

TSUBAME 共同利用 令和 5 年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 GPU クラスタを用いたミリ波帯大規模広帯域電波伝搬シミュレーション

英文: Large-Scale Propagation Simulations of Ultra-Wideband Electromagnetic Fields in Millimeters and Terahertz Wave Frequencies Using GPU Cluster

チャカロタイ ジェドヴィスノブ
Jerdvisanop Chakarothai国立研究開発法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology
<https://www.nict.go.jp>

ミリ波帯・テラヘルツ帯における電波は他の周波数帯と比較して、電波の直進性が大きく、見通し伝搬の形態で利用されることが多い。しかし、ひとたび電波伝搬経路のフレネルゾーン内に吸収体・散乱体・反射体などの障害物が存在すると、受信電力の予測手法の複雑さが増大し、不確かさが大きくなる。特に屋内伝搬環境は、壁、天井、机、棚や椅子等の様々な障害物が存在し、伝搬状況を正しく予測することは困難である。また、ミリ波帯電波の波長は非常に短いため、物体の表面粗さが散乱特性に影響を与える可能性がある。そこで、本研究では、異なる表面粗さが散乱特性に与える影響を調べる。まず、本研究で用いる全電界／散乱界 FDTD 法の妥当性を確認するために、大きさ $30\lambda \times 30\lambda$ の完全導体板からの散乱特性を FDTD 法およびモーメント法によって解析し、両者を比較した。両者が完全に一致したため、本研究で開発した手法の妥当性を確認することができた。次に、異なる表面粗さを有する大きさ $30\lambda \times 30\lambda$ の表面のランダムな凹凸構造を 50 パターン生成してその散乱特性を統計的に処理し、評価した。その結果、表面粗さが約 $\lambda/4$ 以上となると、鏡面方向の散乱がほぼ拡散成分よりも小さくなり、拡散成分が主な散乱になることが分かった。最後に、異なる入射角度の場合の表面粗さが散乱特性に与える影響について調べた。今後は、解析モデルを拡大させ、より実物に近い構造を解析する予定である。

Electromagnetic (EM) waves in the millimeter-wave and terahertz bands are often used in a line-of-sight situation. However, once obstacles such as absorbers, scatterers, or reflectors exist within the Fresnel zone of the EM wave propagation path, the complexity of predicting received power and uncertainty of receiving power increases. Indoor environments, in particular, contain various obstacles such as walls, ceilings, desks, shelves, and chairs, making it difficult to accurately predict receiving power. Additionally, due to the very short wavelength of millimeter-wave EM waves, the surface roughness of objects may affect scattering characteristics. Therefore, in this study, to investigate the effects of different surface roughness on scattering characteristics, we first confirmed the validity of the total-field/scattered-field FDTD method used in this research. We analyzed the scattering characteristics from a $30\lambda \times 30\lambda$ perfect conductor plate using both the FDTD and the moment method. Then, we compared each other results and found that both results are in a good agreement, demonstrating the validity of the method. Next, we generated 50 patterns of random concave-convex structures on a $30\lambda \times 30\lambda$ surface with different surface roughness, and statistically processed their scattering characteristics. As a result, we found that when the surface roughness becomes about $\lambda/4$ or greater, the specular scattering becomes smaller than diffuse components, and only the diffuse components become the main scattering part. Finally, we investigated the effects of surface roughness on scattering characteristics for different incident angles.

Keywords: millimeter-wave, FDTD, surface roughness, random structure

背景と目的

5G 無線通信や Beyond 5G の次世代無線通信技術は主にミリ波帯電波が利用される。しかしながら、ミリ波帯電波の伝搬経路のフレネルゾーン内に吸収体・散乱体・反射体などの障害物が存在すると、受信電力の予測手法の複雑さが増大し、不確かさが大きくなる。また、波長が非常に短いため、物体の表面形状等による散乱が生じ、従来のレイトレーシング法や光学近似法による高精度な解析が困難である。特にオフィス等の屋

内電波環境においては、様々な障害物によって電波が散乱され、複雑な電波環境を形成するため、受信電力を正確に予測することが難しい。そこで、本研究では、様々な伝搬環境(特に室内環境)におけるミリ波帯電波の受信電力を高精度に予測するために、電磁界シミュレーション技術によって、物体の表面粗さが散乱特性に与える影響について調べることを目的としている。

概要

本研究では、ミリ波帯(特に 5G 無線通信に使われる 28 GHz 帯や次世代無線通信で使われる 300 GHz 帯)における電波の受信電力を高精度に予測するために、TSUBAME3.0 GPU クラスタを用いた大規模並列化電磁界シミュレーション技術を開発した。解析に用いた計算手法は、電磁界解析でよく使われている時間領域有限差分(Finite-difference time-domain, FDTD)法である[1]。これまで、既にオフィス等の屋内伝搬環境において物体形状を忠実に再現できるようにプログラムを改良した[2]-[5]。また、新たな機能的な構造物(リフレクトアレー)を解析空間に組み込むために、表面インピーダンスに対して、FDTD 法の定式化を行い、提案する手法の妥当性についても検討を行った[6], [7]。

一方で、ミリ波帯電波は非常に波長が短いため、物体表面構造が散乱特性に影響を与える可能性がある[8], [9]。よりミリ波帯電波伝搬解析を忠実に再現できるようにするために、表面粗さを考慮する必要があるが、表面粗さがどのように散乱特性に影響を与え、実際に電磁界解析の中に表面粗さをどのように等価的に考慮するかをこれまで検討が少ない。そこで、本研究では、表面粗さを变化させた凹凸の表面構造からの散乱断面積の統計的な値を求め、表面粗さが散乱特性に与える影響について定量的に評価を行った。その結果、表面粗さが約 $\lambda/4$ 以上になると、鏡面方向への散乱成分よりも拡散成分の方が強くなることが示された。

解析手法および解析モデル

本研究における表面構造の解析は、すべて全電界/散乱界を含む時間領域有限差分法 (FDTD 法) を用いて行った[10]。解析モデルの解像度は、0.5 mm で、8層の完全整合層 (Perfectly matched layers)[11]を含めた解析領域は、 $641 \times 641 \times 91$ セルである。解析周波数は 30 GHz である。まず、解析手法の妥当性を確認するために、大きさ $30\lambda \times 30\lambda$ ($30 \times 30 \text{ cm}^2$) を有する非常に薄い完全導体(PEC)板からの散乱断面積の解析を行った。図 1 に開発した FDTD 法による解析結果とモーメント法による解析結果を示す。両者は非常によく一致しており、本手法の妥当性を確認することができた。

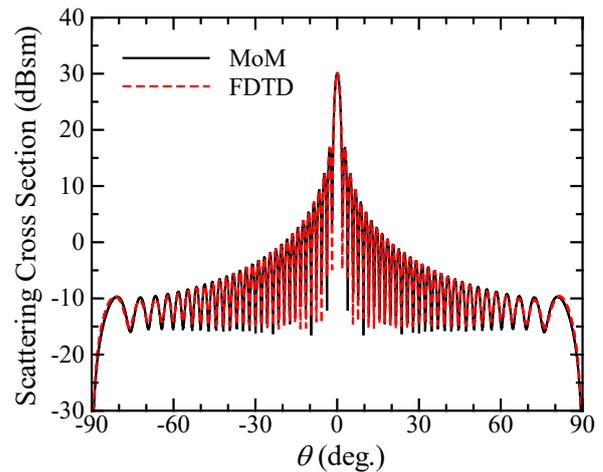


図 1 大きさ $30\lambda \times 30\lambda$ の完全導体板の散乱断面積 (FDTD 法: 赤点線, モーメント法: 黒実線)

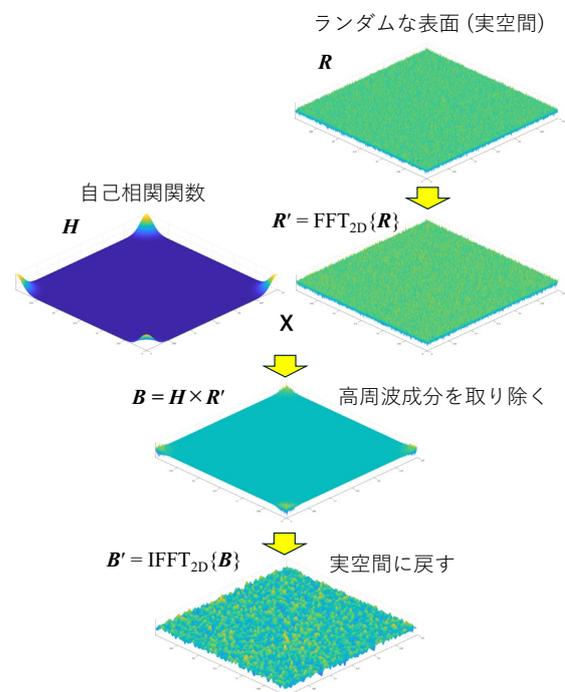


図 2 ある特定の表面粗さを有する表面構造の生成手順

次に、特定の表面粗さを有する凹凸の表面構造の生成法について述べる。図 2 に生成手順を示す。まず、(1) 実空間においてランダムな高さを有する凹凸の表面構造 R を作り、(2) 波数空間へ変換するために 2次元フーリエ変換を適用して自己相関関数 F と掛け算を行う。自己相関関数 H は次式で表すことができる。

$$H(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2F^2}\right) \quad (1)$$

ここで、 x, y は平面上の座標を表し、 F は自己相関長である。本研究では、 $F = 15 \text{ mm}$ とした。(3) 次に、自己相関関数によって高周波成分を取り除き、2次元逆フーリエ変換を行えば、ある自己相関長を有する表面構造を

生成することができる。最後に、(4) 高さ方向の平均値および分散を求め、分散が特定の表面粗さに等しくするように構造の高さを調整する。以上の手順によって指定した表面粗さを有する表面構造を作ることができる。

本研究において、 $F = 15 \text{ mm}$ として表面粗さ $\sigma = 0.5 \text{ mm}$, 1.5 mm および 2.5 mm の 3 つの条件でそれぞれ 50 パターンの表面構造を生成した。図 3, 4, 5 にそれぞれ $\sigma = 0.5 \text{ mm}$, 1.5 mm , 2.5 mm の表面構造の一例を示す。各図において断面の構造からわかるように、表面粗さが大きければ大きいほど、より凹凸の変化が大きくなる。なお、表面の厚さは平均して 12.5 cm 、大きさは PEC 板と同じく、 $30\lambda \times 30\lambda$ ($30 \times 30 \text{ cm}^2$) とし、材質は PEC とした。計算ステップ数は 2000 である。すべての計算は、TSUBAME3.0 上で行い、複数ノード(一度の計算で 16 ノードを使用)による並列化を行うことにより、非常に短時間で終わることができた。一つの解析モデルに対する計算時間は、各ノード(Intel Xeon E5-2680 v4, 14 core x 2, 2.4GHz)上で OpenMP による 22 コアの並列計算で、約 19 分 10 秒(1150 秒)で終わることができた。大規模な解析モデルに対する数値計算のみならず、本研究のように統計的な解を求めるときにも TSUBAME の計算環境は非常に有効であることが示された。

結果および考察

図 5 に開発した FDTD 法による垂直入射時 ($\theta_{\text{inc}} = 0^\circ$) の表面粗さ $\sigma = 1.5 \text{ mm}$ の表面構造からの散乱電界を示す。図内に示す白い破線の内側は全電界を表し、外側は散乱界のみを示している。図 5 に示すように、散乱電界は非常に複雑な分布を示しており、鏡面方向へ寄与する成分と様々な方向へ拡散する成分から成り立っている。これらの成分を電磁界分布から直接分離することが難しいが、散乱断面積を求めることによってそれぞれの成分の寄与度を推定することができる。

図 6 に垂直入射時の表面粗さを変化させたときのそれぞれの表面構造からの散乱断面積の平均値を示す。サンプル数は 50 個である。同図には、同じ大きさを有する PEC 板からの散乱断面積も示している(黒実線)。PEC 板の最大値は、 30.03 dBsm である。一方、図 6 からわかるように、表面粗さ σ が大きくなればなるほど、散乱断面積の最大値(鏡面方向への散乱)は小さくな

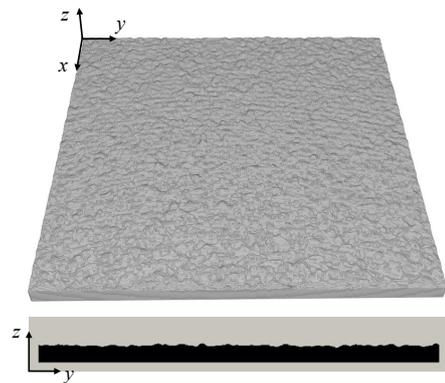


図 3 表面粗さ $\sigma = 0.5 \text{ mm}$ ($\lambda/20$) の表面構造の一例

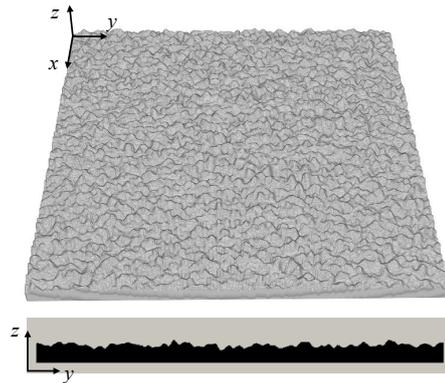


図 4 表面粗さ $\sigma = 1.5 \text{ mm}$ ($\lambda/6.67$) の表面構造の一例

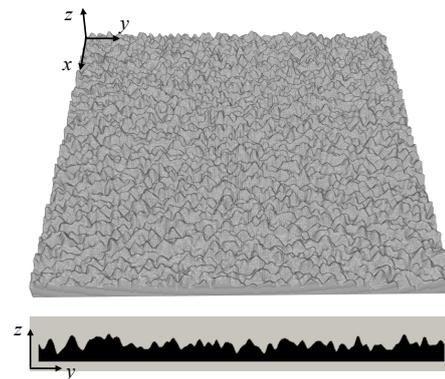


図 5 表面粗さ $\sigma = 2.5 \text{ mm}$ ($\lambda/4$) の表面構造の一例

っていく。 $\sigma = \lambda/20$, $\lambda/6.67$, $\lambda/4$ の散乱断面積の最大値は、それぞれ 28.49 dBsm , 15.17 dBsm , 2.29 dBsm である。一方、拡散成分は垂直入射時 $\theta = 0^\circ$ において約 -2.10 dBsm であると推定される。 $\sigma = \lambda/4$ のとき、鏡面方向散乱成分と拡散成分との差は 4.39 dB である。従って、表面粗さが $\lambda/4$ 以上となると、散乱特性への主要な寄与成分は拡散成分となることがわかる。加えて、図 6 からわかるように、拡散成分の平均値は、ほぼ PEC 板の拡散方向の散乱断面積と同程度であることがわかる。さらに、 $\sigma = \lambda/6.67$ ととき $\sigma = \lambda/4$ のときの拡散成分がほぼ一致していることから、表面粗さを大きくしても拡散成分を増やすことができないことが分かる。

一方、垂直入射時の表面粗さを変化させたときのそ

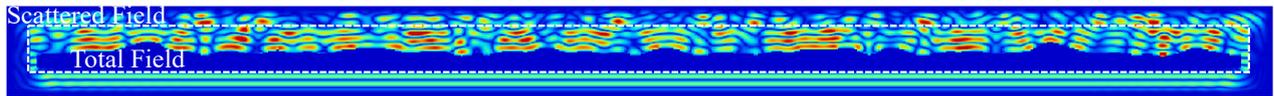


図5 表面粗さ $\sigma=1.5$ mm の表面構造からの散乱電界

それぞれの表面構造からの散乱断面積の最大値を求めて、図7に示す。鏡面方向への散乱断面積の最大値は $\sigma=\lambda/20, \lambda/6.67, \lambda/4$ のとき、それぞれ28.54 dBsm, 16.13 dBsm, 5.92 dBsm と算出でき、散乱断面積の平均値とほぼ変化ない(特に表面粗さが小さいとき)が、拡散方向の散乱断面積は平均して、約4.5 dB上昇することが図7からわかる。実際に、ミリ波帯の電波伝搬解析において表面粗さを考慮するためには最大値か平均値のどちらを用いることによって解が変わるため、今後検討していくことが必要である。

最後に、一例として入射角度 $\theta_{inc} = 45^\circ$ としたときの表面粗さ $\sigma=2.5$ mmのときの散乱断面積の最大値および平均値を示す。鏡面方向での散乱断面積は最大値と平均値でそれぞれ3.37 dBsmと-0.49 dBmである。垂直入射時の散乱断面積よりも値が小さくなるのがわかる。これは、入射角度が大きくなることによって、有効な開口面積が小さくなるからである。一方で、拡散成分の最大値および平均値の差は、約5.7 dBであり、垂直方向時よりも高くなることが分かった。今後は、入射角度による依存性をより詳細に調べる予定である。

まとめ、今後の課題

本研究では、ミリ波帯において、物体の表面粗さが散乱特性に与える影響についてFDTD法を用いて解析を行った。表面粗さの異なる凹凸のある表面構造を50パターン生成し、散乱断面積を求めた。その結果、表面粗さが大きくなればなるほど、鏡面方向へ散乱(反射)する成分が小さくなる一方、拡散する成分が大きくなる。表面粗さが約 $\lambda/4$ 以上になると、鏡面方向への散乱成分よりも拡散成分の方が強くなることが示された。また最大値および平均値で比較した結果、両者には約4~6 dBの差があり、実際に大規模電磁界解析に表面粗さを有する構造の散乱特性をどのように組み込むかを検討する必要がある。

今後の課題として、自己相関長、材質や表面構造の大きさなどを変化させて散乱特性にどのように影響を与えるかを詳しく調べる予定である。

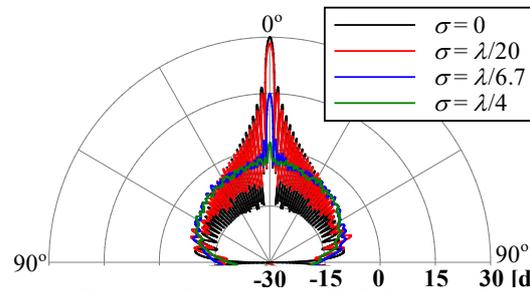


図6 表面粗さを変化させたときの散乱特性の平均値(サンプル数=50)

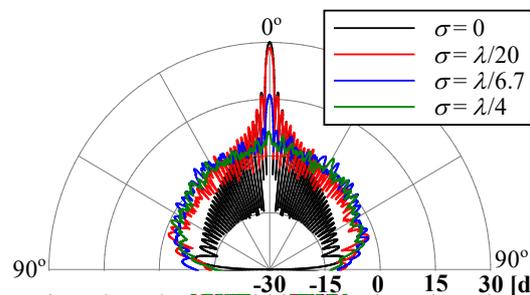


図7 表面粗さを変化させたときの散乱特性の最大値(サンプル数=50)

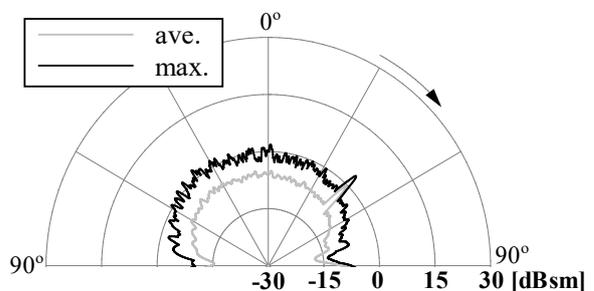


図8 入射角度 $\theta_{inc}=45^\circ$ のときの表面粗さ $\sigma=2.5$ mmの表面構造からの散乱特性(灰色:平均値, 黒:最大値)

参考文献

- [1] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-14, no. 3, pp. 302-307, May 1966.
- [2] J. Chakarothai, K. Wake, S. Watanabe, "Scalable GPU-parallelized FDTD method for analysis of large-scale electromagnetic dosimetry problems," *Applied Computational Electromagnetics (ACES) Journal*, vol. 31, no. 6, pp. 661-668, June 2016.
- [3] J. Chakarothai, "Novel FDTD scheme for analysis of frequency-dependent medium using fast inverse Laplace

transform and Prony's method," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 67, no. 9, pp. 6076-6089, Sep. 2019.

[4] J. Chakarothai, S. Watanabe, K. Wake, "Numerical dosimetry of electromagnetic pulse exposures using FDTD method," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 66, no. 10, pp. 5397-5408, Oct. 2018.

[5] チャカロタイジエドヴィスノフ, "GPU クラスタを用いたミリ波帯屋内大規模電波伝搬シミュレーション," ワイヤレス電力伝送と 5G 通信の連携・融合に向けた干渉対策と今後の展望 第 19 章, CMC 出版, 2023 年 3 月 30 日.

[6] K. Takeya, J. Chakarothai, J. Shibayama, Y. Suzuki, and K. Fujii, "Novel surface impedance formulation via FILT and Prony method for FDTD analyses of lossy media," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 23, no. 5, pp. 1593-1597, May 2024.

[7] J. Chakarothai, K. Takeya, J. Shibayama, Y. Suzuki, K. Fujii, "FDTD Analysis of Electromagnetic Scattering Sheet Using Surface Impedance Method," 2024 IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT2024), April 15-18 2024 (Sendai, Japan).

[8] T. Kawanishi, et al, Scattering of an electromagnetic wave from a planar waveguide structure with a slightly 2D random surface, Waves in Random media vol.7, 35-64, 1997.

[9] R. Yoshino, Y. Asakura, K. Inagaki and T. Kawanishi, "300GHz Terahertz Wave Scattering Experiment and Simulation from Slightly Rough Surfaces on Dielectrics," in IEICE Communications Express, vol. 13, no. 2, pp. 43-47, February 2024.

[10] A. Taflove and S. C. Hagness, Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method, Artech house 2005.

[11] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," Journal of Computational Physics, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, 1994.