影響により複数の周波数成分へ変換される。ここで、周波数変換されたエネルギーは直流成分に集中するた

め、その成分に対してキャパシタやインダクタの時間領域応答を組み合わせることで波形選択性が実現される。具体的にキャパシタまたはインダクタから構成される波形選択メタサーフェスを図 2 に例として示す。

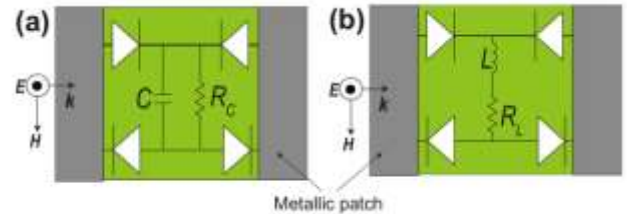


図 2. (a)キャパシタおよび(b)インダクタ型波形選択メタサーフェスの構成例

まず、この波形選択メタサーフェスの低電力化について検討する。波形選択性はダイオードブリッジによる全波整流作用を利用することで得ることができる。そのため、金属パッチ間のギャップ部に現れる電位差によってダイオードの立ち上がり電圧以上の電圧が印加されない場合、波形選択性の効果を得ることはできない。

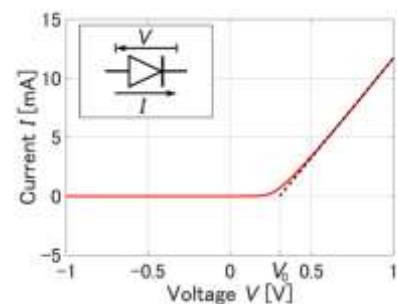


図 3. ダイオードの V-I 特性の例

例として、図 3 に Broadcom 社の HSMS-2863 の V-I 特性を示す[4]。横軸はダイオードに対して順方向に印加した電圧の大きさを表し、縦軸は印加した電圧値において流れる電流の大きさを表す。この図より、V-I 特性の線形部分における近似直線(図中点線)から立ち上がり電圧 V_0 を約 0.3V と求めることができる。波形選択メタサーフェスの動作には金属パッチ間のダイオードに立ち上がり電圧以上の電圧を印加することのできる誘導電荷が必要であり、これに相当する入射電力が、メタサーフェスによって波形選択性を得

波形選択メタサーフェスの低電力化と無線 LAN システムへの応用

Development of Low-Power Waveform-Selective Metasurfaces and Its Application to Wireless LAN systems

ることのできる最小電力となる。本研究では、波形選択メタサーフェスに理想ダイオード回路を用いることで、低電力下での動作実現を目指す。

有限要素法に基づいた電磁界解析により理想ダイオード回路を用いることによる波形選択メタサーフェスの低電力化の効果検証を行った。また、動作周波数については今回評価対象とした理想ダイオード回路の周波数特性を考慮し、基礎検討としてメタサーフェスの共振周波数を含む 20MHz から 50MHz までを 1MHz ステップごとに解析を行った。入射電力については理想ダイオード回路に 40dB の利得を持つオペアンプを用いたため、より小さい動作電力で波形選択メタサーフェスが動作することを考慮し-50dBm から 0dBm までを 10dB ステップごとに解析を行った。

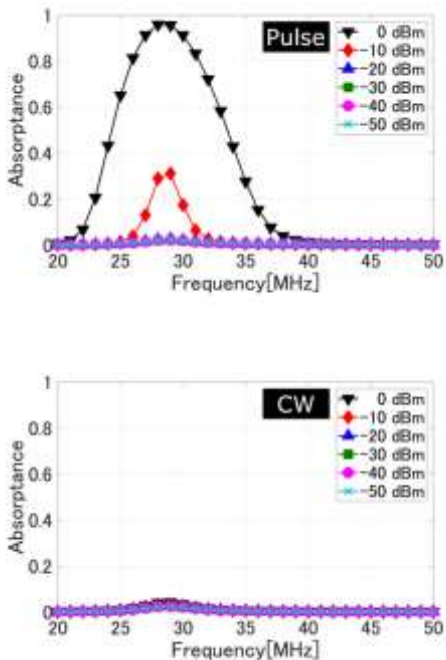


図 4. 従来のダイオードを用いた波形選択メタサーフェスの吸収特性（キャパシタ型）

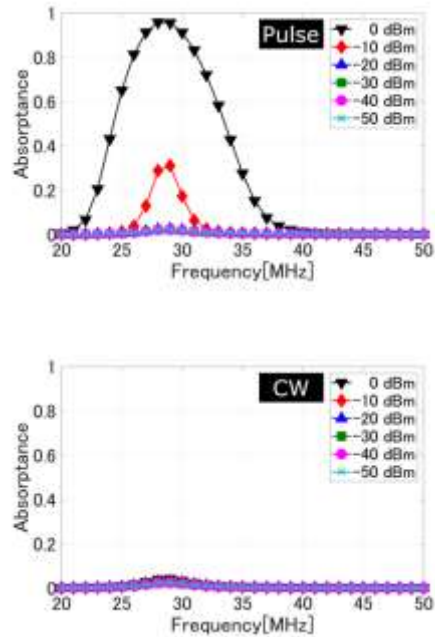


図 5. 理想ダイオード回路を用いた波形選択メタサーフェスの吸収特性（キャパシタ型）

本電磁界解析と回路解析によって得られた、従来のダイオードを用いた場合のキャパシタ型の波形選択メタサーフェスの吸収特性を図 4 に、理想ダイオード回路を用いた場合のキャパシタ型の波形選択メタサーフェスの吸収特性を図 5 に示す。ここで、Pulse は 5 μ s の短パルス照射した場合を表し、CW (Continuous Wave) は連続波照射した場合を表している。従来のダイオードを用いた場合、キャパシタ型波形選択メタサーフェスは、入射電力 0dBm の短パルス波によって誘起された電荷をキャパシタへと蓄積した後、抵抗によって消散することで強い吸収率を示した。一方、連続波ではキャパシタが完全に充電されるため、限定的な吸収率となった。このことから、従来のダイオードを用いた波形選択メタサーフェスにおいては 0dBm の入射強度を用いることで共振周波数付近において波形選択性が得られることが分かった。しかしながら、入射電力が-10dBm 以下の場合ではダイオードブリッジに印加される電圧がダイオードの立ち上がり電圧を下回ることから効率的な全波整流作用を得られないため、吸収率とともに波形選択性の効果も低下することが分かった。

波形選択メタサーフェスの低電力化と無線 LAN システムへの応用

Development of Low-Power Waveform-Selective Metasurfaces and Its Application to Wireless LAN systems

一方、ダイオードの代わりに理想ダイオード回路を用いた場合は、低電力の電波が照射された場合においても整流作用を得ることができ、電荷が内部回路へ流入するため強い吸収特性が表れる。特に、キャパシタ型における短パルス波とインダクタ型における連続波は入射電力 0dBm から-30dBm において 90%以上吸収された。なお、ここで理想ダイオード回路に用いたオペアンプの利得は 40dB であった。そのため、従来のダイオードを用いた場合、入射電力 0dBm において波形選択性を得られていたことから、理想ダイオード回路を用いることで動作電力を-40dBm まで低下できることを見込んでいたものの、実際には-30dBm 程度となった。これは、理想ダイオード回路内の抵抗の大きさによって立ち上がり電圧が理論値よりも大きくなったことが原因の 1 つとして考えられる。

最後に、波形選択メタサーフェスにおいて 2.4GHz 帯 WLAN 信号を用いた評価を行った。WLAN 信号はトランスポート層の制御によりおよそ 50 μs の送信波(以下、50 μs パルス)を短パルスとして、連続波とともにキャパシタ型波形選択メタサーフェスの吸収率について評価した。このパルス長の変化量に合わせて時定数の調整として、1 μF のキャパシタを用いた。用いた実験系を図 6 に示す。

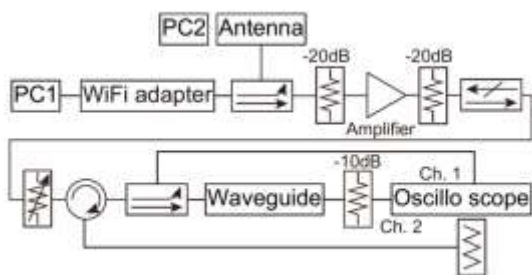


図 6. WLAN 信号による評価実験系

PC1 に接続された WLAN アダプタから出力される信号は、アダプタ直後に配置されたカップラーによって WLAN アンテナへと分配される。分配された信号はアンテナから放射し、ルーター (BUFFALO 社, WXR-1750DHP) を介して PC2 と通信が行われる。この PC1, 2 間で行われる通信の信号を導波管内部へと照射されるように接続することで、配置された波形選

択メタサーフェスによる吸収率を評価した。また、プログラミング言語 Python を用いて WLAN の送信時間を制御することでパルス幅の調整を可能とした。本測定ではランダムな送信系列を利用することにより Wi-Fi 信号は毎回波形が異なるため、10 回測定した値の平均値を評価した。

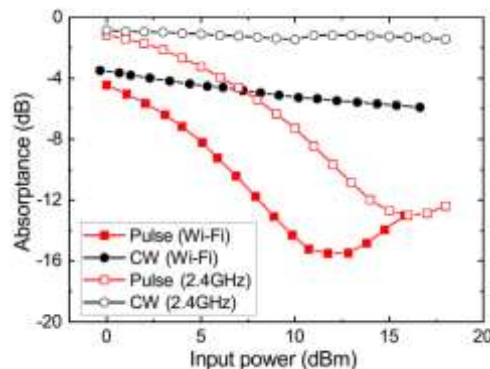


図 7. 2.4GHz 帯 WLAN 信号に対するキャパシタ型波

図 7 は測定した吸収率を示す。また、比較のために 2.4GHz 単純正弦波 (無変調波) による 50 μs パルスまたは連続波を照射した場合の吸収率も同じグラフに示す。キャパシタ型波形選択メタサーフェスに対して約 50 μs 長のパルス幅の WLAN 信号を照射した場合、約 0dBm の入射強度では-4.7dB の吸収率を示したが、12dBm 程度の入射強度を用いることによって-15.5dB の吸収特性を示した。一方、連続波を照射した場合は入射強度によらず短パルスを照射した際と比較して-3dB ~ -6dB 程度の限定的な吸収率となることが分かった。また、2.4GHz の電波を照射した場合の結果と比較すると、吸収特性や透過減衰量の傾向は定性的に似ているものの、定量的には違いがある。これは、正弦波は単一の周波数成分を含むのに対して、WLAN 信号は帯域幅を持たため、WLAN 信号を照射した場合、その帯域幅を構成する全ての周波数成分を考慮した値となるため、正弦波を照射した場合と結果が異なる。以上より、約 12dBm 程度の電力を持つ Wi-Fi 信号を用いることで最大で約 10dB の吸収率の差が確認され、周波数と振幅が一定な正弦波に対してだけではなく、無線変調信号である WLAN 信号に対しても波形選択メタサーフェスは有用であることが示された。

波形選択メタサーフェスの低電力化と無線 LAN システムへの応用

Development of Low-Power Waveform-Selective Metasurfaces and Its Application to Wireless LAN systems

4. 将来展望

本研究による評価結果から、実使用環境における波形選択メタサーフェスの有用性が明らかになった。今後の展望として、他の周波数帯や変調方式での波形選択メタサーフェスの有効性検証やさらなる低動作電力への検討が挙げられる。

おわりに

本研究により、これまでの波形選択メタサーフェスの課題であった無線通信で想定される受信電力での動作、及び実際の 2.4GHz 帯の無線変調信号による動作検証に対して検討を行った。低電力化の検討においては、理想ダイオード機構を取り入れることで大幅な動作電力の低減を実現し、実環境における無線通信での波形選択性の可能性を示した。さらに、単純な正弦波信号（無変調信号）ではなく 2.4GHz 帯 WLAN 信号を用いることにより、無線変調された信号に対して波形選択メタサーフェスが動作するかについて実験的に検証を行った。実験結果より、無変調の単純な正弦波だけでなく WLAN 信号においても有意な波形選択性が確認された。

謝辞

本研究遂行にあたり、名古屋工業大学 若土弘樹准教授、牛越大樹氏、谷川瑞紀氏におかれましては多岐に渡りご支援をいただきました。ここに深く御礼を申し上げます。

用語解説

*1 メタサーフェス：ユニットセルと呼ばれる構造を繰り返しの（周期的に）配列することにより構成される人工材料の一種。

参考文献

[1] D. F. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a

Forbidden Frequency Band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2059-2074, 1999.

[2] 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, p. 9639, 2015.

[3] H. Wakatsuchi, S. Kim, J. J. Rushton, and D. F. Sievenpiper, "Waveform-Dependent Absorbing Metasurfaces," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, p. 245501, 2013.

[4] HSMS-2863 - Broadcom Limited |Connecting Everything" <https://jp.broadcom.com/products/wireless/diodes/schottky/hsms-2863>.

関連文献

[1] D. Ushikoshi, M. Tanikawa, K. Asano, K. Sanji, M. Ikeda, D. Anzai, and H. Wakatsuchi, "Experimental demonstration of waveform-selective metasurface varying wireless communication characteristics at the same frequency band of 2.4 GHz," *IET Electronics Letters*, vol. 56, no. 3, pp. 160-162, Feb. 2020.

[2] 谷川瑞紀, 三治健一郎, 池田正和, 安在大祐, 若土弘樹, "低電力波形選択メタサーフェスの数値解析評価," 電子情報通信学会ソサイエティ, C-2-51, 2019年9月.

この研究は、平成27年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成28~30年度に実施されたものです。