

[共同研究成果]

周期構造上に置かれたアンテナの解析手法の開発

有馬 卓司, 宇野 亨

東京農工大学 大学院工学研究院 先端電気電子部門

現在、電磁波が広く用いられているが、これらは使用する周波数によってアンテナの大きさが決まってしまう。一方、近年メタマテリアル技術が注目されており、メタマテリアル技術を用いることで電磁波の波長を任意に制御できることから、アンテナの小型化が可能になり、これまで電磁波の利用が難しい分野においても電磁波の利用が期待されている。メタマテリアルとは、マイナスの誘電率・透磁率やマイナスの位相速度などを実現する人工的な構造である。メタマテリアルは一般的に同じ構造を並べて作成する周期構造により実現される。本研究では、メタマテリアル上に配置されたアンテナの特性を、大規模数値解析を行い明らかにした。本成果は今後電磁波の応用範囲を広げるものでありその意義は大きいと考える。

1. はじめに

メタマテリアル技術[1, 2, 3]とは、人工的な構造によって負の誘電率や負の透磁率、負の位相速度などを実現する技術の総称である。筆者らのグループでは、メタマテリアルの可能に惹かれ、大型計算機を用いたシミュレーションによる開発および実験によってその有効性の確認を行ってきた。図1に示す構造はマッシュルーム型EBG (Electromagnetic Band Gap)構造と呼ばれるメタマテリアルである。この構造は、構造上で磁界をゼロにできる磁気壁として動作することが知られている。なお、自然界には磁気壁として動作する構造は存在しない。図2に示す構造は、SRR (Split Ring Resonator) と呼ばれる構造である。この構造は、負の透磁率を実現する事が出来る。自然界の媒質で、負の透磁率を示す構造は存在しないのため、SRRもメタマテリアル構造と呼ばれる。図3に示す構造は、筆者らのグループで開発を行った、負の誘電率を示す構造である。筆者らのグループにおいてはこの構造を用いる事で、波長よりも十分小さな電界を存在させることに成功している[4]。これらメタマテリアルは図1, 2, 3からも分かるように同じ構造を並べて実現される。これらは周期構造と呼ばれる。筆者らはこれらの構造をアンテナ近傍で使用することでアンテナの特性をより良くする研究を行っている。この技術を開発するには、数値シミュレーションを行う事が効率的である。このシミュレーションには、FDTD法 (Finite Difference Time Domain method) [5, 6]を用いている。この法はマクスウェルの方程式を時間領域で、空間と時間について直接差分する差分法の一つであるために、多くの計算時間がかかることが知られている。しかし、FDTD法は時間領域の解法であるために電磁界の複雑なふるまいを容易に知る事が出来る。本報告では、FDTD法を用いた周期構造上に置かれたアンテナの解析手法の開発について述べる。本研究を効率よく遂行するためにFDTD法のアルゴリズムおよびプログラムの観点からの高速計算技術は必要不可欠である。そこで、FDTD法のプログラミング技術による高速化について、東北大学サイバーサイエンスセンターの多大な協力を得た。

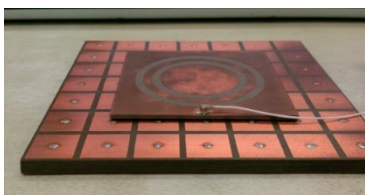


図1 EBG構造



図2 SRR構造

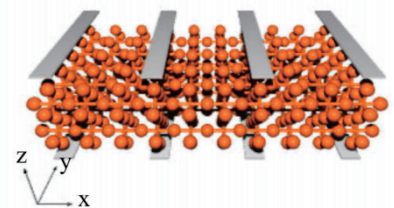


図3 負の誘電率を実現する構造

2. FDTD 法による周期構造上に置かれたアンテナの解析

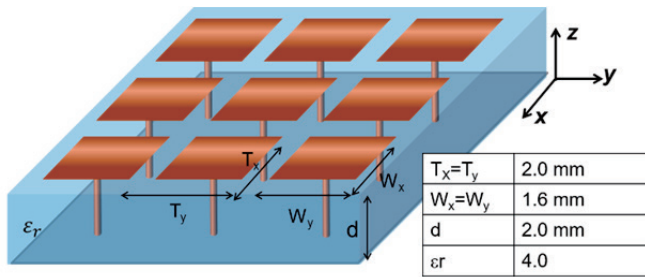


図4 EBG 構造とパラメータ

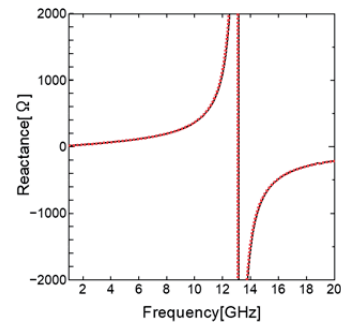


図5 表面インピーダンス

ここでは、図4に示す EBG 構造上に置かれたアンテナの特性を FDTD 法を用いて効率的に解析する手法について述べる。まず、図4に示すパラメータを用いて、この構造の表面インピーダンスを FDTD 法により調べた。その結果を図5に示す。この結果より 13GHz においてインピーダンスが無限大となっており、磁壁として動作していることが分かる。一方、FDTD 法において実際の構造をモデル化すると莫大な計算時間が必要となってしまう。そこで、図5に示すインピーダンス特性のみをシミュレーションに組み込む事が出来れば大幅な計算量低減が可能となる。FDTD 法における電界磁界の空間配置を図6に示す。また、周波数領域における電界 E_x 、磁界 H_y と表面インピーダンス Z_s の関係は(1)式で表される。

$$E_x(\omega) = Z_s(\omega)H_y(\omega) \quad (1)$$

$$E_x(t) = Z_s(t) * H_y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Z_s(\tau)H_y(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

FDTD 法は時間領域の解法であるために、(1)式をフーリエ変換し時間領域で示すと(2)式の畳み込み積分の表記となる。畳み込み積分を組み込むには大きな計算資源が必要となるが、ここでは PLRC(Pricewise Liner Recursive Convolution) 法[7, 8]を用いた。このように本研究では、図4に示す複雑な EBG 構造を直接モデル化せず、表面インピーダンスで置き換える。また、FDTD 法により求めた表面インピーダンスは図5に示すように数値データである。この数値データを FDTD 法に組み込むために、本研究では(3)式で示す有理関数に近似する。

$$Z_s(s) = \frac{sA_1}{s^2 + p_{c1}^2} + \frac{sA_2}{s^2 + p_{c2}^2} \cdots + \frac{sA_N}{s^2 + p_{cN}^2} \quad (3)$$

(3)式中で s は周波数に関するパラメータであり、 A および P は未定係数でありこれら係数を適切に設定することで、FDTD 法で求めた表面インピーダンスを、(3)式に近似した。

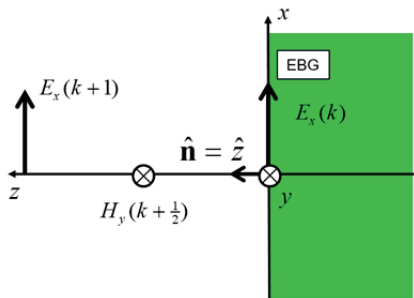


図6 FDTD 法のセル配置

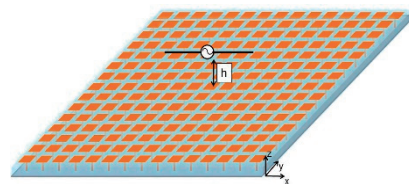


図7 周期構造上に置かれたアンテナ

3. 周期構造の電磁界特性

2章において説明した手法を用いて、実際に周期構造上に置かれたアンテナの解析を行った。解析モデルは図7に示すように、図4に示す周期構造上に全長10mmのダイポールアンテナが配置されたモデルとした。解析には東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータSX-ACEを用いた。また、参考に提案する表面インピーダンスを用いずに、実際のEBG構造をモデル化したモデルでの解析も行い同時に結果を示している。実際にEBG構造をモデル化した際は、15周期×15周期のEBG構造を用いている。入力インピーダンスの解析結果を図8に示す。解析においては、EBG構造とアンテナとの距離 h を10mm、7.5mmおよび5mmと変化させた。

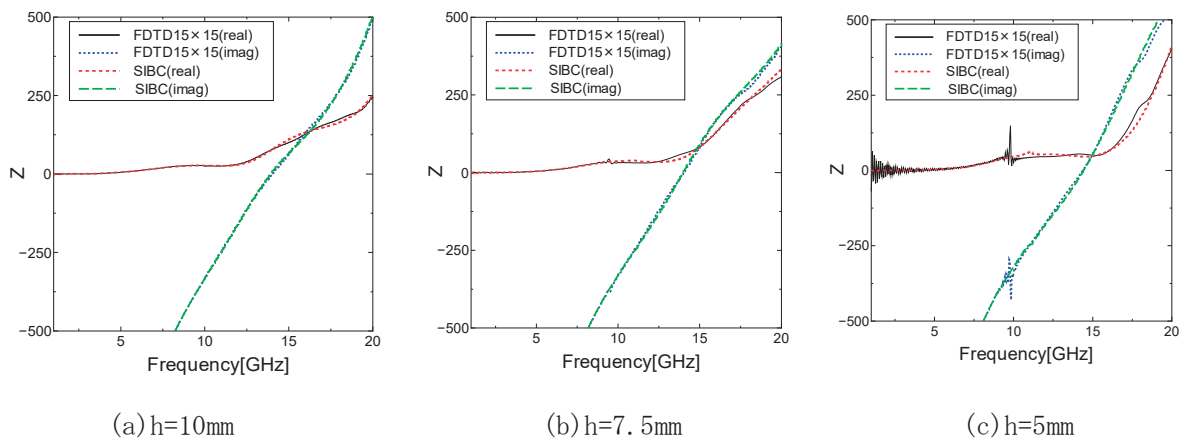


図8 周期構造上のアンテナの解析結果

図中において、SIBCと示しているのが2章で述べた解析手法を用いて解析した結果である。また、図中でFDTDと表記しているのは、実際にEBG構造をモデル化した結果である。これら結果はよく一致しており提案する手法の有効性が分かる。また、アンテナとEBGの間隔が狭くなると、通常のFDTD法では、結果に乱れが生じている。これは、FDTD法が時間領域の解法であり、解が定常状態になるまで多くの時間を要し、この解析では解が収束しきっていないことを示している。このことから提案する手法が有効であることが分かる。また、FDTD法は構造をモデル化するために、解析空間を離散化してモデル化している。図8に示した解析結果において空間の離散間隔

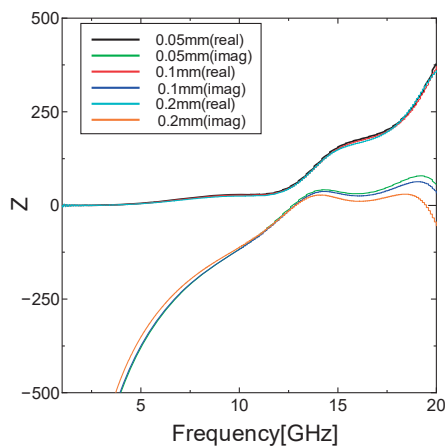


図9 離散間隔の変化

は0.05mmとしている。この離散間隔が小さくなると計算コストが大幅に増加する。しかし、EBG構造のように微細な構造を解析するには非常に細かな離散間隔を用いなければならず、結果として多くの計算コストがかかる。これに対して、提案した手法は実際のモデルを用いているため任意に離散間隔を変化させることができる。提案手法において、離散間隔を変化させた結果を図9に示す。この結果においては、離散間隔を0.05mmから0.2mmまで変化させている。このように結果はおおむね同じであり提案する手法は大幅に離散間隔を大きくできることを示している。これは計算量の削減につながる。以上の結果より提案手法の有効性が分かった。

4. まとめ

本研究では、周期構造上に置かれたアンテナの有効な解析手法を示した。提案手法ではメタマテリアルの一種である EBG 構造の電気的特性に注目し、その特性のみをモデル化する手法を提案した。提案手法では表面インピーダンスを用いている。そして、周期構造上に置かれたダイポールアンテナのインピーダンス特性を解析しその結果を示した。解析結果より提案手法は有効であることが分かった。また、FDTD 法の欠点の一つである、離散間隔を解析モデルに合わせなければいけない点についても提案手法を持ちることにより、離散間隔を任意に選べる。今後は、提案手法を用いて様々なアンテナの開発を行う予定である。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターの協力を頂き実施した。特に東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を利用することで効率的に研究を行うことができた。また、FDTD 法のプログラムの高速化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。ここに謝意を示す。

参考文献

- [1] Fan Yang, and Yahya Rahmat-Samii, “Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering.” Cambridge University Press, 2009.
- [2] S. Tretyakov, “Analytical Modelling in Applied Electromagnetics.” Artech House Inc, 2003.
- [3] C. L. Holloway, M. A. Mohamed, E.F. Kuester, and A. Dienstfrey, “Reflection and Transmission Properties of a Metafilm: With an Application to a Controllable Surface Composed of Resonant Particles”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 47, No. 4, pp.853-865, Nov. 2005.
- [4] Yujiro Kushiya, Takuji Arima, and Toru Uno, "Experimental verification of spoof surface plasmons in wire metamaterials," Opt. Express 20, 18238-18247 (2012)
- [5] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [6] 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法, コロナ社, 2016.
- [7] J. F. Douglas and E. J. Garboczi, “Intrinsic viscosity and the polarizability of particles having a wide range of shapes,” Advances in Chemical Physics, I. Prigogine and S. A. Rice, Eds. John Wiley & Sons, Inc. , vol.91, pp. 85–153, 1995.
- [8] P. A. Belov, R. Marques, S. I. Maslovski, I. S. Nefedov, M. Silveirinha, C.R. Simovski, and S. A. Tretyakov “Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit”, PHYSICAL REVIEW B 67, 113103 ,2003