

[共同研究成果]

大型計算機を用いた電磁波に対して一つの構造で反射/吸収/透過 を実現するメタサーフェスの開発

有馬 卓司

東京農工大学 大学院 工学研究院 先端電気電子部門

筆者は電磁波に対して有効な多機能メタサーフェスを開発したので報告する。メタサーフェスとは自然界に存在しない電気特性を示す人工的な板状構造の総称である。開発した多機能メタサーフェスは、周波数によって電磁波を反射、吸収もしくは透過を一つの構造で実現する。この構造を部屋の窓などに設置すれば、外部から携帯電話の電波は入射するが、無線 LAN などの内部の電磁波は外に出さないようにするなど、利便性を保ったまま情報セキュリティの向上が可能となる。開発には大型計算機による電磁界シミュレーションを用いて行った。

1. はじめに

現在、情報セキュリティに関するインシデントが多く報告されている。電磁波は携帯電話や無線 LAN などで活用されており、生活に無くてはならないものとなっているが、その通信の秘匿性について完全ではない。特に無線 LAN は会社がある建物内などクローズな使用を想定しているが、電磁波の特性上その一部は、建物外に漏洩する。無線 LAN の暗号化を高度化していない環境は多くあり、情報漏洩が心配されている。一方、2000 年頃より電磁波の分野でメタサーフェス[1]と呼ばれる自然界に存在しない電気特性を示す人工的な板状構造が開発されている。この構造を用いることで、電磁波を吸収したり特定の方向に反射させることが可能となり、電磁波の環境改善に広く用いられている。これまで開発されてる電磁波に対するメタサーフェスは、その機能が反射や吸収など役割が一つであった。一方、上述したような利便性を保ったまま情報セキュリティの向上を考えると、ある周波数は透過させ、ある周波数は吸収させるなどメタサーフェスの多機能化が必要である。文献[2, 3, 4]では、一つの構造でありながら特定の周波数の電磁波を反射させ、別の特定の周波数は吸収させる構造が報告されている。この構造は Rasorber (ラソーバー) と名付けられた。本報告でもこの構造を Rasorber と呼ぶ。文献[2]で開発された構造は電磁波の入射角度により、吸収する周波数が変わってしまい、実用化は難しい構造であった。本報告では、入射角度が変わっても周波数特性の変化が少ない構造の開発を行った。Rasorber の開発手法は確立されていないので、シミュレーションを活用し構造を開発する事が必要になる。本報告では、東北大学サイバーサイエンスセンターの大型計算機を用いた電磁界シミュレーションを実施して行った。

2. 角度入射に対して周波数特性変化の少ない Rasorber の開発法

2.1 FDTD 法

本報告では電磁界シミュレーション手法として、FDTD 法[5]を用いた。FDTD 法は解析領域を微小セルと呼ばれる単位格子でモデル化する。その単位格子を示す。FDTD 法では、解析領域の大きさを定義し、その解析領域内を構成する各方向の長さを Δx , Δy , Δz で構成される微小立方体（微小セル）に分けて解析を行う。このセル内に図 1 の右側の図に示すように電界、磁界の各成分を互い違いに配置する。このように FDTD 法において、電界および磁界成分は同じ場所には配置されることは無い。そして、これら電界および磁界に対してマクスウェルの方程式のうち下記に示す

ファラデーの法則およびアンペアの法則を

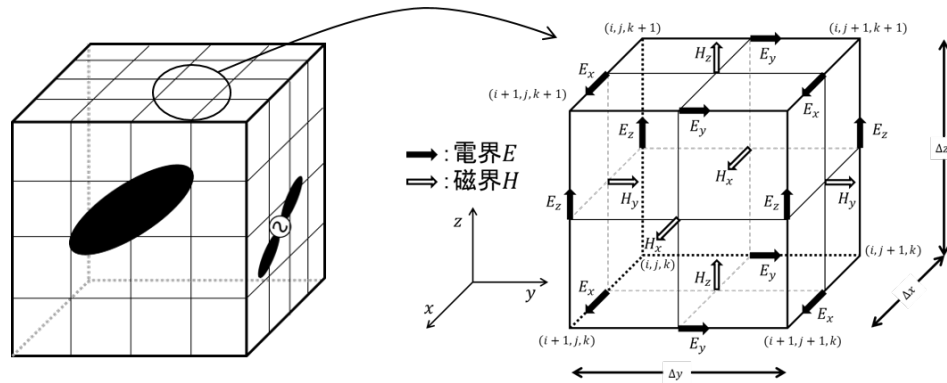


図 1 FDTD 法における解析領域（左）と解析領域を構成する単位電磁界配置（右）

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$$

適応する．ここで， $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{D}, \mathbf{J}, \mathbf{r}, t$ はそれぞれ電界，磁界，磁束密度，電束密度，電流密度，位置ベクトルおよび時間である．FDTD 法は時間領域の手法であり，FDTD 法においては電界と磁界は異なる時間で計算を行う．そのため，ある時間の電界を求めて，その値を元に次の時間の磁界を求めるという手法である．そして，その計算を逐次繰り返して，電磁界の時間を進めて時間応答を求める事が出来る．また，周波数領域の値が必要な時は，時間領域の結果をフーリエ変換することにより求める事が出来る．次に FDTD 法の計算に必ず必要となる吸収境界条件について述べる．FDTD 法においては，計算領域はいわゆる閉領域の解析であり，非常に大きな空間中に置かれた放射源や散乱体の解析を行うには，計算領域を反射がないとる境界で閉じておく必要がある．この境界を吸収境界 (Absorbing Boundary Condition : ABC) という．この条件が完全でないと，解散領域の境界で反射が起こり，解析結果に誤差が生じる．FDTD 法においては，吸収境界条件は解析精度に影響を与えることから，様々な手法が提案されてきた．本稿では，その中でも最も有効であるとされる Berenger の PML (Perfectly Matched Layer) を用いている．Berenger の PML 吸収境界条件は，必要とされる計算機資源が増加するが，最も有効な吸収境界条件である．PML の基本概念は解析空間のインピーダンスと整合の取れた仮想的な損失媒質を考える．するとこの仮想媒質に入射した電磁波は反射することなく，さらに仮想媒質中を進むにつれて減衰する．よって解析空間から見ると電磁波が吸収され，吸収境界が実現できる．吸収境界を含む FDTD 法の詳細は，文献[5]に記載されているので参照していただきたい．

2.2 開発した Rasorbar の構造

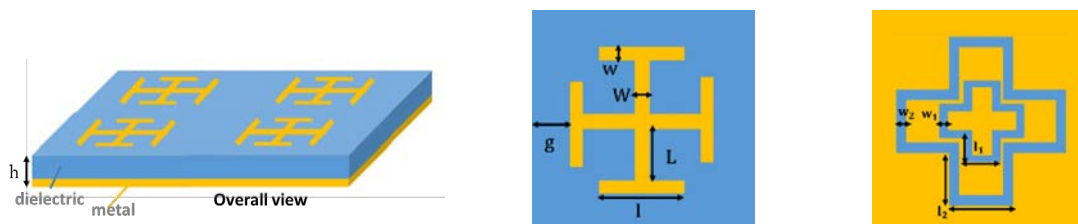


図 2 全体的な構造（左） 上面の構造（中） 下面の構造（右）

図 2 に開発した Rasorbar の構造を示す．図 2 では黄色が金属，青は誘電体を示す．Rasorbar

は上面に誘電体の上に金属板を配置し、その裏面には、金属板にスリットと呼ばれる隙間を配置して実現される．簡単に Rasorber の動作原理を説明する．上面の金属と下面のスリットは補対の関係になっている．上面の金属構造に共振する周波数では、共振した電磁波が裏面のスリットを通して裏面に放射されるので、電磁波を透過させる．また、上面の構造と裏面の基板の間で起きる共振では、電磁波は基板内に閉じ込められ、基板の導電損失により電磁波は吸収される．これ以外の周波数では、裏面の基板により電磁波は反射される．本報告では、透過させる周波数を 6.5[GHz]、吸収させる周波数を 8.5[GHz]と設定した．そして、その構造について東北大学サイバーサイエンスセンターの大型計算機を用いて繰り返し電磁界シミュレーションを実施し、構造のパラメータを模索した．最終的な構造のパラメータを表 1 に示す．

表 1 構造のパラメータ (単位：ミリ)

g	w	l	W	L	W ₁	W ₂	l ₁	l ₂
1.20	1.20	7.20	1.20	5.60	0.40	0.40	3.20	4.00

2.3 結果



図 3 Rasorber の透過と吸収の結果

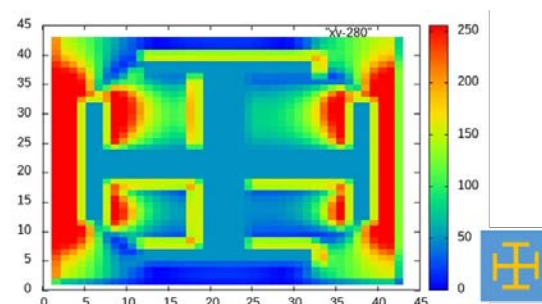


図 4 Rasorber 上面の電流分布 (6.5GHz)

開発した構造の反射および透過特性を図 3 に示す．赤い線は Rasorber からの反射量を示し、緑の線は透過量を示している．図中に示すように、6.5[GHz]では、反射量が減り逆に透過量が増えている．これは、この周波数で電波が透過していることを示す．また、8.5[GHz]では反射量および透過量ともに減少している．これは電磁波が Rasorber に吸収されていることを示している．図中には赤系統の線および緑系統の線がそれぞれ 2 本ある．これは入射角度の違いであり、1 本は垂直入射、もう 1 本は 75 度の角度で入射した結果である．それぞれの色の 2 本の線はほぼ重なっており、入射角度によって周波数特性が変わらないことが分かる．図 4 に構造表面の電流分布を示す．このように強い電流が生じており 6.5[GHz]で共振していることが分かる．次に入射角に対して周波数がどれくらい変化するかを、文献[3]の構造と比較し開発した構造の優位性を示す．周波数の変化を

$$D[\%] = \frac{f_0 - f_{75}}{f_0} \times 100$$

で定義する．ここで、 f_0 は垂直入射での共振周波数、 f_{75} は 75 度から電波が入射した際の共振周波数である．文献[3]の構造では、吸収する周波数および透過する周波数は 3.0%および 3.2%ずれるのに対し、開発した構造ではそれぞれ 0.46%および 0.45%のずれにとどまっており優位性が分かる．

2.4 周波数の調整

最後に, Rasorber の透過および吸収の周波数を現在使われている周波数に調整した特性を示す. Rasorber を窓や壁に貼り, 携帯電話で現在広く使われている 3.4~4.1[GHz]の電磁波は透過させ, 社内で使う周波数 5.2[GHz]の無線 LAN は漏洩させないように吸収させる構造の開発を, 大型計算機によるシミュレーションにより行った. 結果を図 5 に示す. このように開発した構造はパラメータを調整する事により比較的容易にターゲット周波数を調整することが出来る.

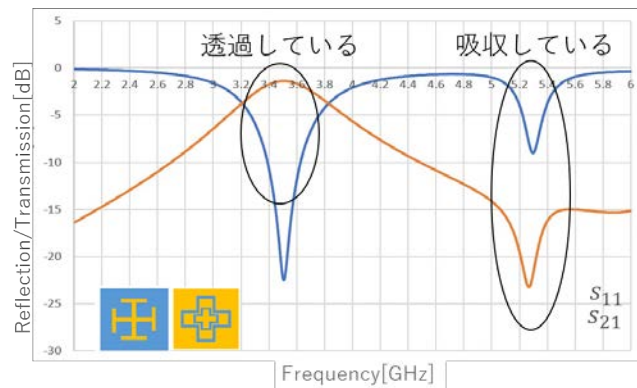


図 5 周波数を調整した Rasorber

3. まとめ

本報告では, 周波数によって電磁波を反射, 吸収もしくは透過を一つの構造で実現する Rasorber に対し, 高角度入射してもその特性が変わらない構造を開発した. 従来の構造と周波数のずれを定量的に評価したが, 大幅にその角度依存性を低減できた. 開発においては, 大型計算機を用いた電磁界シミュレーションにより行い, 効率的に開発が出来た. また, その周波数はパラメータを調整する事により適宜調整できることを示した.

謝辞

本研究は, 東北大学サイバーサイエンスセンターに設置されている大型計算機を活用することで実現することができた. また, 研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた.

参考文献

- [1] 宇野, 道下, “メタマテリアルアンテナの基礎” コロナ社, 2021
- [2] Mehran Manzoor Zargar, Archana Rajput, Kushmanda Saurav, Shiban Kishen Koul ‘Polarisation-insensitive dual-band transmissive rasorber designed on a single layer substrate’ IET Journals, 2020
- [3] Minhua Li a, Congying Huang b, Chengye Huang a, Youting Song a, Hanru Shao a, Jianfeng Dong a “Graphene integrated rasorber at terahertz frequencies with functionalities of both absorption and transmission” Results in Physics Volume 41, October 2022
- [4] X. Q. Jia, Q. Chen, Q. An, Y. J. Zheng, Y. Q. Fu “Low-pass spatial filter based on 3D metamaterial rasorber with wideband absorption at high frequency” RESEARCH ARTICLE, MAY, 18, 2020
- [5] 宇野, 何, 有馬, “数値電磁界解析のための FDTD 法- 基礎と実践-”, コロナ社, 2016