

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560421

研究課題名（和文） ランダム粗面上電波伝搬特性の数値解析的研究

研究課題名（英文） Numerical Study on Characteristics of Electromagnetic Wave Propagation along Random Rough Surface

研究代表者

内田 一徳（UCHIDA KAZUNORI）

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：50099024

研究成果の概要（和文）：ランダム粗面とみなされる複雑断面を有する地上伝搬問題と後方散乱問題を精度良く数値シミュレーションを行うために、数値解析手法として有効な離散型レイ・トレース法を提案し、また種々の特性を持つランダム粗面を生成できるアルゴリズムを開発した。ランダム粗面に沿う伝搬特性について数値解析した結果、電界強度分布の平均的な振る舞いが、振幅補正值と伝搬距離のオーダーを用いた1波及び2波モデルによって、精度良く記述できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a discrete ray tracing method to numerically simulate propagation along random rough surface and back scattering from it with a good accuracy. We have also developed an algorithm to generate various types of random rough surfaces. It has been demonstrated that the ensemble averages of electric field distributions can be described in a simple fashion based on the 1-ray or 2-ray model with amplitude modification factor and propagation order of distance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：通信・ネットワーク工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：無線通信、伝搬特性、後方散乱特性、電磁界計算、ランダム粗面、センサネットワーク、離散型レイ・トレース法

## 1. 研究開始当初の背景

センサネットワーク機器は、砂漠、丘陵地、田畑、海上など、ランダム粗面とみなされる地表面上に設置される場合が多い。このような複雑地上伝搬問題を解明しておくことは、センサネットワークネットワークの有効利用を図る上で極めて重要である。

一方、ランダム粗面上スレスレに飛来する飛行物体については、レーダ波が粗面からのクラッタに埋もれ、そのレーダ検知は極めて難しい。この問題を数値シミュレーションの立場から考察し、レーダ受信感度を向上する方策に対する基礎資料を提供することも重要な試みであると考えられる。

## 2. 研究の目的

上に述べた研究背景の下にこの研究では、ランダム粗面近傍に配置された送受信間の伝搬特性と、ランダム粗面に沿って低空で飛来する飛行物体からの後方散乱特性について、数値シミュレーションの方法によって、この電磁界問題に対する諸特性を定量的に説明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

上に述べた研究目的を達成するためには、ランダム粗面のような複雑形状を取り扱うことのできる電磁界計算の手法を確立すること、並びに種々の統計量を持つランダム粗面の生成を可能とする数値アルゴリズムの確立が必須となる。

前者について本研究では、離散型レイ・トレース法を提案し、粗面形状の離散化とレイ探索の離散化を行うことによって、計算時間の短縮化を図った。また後者については、コンボリューション法を提案し、1次元及び2次元のランダム粗面に関して、連続的且つ広範囲に亘る粗面生成が可能となった。

なお計算時間の短縮化は、PCによる数値シミュレーションにとって重要な課題であり、また粗面生成が広範囲に亘ることは伝搬距離やレーダ感知距離と関連して重要な課題である。

## 4. 研究成果

(1) 本研究ではランダム粗面に沿う電波伝搬特性及びその後方散乱特性の数値解析を行うことであった。電界分布計算には、筆者らが提案した離散型レイ・トレース法を用いた。この手法では、粗面の離散化のみならずレイの探索も離散化しているので、計算時間の短縮化を実現することができた。1次元ランダム粗面の場合と同様に、2次元ランダム粗面に対しても、このアルゴリズムが有効な手法であることを数値計算によって確かめることができた。

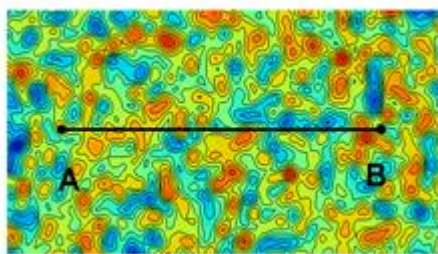


図1 2次元ランダム粗面

数値シミュレーションで使うランダム粗面の生成に関しては、1次元の場合について筆者らが提案した畳み込み法を2次元の場合

に拡張し、任意の空間スペクトル分布に適用できるアルゴリズムを開発した。さらに畳み込み法の特徴を生かして、粗面の統計量が異なる複数の空間に分割できる粗面、いわゆる不均質なランダム粗面を連続的に生成する手法も開発した。図1は畳み込み法で生成した均質な2次元ランダム粗面の例である。この数値例では空間スペクトルをガウス型としている。点Aを送信点、点Bを受信点とすれば、伝搬特性の解析問題となる。また点Aをレーダ、点Bを粗面上の飛行物体とすると、後方散乱特性の解析問題となる。

(2) ランダム粗面上の伝搬問題では、粗面に沿って進む電磁波は反射・回折・遮蔽を繰り返して、振幅の変動を受けながら複雑な経路を伝搬する。この場合図2に示すように、特定のランダム粗面に対して電界強度分布は激しく変動する(赤線)。一方、多数のサンプル数からなる粗面に対して(数値例では100サンプル)、その電界強度分布のアンサンブル平均は解析的な関数で表現可能な滑らかな曲線となる(青線)。

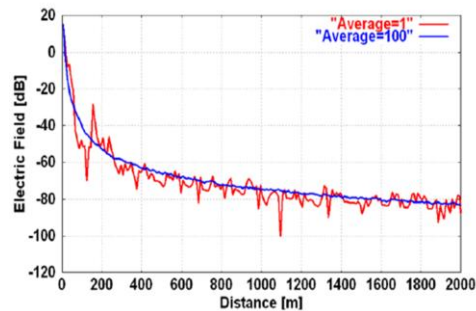


図2 粗面上に沿う電界強度分布

このアンサンブル平均からなる曲線は、振幅補正值と伝搬距離のベキ数をパラメータとして、1波及び2波モデルの一部を修正によって近似できるので、電界分布の振る舞いが精度良く記述できた。さらに、両モデル間の変換は容易に実行できるので、送信電力と受信機の感度が与えられれば、複雑な地上電波伝搬問題に対して平均的な通信距離を容易に推定できるようになった。

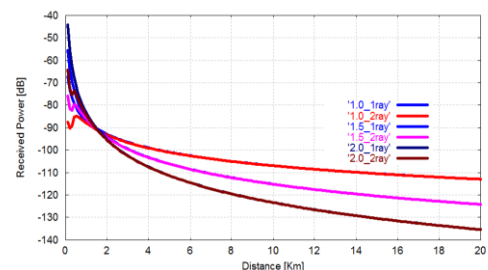


図3 1・2波モデルの電界強度分布比較

図3において、伝搬距離のベキ数を3通り

に変化したときの、両モデルに基づく電界強度分布の比較を行っている。2波モデルでは送信点付近で2波間（直接波と反射波）の干渉による変動が見られるが、このことを除けば両者はよく一致していることが示されている。この事実が両モデル間の精度の良い変換公式の導出と通信距離推定の根拠となっている。

(3) この研究の目的の一つはランダム粗面上の電波伝搬特性の数値解析であったが、他は図4に示すように粗面上を低空で飛来する飛行物体の後方散乱に関してランダム粗面からの後方散乱を定量的に把握することであった。具体的には、レーダにおける飛行物体からの後方散乱（信号電力）とランダム粗面からの後方散乱（クラッタ電力）を定量的に把握することであった。

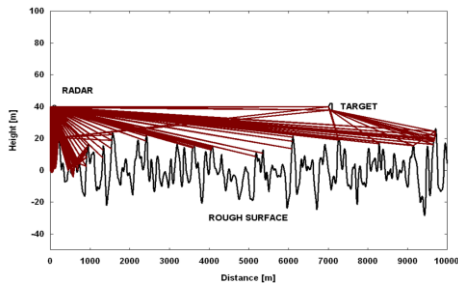


図4 ランダム粗面レーダ及び飛来ターゲット並びに後方散乱レイ

図4に1次元ランダム粗面上に設置されたレーダと低空で飛行するターゲットの問題構成を示している。また、レーダから放射された電波がターゲットから直接反射するレイ、またターゲットから反射した後に粗面から反射するレイ、さらに粗面で反射した後にターゲットから反射するレイの様子（茶線）を示している。この数値例のように、レーダに補足されるレイ（電磁波）のほとんどは粗面からの反射波（クラッタ）であり、ターゲットに関するレーダ受信電力はクラッタに埋もれることが予想できる。

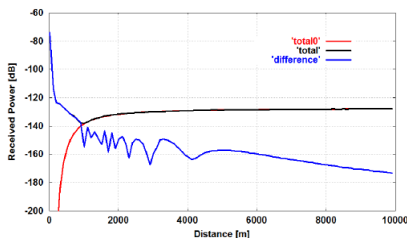


図5 分類別のレーダ受信電力

図5は1次元ランダム粗面について、レーダの指向性を鋭くすることによって、クラッ

タの低減を図った場合の数値例である。なおサンプル数は100に選んでいる。レーダ受信電力の分類は、黒線が全電力、赤線が粗面からのクラッタ電力、青線が飛行物体からの信号電力である。この数値例によって、レーダの近傍を除いて信号波はクラッタに埋もれるので、地上スレスレに飛来する飛行物体のレーダによる検知が困難であることを定量的に示すことができた。

上の例が示すように、レーダの指向性を向上するだけではクラッタの除去は困難である。そこでこの研究では、レーダ受信波のドップラー・シフトについて数値解析を実行し、粗面反射に基づくマルチパスがドップラーシフト分布にどう影響しているのか考察した。図6がその数値例である。[0, 2V/C]の範囲にスペクトルは広がっているが、特にその両端に集中している。この事実はレーダ感度の向上に対して有効な結果であると思われる。ただしVは飛行体速度、Cは光速である。

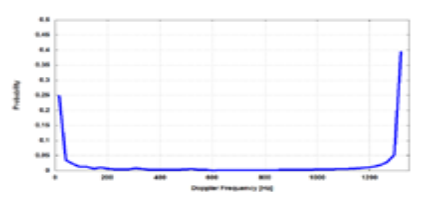


図6 ドップラーシフトのスペクトル分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計27件)

- ① M. Takematsu, J. Honda and K. Uchida: "On Accuracy of Discrete Ray Tracing Method in Comparison with Rigorous Solutions", Proc. of IEEE AINA-2012, 査読有, pp. 633-638, (2012).
- ② Junichi Honda & Kazunori Uchida: "Delay spread of electromagnetic waves along random rough surface", J Ambient Intell Human Comput, Springer, 査読有, pp. 1-8, (2011). DOI:10.1007/s12652-011-0100-0,
- ③ Kazunori Uchida, Junichi Honda and Shunsuke Nakashima: "Doppler Shift Distribution of Target Moving above Random Rough Surface", Proceedings of 2011 International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications, 査読有, pp. 487-492, (2011).

- ④ Shunsuke Nakashima, Junichi Honda, and Kazunori Uchida: "Backscattering from A Target Moving along Random Rough Surfaces", Proceedings of ISAP 2011, 査読有, WeF2-1 pp. 1-4, (2011).
- ⑤ Kazunori Uchida and Junichi Honda: "An Algorithm for Allocation of Base Stations in Inhomogeneous Cellular Environment", Proceedings of 2011 International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2011), 査読有, pp. 507-512, (2011).
- ⑥ Kazunori Uchida, Junichi Honda, Taro Tamaki and Masafumi Takematsu: "Handover Simulation based on a Two-Rays Ground Reflection Model", Proceedings of The 2011 International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, 査読有, pp. 414-419, (2011).
- ⑦ Junichi Honda, Kazunori Uchida and Masafumi Takematsu: "Field estimation for terrestrial digital broadcasting in Western part of Fukuoka", Int. J. Space-Based and Situated Computing, 査読有, Vol. 1, No. 2/3, pp. 189-196, (2011)
- ⑧ Kazunori Uchida, Junichi Honda, and Kwang-Yeol Yoon: "An Algorithm for Rough Surface Generation with Inhomogeneous Parameters", Journal of Algorithms & Computational Technology, 査読有, Vol. 5, No. 2, pp. 259-271 (2011)
- ⑨ Kazunori Uchida, Junichi Honda, Shunsuke Nakasima, and Kwang-Yeol Yoon: "Back Scattering from Target above Random Rough Surface", 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, 査読有, pp. 565-570, (2010).

[学会発表] (計 15 件)

- ① 内田一徳, 本田純一, 李峻赫: " (招待講演) 伝搬特性と基地局配置に関する一考察 ", 電子情報通信学会技術研究報告, 2011. 11. 17, (福岡)
- ② 内田一徳, 本田純一, 玉木太郎, 武末正文: " 秦の実験式から見た 2 波モデルと伝搬特性 ", 電子情報通信学会技術研究報告, 2011. 5. 12, (屋久島)

- ③ 中島俊輔, 内田一徳, 本田純一: " 不均質ランダム粗面上を飛来する散乱体からの後方散乱問題の解析 ", 映像情報メディア学会技術報告, 2011. 1. 27, (鹿児島)

[図書] (計 1 件)

- ① Kazunori Uchida and Junichi Honda, Estimation of Propagation Characteristics along Random Rough Surface for Sensor Networks, Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design, Geoff V Merret and Yen Kheng Tan (Ed.), InTech, Chapter 13, pp. 231-248, 2010

[その他]

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/~k-uchida/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内田 一徳 (UCHIDA KAZUNORI)  
福岡工業大学・情報工学部・教授  
研究者番号: 50099024