

〈一般研究課題〉 無線通信における電磁界干渉低減のための  
超広帯域電波吸収体の開発  
助成研究者 名古屋工業大学 若土 弘樹



## 無線通信における電磁界干渉低減のための 超広帯域電波吸収体の開発

若土 弘樹  
(名古屋工業大学)

Development of ultra-wideband radio-frequency absorbers for  
mitigating electromagnetic interference in wireless communications

Hiroki Wakatsuchi  
(Nagoya Institute of Technology)

### Abstract :

Wave absorbers play an important role to mitigate interference issues raised by electromagnetic waves generated from wireless communications devices such as mobile phones, WiFi routers, Bluetooth devices, etc, since they are more widely used in our daily life or even in public than before. Recently, researchers developed a new type of absorber called metasurface absorber, which has a markedly reduced design thickness and thus successfully extended the applicability of absorbers for a wider range of situations. However, a common issue seen in these new absorbers is that they have a tradeoff between their thicknesses and operating bandwidths, i.e. the thinner it is, the more the achievable bandwidth is limited, which has been theoretically demonstrated as well. For this reason this study aimed at broadening the bandwidth of a metasurface absorber, while maintaining the thickness, by introducing non-Foster circuits, which allows us to realise a negative capacitance and negative inductance. These negative components cancel out the frequency dependence of the intrinsic impedance of the metasurface so that the input impedance is matched with free space, leading to accepting a wide range of incoming waves to effectively dissipate. This is numerically demonstrated in this study and is due to be tested experimentally as a future work.

## 1. 背景

携帯電話、無線LANなどの無線通信機器は我々の生活において必要不可欠な役割を果たしている。ここで通信機器の通信環境を良好に保つため、各機器から発振される電波信号を適切に遮断・吸収し、干渉を抑えることは極めて重要となる(図1参照)。とりわけ、近年のスマートフォンなど新たな無線通信機器に対する急速な需要の高まりと研究開発により、このような電磁界干渉問題は一層重要性が高まっている。この問題に対する一般的な解決策として、これまで電波吸収体を壁面に配置することで不要な散乱波(反射波)のエネルギーを吸収し、他の電子機器への影響を低減してきた[1]。しかしながら、従来型電波吸収体は広い周波数帯域に渡って不要電波を吸収できる一方、物理的に大きな寸法(厚み)を必要とするため応用用途が限定的となっていた。

これに対して、近年開発されたメタサーフェスと呼ばれる金属の周期構造を用いることで、電波吸収体を入射波の波長に対して極めて薄い厚みで設計できるようになった(図2左上)[2-4]。なお、ここでメタサーフェス電波吸収体は共振現象を用いており、インダクタンス成分 $L$ とキャパシタンス成分 $C$ によって構成される等価回路によって近似的に表すことができる(図2右上)。しかしながら、これら $L$ 、 $C$ 成分は周波数に対して強い依存性を持っていることから(図2左下)、広帯域に渡って自由空間中とのインピーダンス整合を取ることができず(すなわち入射波を吸収体内部へと取り込むことができず)、結果として従来型電波吸収体と比べて、メタサーフェス電波吸収体は狭帯域特性となる傾向にあった。このため、これまでのメタサーフェス電波吸収体は一部の電波信号の吸収にのみ焦点を当てて開発されてきた。

そこで本研究ではこの狭帯域特性の問題を解決し、超広帯域に渡って不要電波を吸収可能なメタサーフェス電波吸収体を開発することを目指した。具体的なアプローチとしては、図2右下に示すような負のインダクタンス( $-L$ )、負のキャパシタンス( $-C$ )を実現可能なノン・フォスター回路[5]をメタサーフェスに統合する。これにより、メタサーフェス固有のインダクタンス成分 $L$ 、キャパシタンス成分 $C$ を相殺することができ、超広帯域に渡ってインピーダンス整合を取ることができる。その結果、様々な周波数の電波をメタサーフェス内に取り込み、そのエネルギーを効率的に吸収できるようになる。

## 3. 結果

超広帯域メタサーフェス電波吸収体の開発にあたり、まず理論的に吸収特性を評価した。ここで

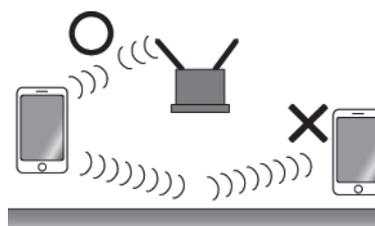


図1. 無線通信機器間における電磁界干渉問題。壁面からの不要散乱波を低減し、良好な通信環境を保つことは重要。

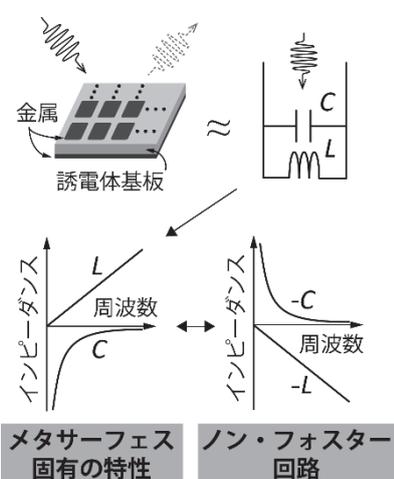


図2. (左上)メタサーフェス電波吸収体による入射電波の吸収と(右上)その等価回路(ただし抵抗成分 $R$ は省略)。(左下)等価回路は周波数に大きく依存(吸収特性も強く影響)。(右下)ノン・フォスター回路で得られる負のインダクタンス・キャパシタンスはメタサーフェスの周波数特性(左下)を相殺可能。

はノンフォスター回路を除いたメタサーフェスの構造(形状)から、等価回路理論によって得られた近似的なキャパシタンス $C_0$ を導出した[6]:

$$C_0 = \epsilon_0 (\epsilon_r + 1) \frac{D}{\pi} \ln \left[ \frac{1}{\sin \left( \frac{\pi W}{2D} \right)} \right]$$

ここで、 $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_r$ 、 $D$ 、 $w$ はそれぞれ真空の誘電率、メタサーフェスの基板の誘電率、メタサーフェスの周期性、パッチ間のギャップ長さを表す。インダクタンス $L_0$ は一般的な伝送線理論の式

$$L_0 = Z_0 \tan(kh)$$

より導出した。ここで、 $Z_0$ 、 $k$ 、 $h$ はそれぞれ真空のインピーダンス、波数、基板厚みを表す。これら等価回路パラメータは図3にあるように並列に接続することで、近似的にメタサーフェスのインピーダンスを表すことができる。ここにノン・フォスター回路によって得られる負のキャパシタンス $-C$ 、負のインダクタンス $-L$ 、抵抗 $R$ を並列に接続した。さらにメタサーフェスの寸法や回路パラメータを調整しながら吸収特性を評価したところ、図4のように非常に広帯域に渡って強い吸収特性が実現された。なお、このような超広帯域吸収特性は数値解析においても確認された(図5参照、ただし等価回路モデルでは省略したパラメータも加味されるため僅かに狭帯域特性となっている)。

次に現実的に実現可能なノンフォスター回路の設計及び数値解析による検証を行った。現実的な

ノンフォスター回路はトランジスタなど増幅素子から構成される。ただし、ここで加えられる直流バイアスによって過剰増幅へとつながり、結果として不安定な回路になってしまう可能性がある。本研究では図6にあるように2つのバイポーラ・ジャンクション・トランジスタ(BJT)を用いてノ

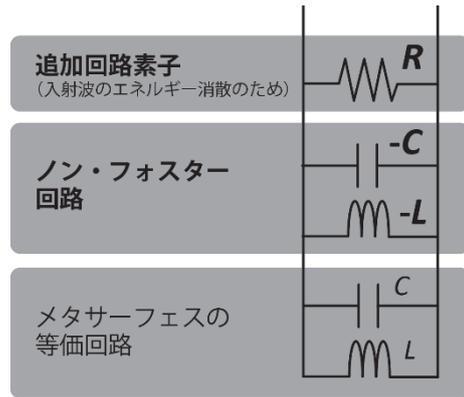


図3. 超広帯域メタサーフェス電波吸収体の等価回路モデル

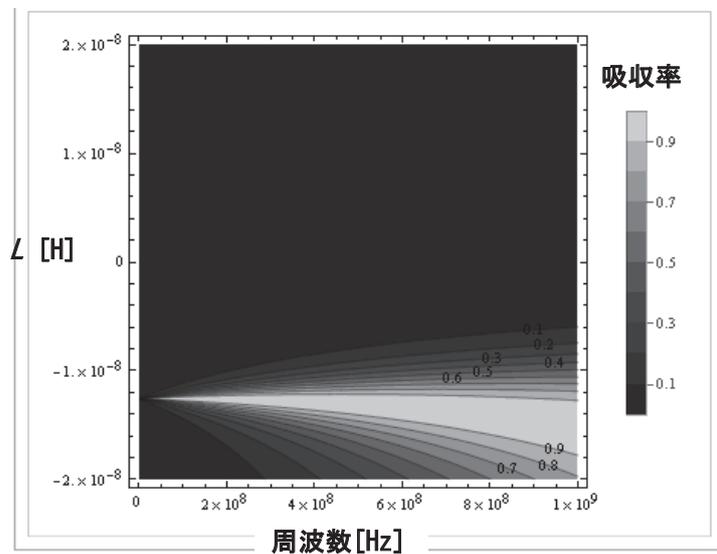


図4. 等価回路モデルによる吸収特性の推定

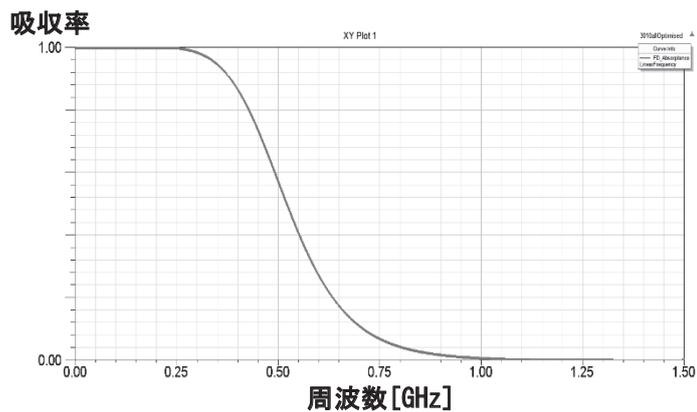


図5. 数値解析による吸収特性(理想的な $-C$ 、 $-L$ :周波数特性なし)

ンフォスター回路を構成した。ここで、安定性の検証を行うためにBJTのコレクタにおける電圧の時間領域応答を図7にプロットした。ここから確認できるように、コレクタにおける電圧は5.6 V付近においてほぼ一定で過剰増幅(励振)していないことが分かる。なお、この回路の散乱パラメータからキャパシタンス成分を算出した所、図8のように負のキャパシタンスが得られていることも確認した。そこで、このノンフォスター回路をメタサーフェスへと接続したところ図9にあるように非常に広帯域で強力な吸収特性を設計することができた。なお、先の図5の吸収特性からは若干狭域特性となっているものの、これは周波数特性を持つ現実的な回路素子によってノンフォスター回路を構成したためと考えられる。ただし、ここで特筆すべき点としてメタサーフェスの設計厚みは10 mm程度であり、周波数100 MHzにおける波長3 mに対して300分の1となる極めて薄い設計厚みとなることが挙げられる。しかしながら、この吸収体は広帯域で強い吸収特性を示していることから、既存の大きな設計厚みを必要とする電波吸収体の代わりに今後幅広く応用されることが期待される。

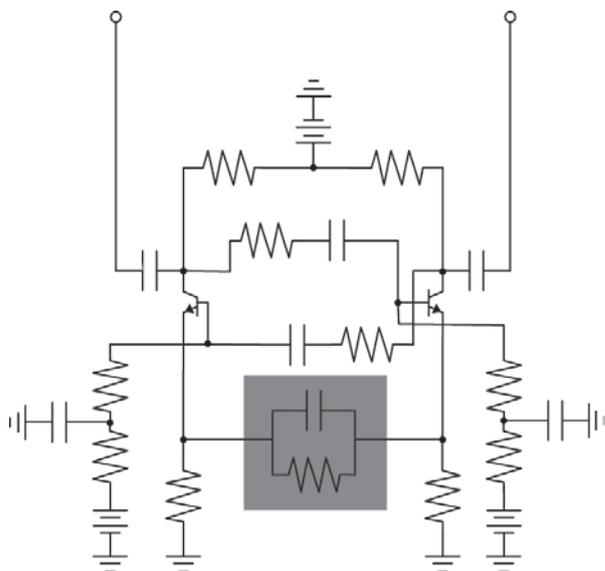


図6. 設計された負のキャパシタンスを示すノンフォスター回路。灰色で示された部分にキャパシタを挿入することで上部からの入力インピーダンスでは負のキャパシタンスを実現。

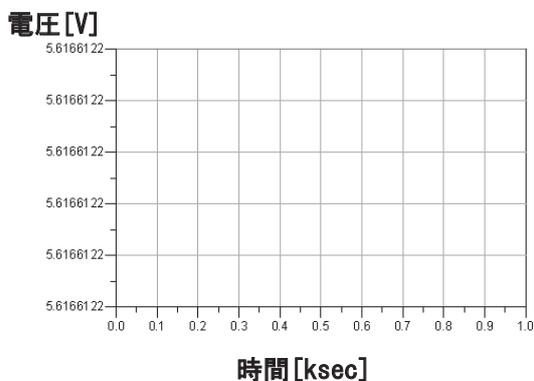


図7. コレクタ電圧の時間領域応答

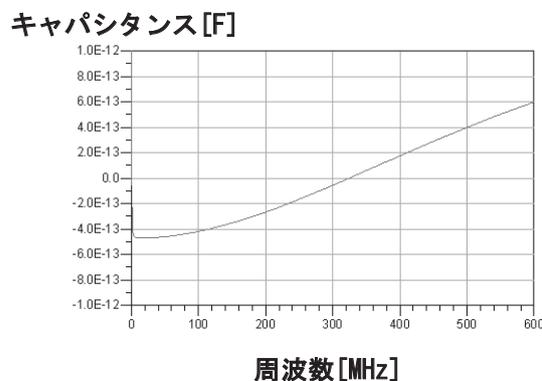


図8. 散乱特性から算出されたキャパシタンス値

## 吸収率

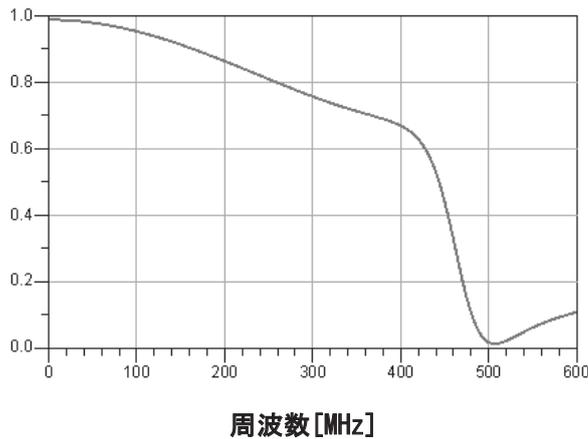


図9. 数値解析による吸収特性(現実的な-C、  
-L:周波数特性あり)。図6のノンフォスター  
回路を使用。

## 4. 結論

本研究では広帯域に渡って電磁界干渉問題を低減可能な超広帯域電波吸収体の開発を行った。特に本研究では理論解析および数値解析シミュレーションに基づいて検証を行った。その結果、薄型電波吸収体として知られるメタサーフェスに、負のキャパシタンス、負のインダクタンスを実現可能なノンフォスター回路を導入することで極めて広帯域な吸収特性を実現することに成功した(設計厚みは動作周波数の波長の300分の1程度)。本研究によって設計された電波吸収体は今後実験によって検証され、その実現可能性について明らかにされる予定である。

## 5. 参考文献

1. E. Knott, *Radar cross section measurements*, SciTech Publishing, 2006.
2. N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J.J. Mock, D R. Smith, and W.J. Padilla, Perfect metamaterial absorber, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 207402, 2008.
3. H. Wakatsuchi, S. Greedy, C. Christopoulos, and J. Paul, Customised broadband metamaterial absorbers for arbitrary polarization, *Opt. Express*, 18, 21, 22187-22198, 2010.
4. H. Wakatsuchi, S. Kim, J.J. Rushton, and D.F. Sievenpiper, Waveform-dependent absorbing metasurfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 245501, 2013.
5. J.G. Linvill, Transistor negative-impedance converters, *Proc. IRE*, 41, 6, 725-729, 1953.
6. O. Luukkonen, F. Costa, C.R. Simovski, A. Monorchio, and S.A. Tretyakov, A thin electromagnetic absorber for wide incidence angles and both polarizations, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 57, 10, 3119-3125, 2009