

SBR 法における光線追跡アルゴリズムの改良

An Improvement of Ray-Tracing Algorithm for SBR Method

電気電子情報通信工学専攻 釘持 智礼

Tomohiro KEMMOTSU

1. はじめに

近年の無線通信技術は急速に発展しており、これまで 1G から 4G として通信速度の向上や通信方式の改善が進められ、2020 年には 5G が実用化され現在利用が促進されている上、既に 6G に焦点が向けられている。無線通信が超高速、超低遅延、多接続となることで、以前までと比較にならない様式でモノや人などが繋がる IoT (Internet of Things) 時代が到来しつつあり、xR やメタバースといった新しい領域を支える役割を果たす。この無線通信が土台となった技術を存分に活用するために安定した通信が求められることとなり、そのために無線基地局や無線 LAN スポットを効率的に配置することが重要となってくる。そして、効率的な無線基地局や無線 LAN の配置場所を調べるために実際に設置することで実測を行うことは、金銭的にも時間的にも大きなコストが発生してしまう。したがって、電磁波の伝搬がどのようになされるかをシミュレーションによって可視化することが有効な手段となる。

大容量通信に用いられる高周波数帯の電磁波伝搬を解析するためには電磁波を光線近似に考える手法が有効であり、代表的な伝搬解析に光線追跡法 (レイトレース法) がある [1]。光線追跡法とは、幾何光学理論に基づき送信点から受信点へ到達する光線を追跡することで電磁波伝搬の推定を行う手法である。この光線追跡法は、イメージング法と SBR 法 (Shooting and Bouncing Rays Method) の二つに分類できる。本研究では、光線追跡法の一つである SBR 法を用いた電磁波の散乱解析を行う。

SBR 法を用いた過去の電磁波伝搬解析の過去の研究内容としては、透過波を考慮した建物内外における透過波計算の処理を組み込んだ手法の提案 [2]、回折波を考慮した多重エッジ回折波の計算手法の検討 [3]、建物内部の障害物を考慮した解析 [4] などが行われている。また、反射と透過、回折を同時に考慮した解析やアンテナの偏波特性を織り込んだ解析の研究 [5] も行われている。しかし、様々な処理を加えていった結果シミュレーション計算のアルゴリズムが複雑化しているとともに、解析空間や散乱処理等の限界に到達するまでどんなに小さな値であっても解析計算を続行するという問題が存在した。さらに、

送信アンテナに指向性を考慮する単純なシューティングを解析する場合であったとしても、すべての方向において同様に光線を追跡し計算を進めてしまうため、より光線追跡の手法の効率を向上させ解析計算時間を短縮する必要があった。そこで本研究では、シューティングした光線を追跡する一連のアルゴリズムを改良することでこの問題を解決できないか検討する。そのため、従来方法による解析に対してシミュレーション結果を比較することで、提案方法による計算がより効率的で妥当であることを示す。

2. SBR 法の概要

本研究で扱う SBR 法とは、以下の図 1 に示すように送信点からある一定の角度毎に光線をシューティングして、その光線を追跡しながら受信点に到達した場合にその地点での電力の強さを計算し記録することで電磁波の伝搬を解析する手法である。

同じ光線追跡法であるイメージング法と比べると、厳密な計算を行う精度という点では及ばない一方で、一つの光線の追跡が一回で完了するという特性から計算量が比較的少ないため、考慮する地理モデルの散乱体や散乱回数が多岐にわたる複雑な状況での解析計算に適している。

SBR 法による電磁波伝搬解析では、まず建物の座標、高さ、比誘電率等の地理条件を定めた地理情報データファイルを読み込む。次に、解析後の可視化面を設定し、等間隔に直径 a のサンプル球を設置する。そして、送信点から光線をシューティングし、建物や地面との散乱情報を記録する。光線の追跡中に送信点から放射された光線がサンプル球に到達したと認識した場合、光線の電力強度に応じてピクセルに色付けを行う。シューティングした光線が定められた散乱回数を超えた場合や解析領域の外へ出てしまった場合、最大光線追跡距離を超えてしまった場合にはその光線の追跡を終了し、刻み角を $\Delta\theta$ だけ角度を変えて再度送信点から光線をシューティングする。これを定められた角度まで繰り返し行い、設定した可視化面における電力強度の値を解析結果として出力し、その値に応じたピクセルへの色付けを行い可視化表示する。

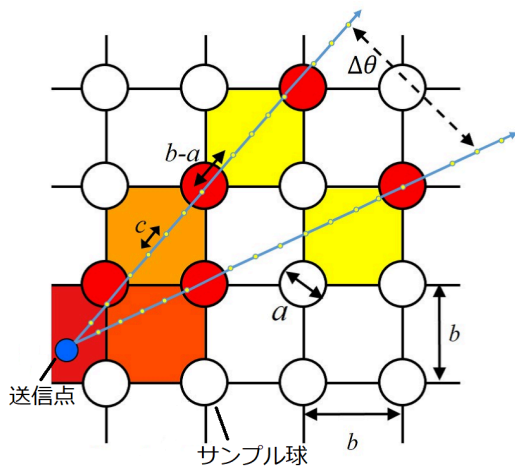


図 1: SBR 法の概要図

3. 解析の結果及び検討考察

本章では先述した透過や回折、偏波特性を考慮可能な従来のプログラムをベースに光線の追跡アルゴリズムを改良したプログラムを用いて解析を行い、従来のプログラムでの解析結果と比較していく。解析結果の色付けの範囲はすべて $-70 \text{ dBm} \sim 25 \text{ dBm}$ で統一されている。

3.1 水平垂直面へ直接波を放射させた場合のシミュレーション

まず最初に水平面と垂直面へと直接波をシューティングして、新たに組み込んだアルゴリズムがそれぞれの電力成分や可視化断面においても機能しているかどうかや解析面積と解析時間の関係について述べる。図 2 に示すような解析空間内に建物が一つ存在する場合において、 x - y 平面、 x - z 平面、 y - z 平面のそれぞれに直接波を放射したときの可視化結果や解析処理時間と解析面積、各電界成分の様子を、従来のプログラムを用いた場合と光線の追跡をスキップするアルゴリズムを導入した場合とで比較した。このときに使用した解析空間は $(x \times y \times z)$ は $700 \text{ ピクセル} \times 700 \text{ ピクセル} \times 400 \text{ ピクセル}$ 、建物モデルは $445 \text{ ピクセル} \times 610 \text{ ピクセル} \times 260 \text{ ピクセル}$ 、外壁の厚みは 1 ピクセル であり、光線追跡スキップの閾値を -20 dBm に設定し、送信点の座標はシミュレーション結果の図の左下を原点として $x = 197 \text{ ピクセル}$ 、 $y = 335 \text{ ピクセル}$ 、 $z = 245 \text{ ピクセル}$ の位置に設置している。使用した各種パラメータを表 1 に、スペースの都合上 x - y 平面の E と x - z 平面の E_x の解析結果の比較を図 3 と図 4 に示す。

この結果から、以下に表示した結果を含めた各平面の各成分において光線追跡のスキップが機能していることがわかった。

また、水平放射において光線追跡スキップの閾値を変化させた場合の解析領域の面積と解析時間を以下の表 2 にまとめる。この結果より、十分な広さで解析が行われる場合の単位時間あたりの解析面積が概ね一致することが読み取れ、直接波の水平放射のシューティングのスキップによる解析面積と計算時間は対応しているといえる。

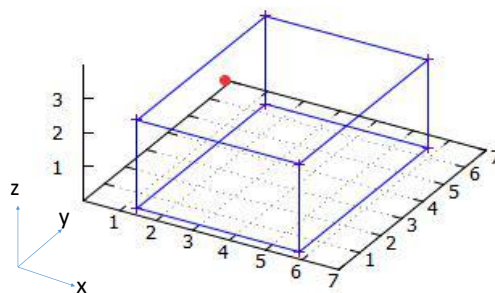


図 2: 3D での建物モデル

表 1: シミュレーションパラメータ

使用アンテナ	無指向性オムニアンテナ
送信電力	30 dBm
使用周波数	2.4 GHz
波長	0.125 m
刻み角	0.001 deg
光線追跡間隔	0.022 m
サンプル球直径	0.025 m
ピクセル間隔	0.01 m
観測面	送信点を含む面

表 2: 各解析面積と解析時間

設定閾値	解析面積	時間差	単位時間の解析面積
-30 dBm	271 450	+7 s	38 779
-20 dBm	196 047	+5 s	39 209
-17.5 dBm	118 786	+3 s	39 595
-15 dBm	72 406	+2 s	36 203
-10 dBm	27 800	+1 s	27 800
0 dBm	3 064	+1 s	3 064
40 dBm	0	-	-

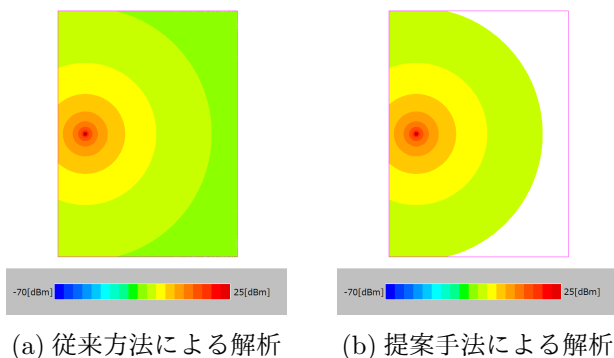


図 3: $x - y$ 平面の E の解析結果の比較

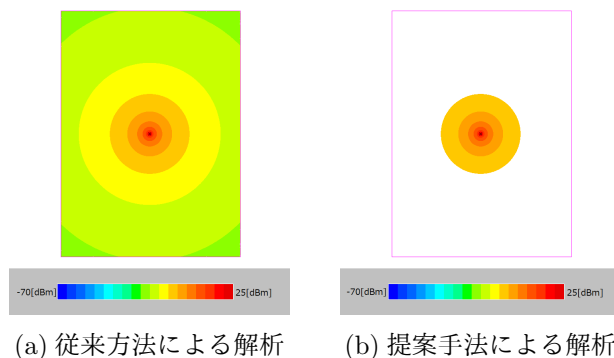


図 5: $x - y$ 平面の E の解析結果の比較

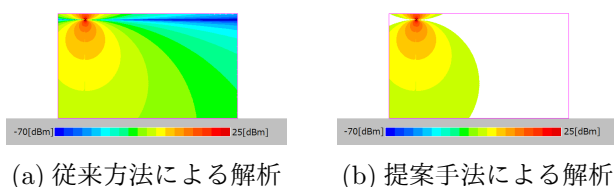


図 4: $x - z$ 平面の E_x の解析結果の比較

3.2 三次元空間へ直接波を放射させた場合のシミュレーション

次にアンテナから三次元の空間全体へと直接波を放射させた場合においてシュレーティングした光線の追跡を一定の閾値でスキップして、そのときの解析結果の様子や解析した空間の体積と解析時間について述べる。建物のモデルと各種パラメータは刻み角度を 0.10 deg 、送信点を $x = 350$ ピクセル、 $y = 335$ ピクセル、 $z = 125$ ピクセル、光線追跡スキップの閾値を -10 dBm へと変更した以外は図 2 と表 1 と同様のものを使用した。解析の結果の $x - y$ 平面の E の比較を以下の図 5 に示す。各平面での解析結果において設定閾値によるシュレーティングのスキップが機能していることがわかった。

また、表 3 には従来方法と提案方法それぞれにおける、解析した領域の体積や計算時間の比についてまとめた。従来の手法での解析領域は建物の内部全体の体積であり、提案した手法での解析領域は解析球の半径が全ての方向で対等に 100 ピクセルとなるように調整して算出しており、単位はボクセルである。この結果から、三次元空間に直接波をシュレーティングした場合の解析領域と解析時間の比は対応する傾向が見られるものの 4 パーセントポイント程度解析時間が多くかかることが読み取れる。この原因としては、導入したアルゴリズムの問題が考えられ

る。提案方法のアルゴリズムにおいては、シュレーティングのスキップを判定するために理論上の体積からもう一工程多く光線の追跡、ピクセル進入判定、電力値計算等が必要となる。そして、水平への放射と比較するとおよそ刻み角の逆数と 180 度との積の値だけ解析が多く行われる。そのため、シュレーティングをスキップした場合においても理想的な体積よりも広い領域を解析していることになるので、解析領域の比に対して解析時間の比が大きくなっている可能性があると考えられる。

表 3: 解析した領域と解析時間

解析方法	解析領域	解析領域比	解析時間比
従来手法	70 577 000	-	-
提案手法	4 186 667	0.059 3	0.097 6

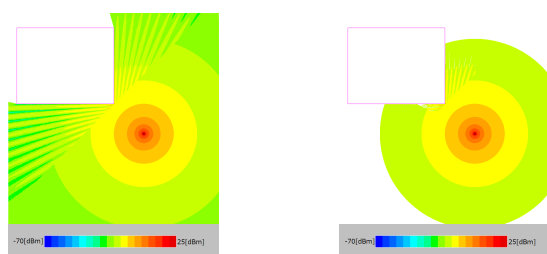
3.3 直接波と反射波を考慮した場合のシミュレーション

次に直接波と反射波を考慮してアンテナから光線を放射させた場合において、シュレーティングした光線の追跡を一定の閾値でスキップしたときの解析結果の様子について従来方法と比較しながら述べる。各種パラメータは送信点以外前節と同様のものを用いている。

はじめに建物モデルを 250 ピクセル \times 320 ピクセル \times 260 ピクセルに変更しその建物外部である $x = 450$ ピクセル、 $y = 300$ ピクセル、 $z = 245$ ピクセルの位置に送信点を設置した場合に、反射回数を 1 回に設定したシミュレーションを、従来の方法で解析した場合と提案する方法を用いて光線の追跡をスキップする閾値を -20 dBm から -30 dBm に設定した場合で行い比較した。そのときの解析の結果の $x - y$ 平面の E の比較を以下の図 6, 7 に示す。この図 6 の結果から、提案方法による解析におい

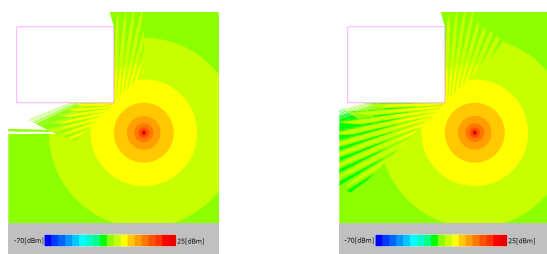
て送信点に近い反射面では従来の方法と同様の結果がでているものの、従来の手法では発生していた、閾値に収まる大きさの電力値が見られない箇所があることが読み取れる。この理由としては、直接波の段階から閾値未満の電力値のシューティングの追跡をスキップしたことで、反射によって生じる直接波のみのシューティングの追跡距離より先にある領域で、閾値よりも小さな値となった光線が合わさった結果設定した閾値を超える値の電力強度が発生したと考えられる。閾値を変更した図7からは徐々に解析区間が広がり図6(a)に近づいていることがわかり、反射面を含めた合計の光線追跡距離を考慮して適切な追跡中止の閾値を設定することで必要な部分の解析結果を得ることが可能であるといえる。

次に前節で使用した建物内部の $x = 350$ ピクセル, $y = 600$ ピクセル, $z = 245$ ピクセルの位置に送信点を設置した場合に、反射回数を1回として光線追跡スキップの閾値を -30 dBm に設定したシミュレーションを行い従来の手法での解析と比較した。その解析結果の様子を図8に示す。この結果から、送信点に近いほど従来の解析結果と同じ値が計算されていることが読み取れる。一方で、遠方では電力値が小さくなり閾値を超過することで全ての面での反射が考慮されない影響がでていることがわかる。



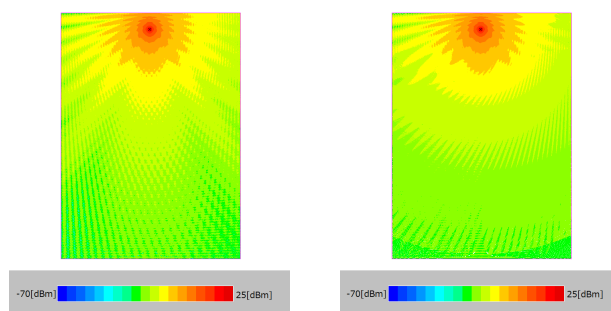
(a) 従来方法による解析 (b) 閾値 -20 dBm の解析

図 6: $x - y$ 平面の E の反射 1 回の解析結果の比較



(a) 閾値 -25 dBm の解析 (b) 閾値 -30 dBm の解析

図 7: $x - y$ 平面の E の反射 1 回の解析結果の比較



(a) 従来方法による解析 (b) 提案手法による解析

図 8: $x - y$ 平面の E の反射 1 回の解析結果の比較

4. おわりに

本論文では、SBR 法を用いることにより行う電磁波の散乱解析シミュレーションにおいて、シューティングされた光線の追跡アルゴリズムについての改良を提案した。そして、直接波と反射波を考慮した解析において、光線追跡距離や指向性の影響で電力値が小さくなる場合での解析効率が向上したことを示した。

今後の課題として、透過波や回折波を考慮した場合の解析においても本アルゴリズムを適用することやどれほどの値を閾値として設定することが適切であるかの検討が必要になる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心にご指導頂いた本学理工学部電気電子情報通信工学科の白井宏教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 今井 哲朗, “電波伝搬解析のためのレイトレーシング法 基礎から応用まで”, コロナ社, 2016.
- [2] 細田 大輝, “SBR 法による屋内外電波伝搬解析”, 中央大学 大学院 理工学研究科 修士論文, 2013.
- [3] 前田 崇秀, “SBR 法における多重エッジ回折波の計算手法の考案”, 中央大学 大学院 理工学研究科 修士論文, 2014.
- [4] 安藤 万雄人, “建物の内部を考慮した電磁波伝搬推定”, 中央大学 大学院 理工学研究科 修士論文, 2018.
- [5] 木村 晴周, “室内構造を含めた電波散乱解析”, 中央大学 大学院 理工学研究科 修士論文, 2020.