

令和元年6月4日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14266

研究課題名（和文）理論限界を超える新電波吸収体：ノンフォスター回路による超広帯域化

研究課題名（英文）New RF wave absorbers breaking theoretical limit: ultra wideband absorption based on non-Foster circuit load

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） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では最終目標として理論限界を超える超広帯域電波吸収体の開発を目指し、このうち当該研究期間中では、提案手法の有効性を検証するため負のリアクタンスをメタサーフェス電波吸収体へと導入した場合の吸収特性について評価した。その結果、Rozanov limitと呼ばれる理論限界を大きく超越する吸収帯域幅を数値解析により確認した。また、現実的に負のリアクタンスを実現することのできるノンフォスター回路をシミュレータによって設計し、試作回路を製作した。本回路は数値解析および測定においてともに安定した応答を示すことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波吸収体は電子機器へと不要に照射される電波エネルギーを吸収し、誤動作などにつながる電磁干渉問題を低減する役割を果たしている。現代生活で広く利用される携帯電話、無線LAN、Bluetoothなどの無線通信機器に加え、近い将来“モノのインターネット（IoT：Internet of Things）”の本格的な普及によって様々な家電製品による通信が予測されることから、電波吸収体の重要性はより一層高まっている。提案手法は薄型、かつ理論限界を超えた超広帯域電波吸収体を開発するものであり、限られた物理空間においても様々な電磁ノイズを同時に吸収し、良好な電磁環境を保つことに貢献する。

研究成果の概要（英文）：The final goal of the project is to develop RF absorbers that break a theoretical limit on absorbing bandwidth. This study has particularly confirmed that the bandwidth can be significantly broadened by using negative reactance in numerical simulations. Such a reactance has been realised by designing non-Foster circuits that were later fabricated to validate their stability in both of the time domain and the frequency domain.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電磁波 電波吸収体 ノンフォスター回路 メタマテリアル メタサーフェス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電波吸収体は電子機器へと不要に照射される電波エネルギーを吸収し、誤動作などにつながる電磁干渉問題を低減する役割を果たしている。現代生活で広く利用される携帯電話、無線LAN、Bluetoothなどの無線通信機器に加え、近い将来“モノのインターネット (IoT: Internet of Things)”の本格的な普及によって様々な家電製品による通信が予測されることから、電波吸収体の重要性はより一層高まっている。

一方、電磁干渉の抑制に用いられる電波吸収体は一般に設計厚みが大きくなり、その応用用途が限定される傾向にあったものの、メタサーフェスに基づく電波吸収体 (メタサーフェス電波吸収体) の登場により、飛躍的に薄型の吸収体を実現できるようになった [PRL, 100, 207402, 2008]。なお、メタサーフェスとは波長よりも十分に小さい金属の周期構造から構成される人工材料であり (図1参照) ここに抵抗素子などを導入することで不要電波のエネルギーを消散・吸収できるようになる。特にメタサーフェス電波吸収体は非線形性を取り込むことで、線形材料からは得られない性能を実現できることが知られている (例: 同一周波数におけるパルス幅に応じた吸収特性など [PRL, 111, 245501, 2013])。ただし、一般にも吸収体の動作周波数帯域と設計厚み d はトレードオフの関係にあり、理論的にも以下のように

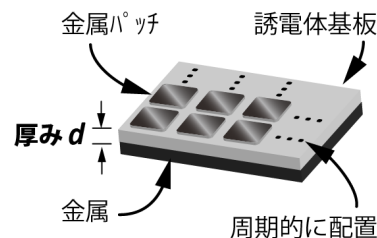


図1. メタサーフェス

$$< 16d / |\ln(1-A)|. \tag{1}$$

ただし、ここで $\Delta f = f_{max} - f_{min}$ となり、 f_{max} は動作帯域の最大波長、 f_{min} は動作帯域の最小波長、 A は吸収率を表す。よって、 d と Δf の最大値は比例関係にあり、設計厚みが固定された場合、動作周波数帯域には理論的限界が存在する。

2. 研究の目的

本研究では最終目標として上記理論限界を超越する薄型で超広帯域電波吸収体を実現することを掲げる。当該研究期間中では後述される研究手法の効果について評価し、電波吸収体の開発に必要となる基礎技術について開拓した。

3. 研究の方法

既存理論限界を超える超広帯域な吸収特性を実現するため、まず本研究ではメタサーフェスの振る舞いはキャパシタ C 、インダクタ L によって構成される等価回路の共振現象に基づくことに着目した (図2)。ここで、 C 、 L は周波数に応じてインピーダンスを大きく変化させることから (図3左)、それによって構成されるメタサーフェス自身のインピーダンスも周波数に応じて大きく変化することになる。その結果、メタサーフェスのインピーダンスは設計周波数以外では自由空間中のインピーダンスとの間に不整合を生じ、広帯域に渡って入射波をメタサーフェス内部へと取り込んで消散・吸収できない原因となっていた。そこで、本研究ではメタサーフェス固有の C 、 L の周波数特性を打ち消すため、負のキャパシタンス ($-C$)、負のインダクタンス ($-L$) を実現可能なノンフォスター回路 (図3中央) をメタサーフェスへと並列に接続する手法を用いる。これによって、周波数に依存しないフラットなインピーダンスを実現し (図3右)、広帯域に渡って入射波を取り込み、吸収できるようにする。

4. 研究成果

まずは本手法による帯域幅の改善について評価した。ここでは電磁解析シミュレータ HFSS と回路シミュレータ ADS を統合した協調解析手法によって数値解析を実施した (図4) [PRL,

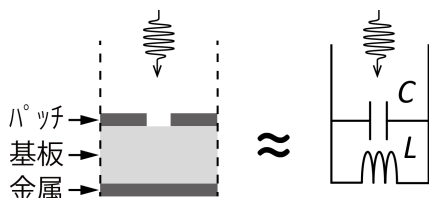


図2.(左)メタサーフェスの周期ユニットと(右)その等価回路(抵抗 R は省略)

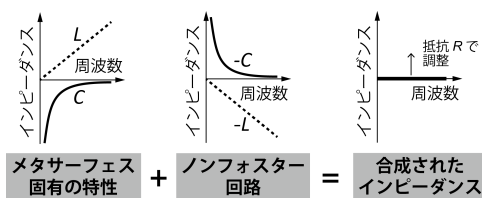


図3.メタサーフェス固有の周波数特性をノンフォスター回路によって相殺。さらに、抵抗 R によって自由空間中の波動インピーダンスと整合。

111, 245501, 2013]. ここで用いられたメタサーフェス電波吸収体はグラウンド (PEC: Perfect Electric Conductor) 誘電体基板 (Rogers3010) ならびに正方形の導電体パッチ (PEC) から構成された。ただし、電磁界モデルでは周期ユニットセル1つ分のみをモデリングし、代わりに周期境界条件を与えることで二次元平面上に無限に広がる周期構造を模擬した。電磁界解析では一旦回路素子の接続されるパッチ間にランプトポート (Lumped Port) を接続した状態で散乱特性を算出し、この計算結果を回路シミュレータ上で利用した。ただし、回路解析ではランプトポートに 377 Ω の抵抗を接続した。また、負のリアクタンス成分として $-C$ 、 $-L$ を接続した。その結果、図 5 左に示すように、負のリアクタンスを用いることで大幅に帯域幅を広げることができた。なお、従来の理論限界 (前頁式 1) との比較結果を図 5 右にまとめた。同図から分かるように、負のリアクタンスを使用しない場合、必ず理論限界を下回る帯域幅となることが確認できた。一方、負のリアクタンスを用いた場合、従来理論限界を明確に超える帯域幅を得られることが分かった。とりわけ、吸収率の大きい場合 ($A=0.9$ 付近など) 相対的に大きな改善効果が確認された。吸収率の小さな場合 ($A=0.1$ など) では相対的に理論限界へと近づいたものの、この理由としては高周波数帯側でのメタサーフェスの共振現象が既出図 2 右のような単純な並列回路とは異なる振る舞いをしたためと考えられる。よって、パッチ間に $-C$ 、 $-L$ を配置するだけでは改善効果が限定的になったものと推察される。しかしながら、重要な点として、このような状況下においても従来の理論限界を上回る帯域幅を獲得することができた。

続いて現実的に負のリアクタンスを実現するため、ノンフォスター回路を設計・製作した。これまでノンフォスター回路はオペアンプを用いた構成やトランジスタを用いた構成が報告されている [Antennas with Non-Foster Matching Networks, Morgan & Claypool, 2007]。このうち本研究では、設計の自由度の高さとより高い周波数帯での使用を想定し、トランジスタに基づいたノンフォスター回路を開発した。なお、その基本回路構成は図 6 左の通りとなる。同図から分かるように、ノンフォスター回路はトランジスタの対になった構成を取る。ここで、入力側の電位を V_1 、 V_2 とし、電流を i_1 、入力インピーダンスを Z_{in} 、負荷インピーダンスを Z_L とする。このとき、トランジスタのベース-エミッタ間にはほぼ電流が流れないと仮定すると、入力インピーダンスは負荷インピーダンスの負の値を取ることが分かる (同図中の計算式もあ

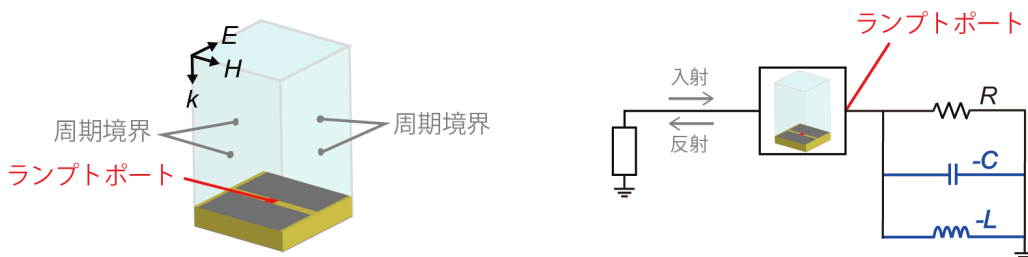


図 4 . 協調解析手法 . (左) 電磁界モデルと (右) 回路解析での回路図 .

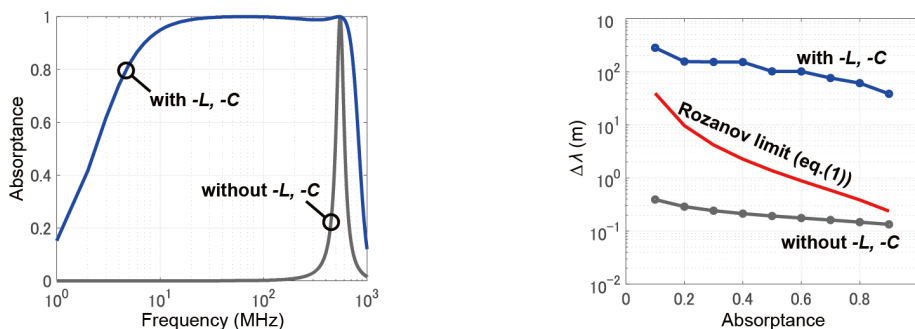


図 5 . 帯域幅改善効果の評価 (左) 負のリアクタンスの有無による吸収特性の変化 (右) 理論限界 (Rozanov Limit : 式 1) との比較 .

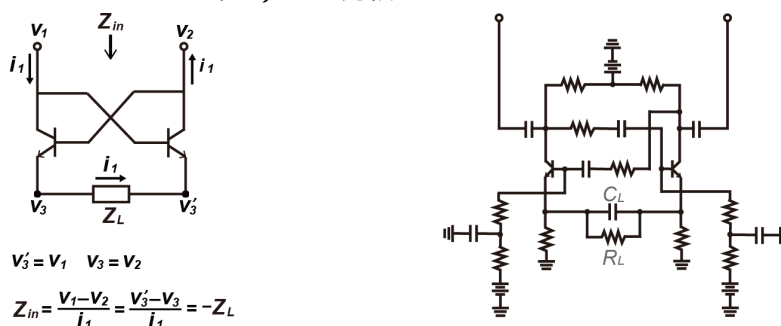


図 6 . ノンフォスター回路 . (左) 基本回路構成 . (右) 実際に利用された回路構成 .

わせて参照)。したがって、2つのトランジスタを用いることで負のリアクタンスを作り出すことが可能となる。ただし、現実的な回路素子には寄生成分が含まれ、さらにはトランジスタの過剰増幅による安定性の問題やベース電圧の微調節が必要となるため、本研究では図6右のような回路構成を用いた。ここでは直流電源を接続することでベース電圧を調節し、さらには抵抗やコンデンサを用いることで過剰増幅の抑制を図りながら直流及び交流電流を制御した。その結果、図7左に示すような静電容量を得ることができた。同図では過去報告されたノンフォスター回路のように(例: *IEEE TMTT*, 62, 789, 2014)、リアクタンス成分(同図内ではキャパシタンス)には強い周波数依存性が観測された。しかしながら、1-500 MHz 程度の帯域において一般的な回路素子からは得ることのできない負の値を観測することができた。さらに、時間領域においてこの回路の安定性を評価した結果を図7右に示す。この結果から、負のリアクタンス成分を持つ本回路は安定した動作を示すと予測された。

そこでこれら数値解析結果を踏まえて実際にノンフォスター回路を製作した。図8には試作回路とその基板上での回路配置を示す。重要な点として、測定では負のリアクタンス成分のみを安定的に観測できないため、並列に正のリアクタンス成分を持つ回路素子を接続した(ここではコンデンサ)。また、この回路を観測するために図9の測定システムを使用した。ここではオシロスコープを含む測定システムによって時間領域における安定性を評価し、スペクトラムアナライザを含む測定システムによって高調波成分の有無を確認した。その結果、図10左に示すように時間領域において安定したコレクタ電圧を観測した。また、同図中では数値解析結

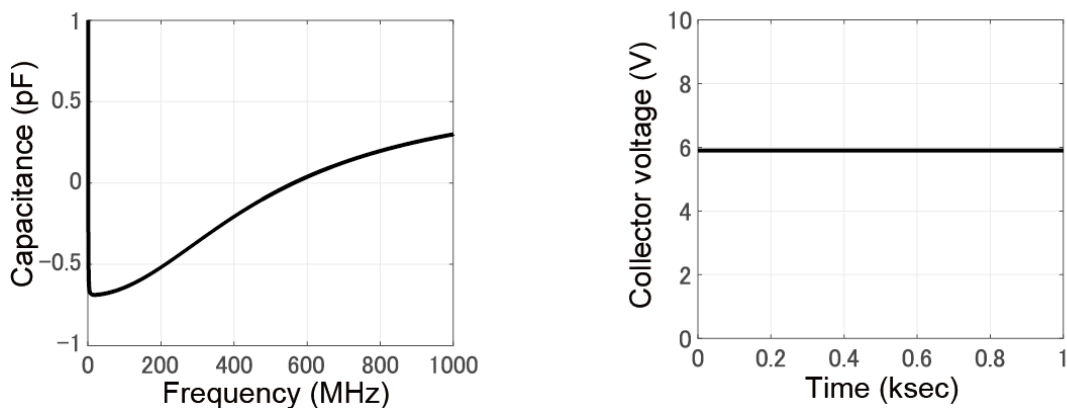


図7. 設計されたノンフォスター回路の数値解析結果。(左)電磁界モデルと(右)回路解析での回路図。

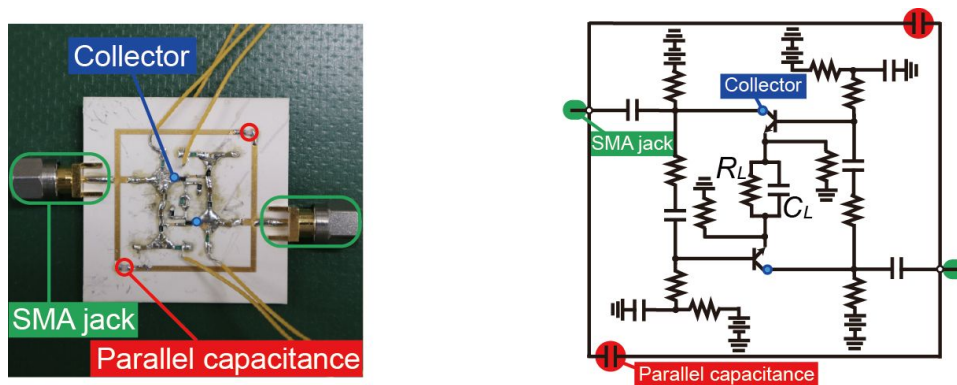


図8.(左)実際に製作されたノンフォスター回路と(右)基板上での回路配置。安定的に測定するため、負のリアクタンスを打ち消すコンデンサを並列に接続(“Parallel capacitance”を参照)。

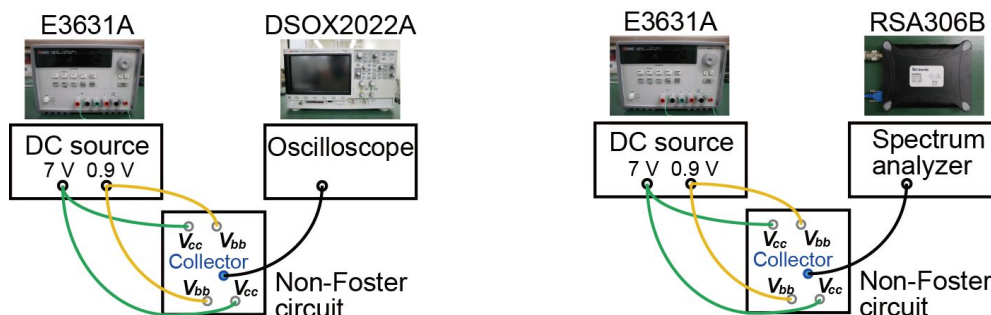


図9. ノンフォスター回路の評価に用いた測定系。(左)時間領域および(右)周波数領域における評価で使用。

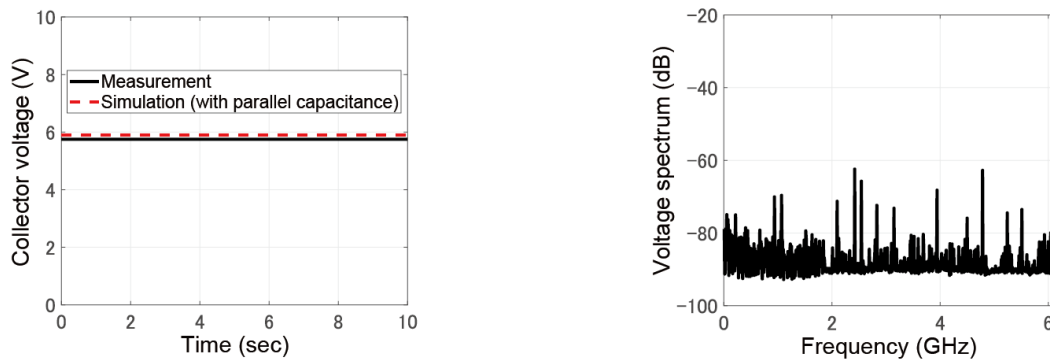


図 10 . ノンフォスター回路の測定結果 . (左) 時間領域および (右) 周波数領域における測定結果 .

果 (並列に接続されたコンデンサ含む) を示しており、同様の値を示すことが分かった (ただし、コレクタへの印加電圧は 7V であり、電圧降下も確認済) 。さらに周波数領域における周波数スペクトルを図 10 右のように観測し、6 GHz 以下の帯域において -60 dB 以下のスペクトルに抑圧できていることが分かった。以上から、著しく大きな高調波成分は存在しないことが確認でき、安定したノンフォスター回路を製作できたことが分かった。今後の課題として、以上開発した回路を用いて実際に電波吸収体を製作することが挙げられる。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

[1] T. Nakasha, K. Asano, D. Ushikoshi, J. Long, D.F. Sievenpiper, and H. Wakatsuchi, "Ultra-Broadband Metasurface Absorbers," Progress In Electromagnetics Research Symposium, Toyama, Japan, August 2018.

[2] 中舎朋之, 浅野耕生, 牛越大樹, Long Jiang, Daniel F. Sievenpiper, 若土弘樹, “超広帯域メタサーフェス電波吸収体,”電子情報通信学会,ソサイエティ大会, vol. C-2-42, pp. 50, 東京, 2017 年 9 月 .

〔その他〕

ホームページ : <http://hw.web.nitech.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者
該当しない

(2)研究協力者
研究協力者氏名 : ダニエル シエヴェンパイパー
ローマ字氏名 : Daniel Sievenpiper

研究協力者氏名 : ジャン ロン
ローマ字氏名 : Jiang Long

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。