

SBR 法による屋内の壁厚を考慮した電磁波伝搬推定

Wall Thickness Consideration for Indoor EM Propagation Estimation by SBR Method

電気電子情報通信工学専攻 林 孝洋
Takahiro HAYASHI

1. はじめに

近年、移動体通信がめざましく発展し、大容量通信を高品質かつ高速に行うための安定した通信環境が必要となった。したがって、コストや効率を考慮して通信基地局アンテナを配置し、広範囲に十分な電波を供給する必要がある。配置を決定するために実際に測定を行うと、コストや手間がかかってしまうため、あらかじめシミュレーションを行い、電磁波の伝搬特性を解析することが重要となる。

通信の大容量化のために高周波を用いており、その有効的な解析方法がレイトレース法 (Ray Tracing Method) である。レイトレース法は幾何光学理論に基づき、送信点から放射される電磁波を光線とみなし、受信点へ到達する光線を追跡することで電磁波伝搬推定を行う方法である。レイトレース法は大きく 2 つの方法に分類でき、イメージング法と SBR 法 (Shooting and Bouncing Rays Method) がある。本研究ではレイトレース法を基礎とする SBR 法による電磁波伝搬解析を行う。

SBR 法を用いた過去の電磁波伝搬解析の研究として、都市空間における電磁波伝搬解析 [1, 2]、反射波の計算に映像法を導入した改良 SBR 法による電磁波伝搬解析 [3]、回折波を考慮した電磁波伝搬解析 [4, 5] 等が行われてきた。近年、透過波に関する研究が多く行われており、建物の外壁・屋内の壁 (以下、内部壁とする) の比誘電率や厚みに応じた損失を計算し、透過波を生成する解析が可能となった [6] 等が行われてきた。2015 年には、厚みの定義が不十分であった建物の外壁について、厚みを正しく考慮した伝搬解析の研究がなされた [7]。

しかし、現状では厚みを正しく考慮できるのは建物の外壁のみであり、内部壁の厚みを正しく考慮した解析については実現に至っていない。そこで本研究では、厚みを正しく考慮できる内部壁を生成し、反射・透過を計算するアルゴリズムを実装することで、この問題を改善した。本論文では、従来方法による解析に対し、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妥当であることを示している。

2. SBR 法の概要

ここでは、SBR 法の基本的なアルゴリズムの概要について述べる。はじめに、直交座標系の三次元解析領域を設定し、1 つの送信点を配置する。地面 ($z = 0$) を基準とし、決まった書式の地理データファイルを用いて構造物を空間内に配置する。そこから構造物の情報を読み込み、プログラム内で用いる。

次に、地面からの任意の高さの平面を可視化面として設定し、その平面をピクセルによって格子状に分割する。それらの格子点ごとに、光線の入射を判定する直径 a のサンプル球を図 1 のように配置する。

そして送信点より単一の光線のある方位に向かって放射し、建造物や地面による散乱などを含め、光線を追跡していく。追跡中にいずれかのサンプル球に達した場合、対応するピクセルに光線の持つ諸情報を記録する。その光線が追跡終了条件を満たした際には追跡を中止し、現在の放射方位から少しずらした方向に次の光線を放射する。

この操作を設定した放射角度 $\Delta\theta$ ごとに離散的に行い、全方位に光線放射を行う。全ての放射が終了したら、ピクセルに記録した情報をもとに電界強度のベクトル演算を行い、それに応じたピクセルへの色付けを行う。これが SBR 法の基本的なアルゴリズムの概要である。

なお、SBR 法のプログラム言語には C++ を使用している。

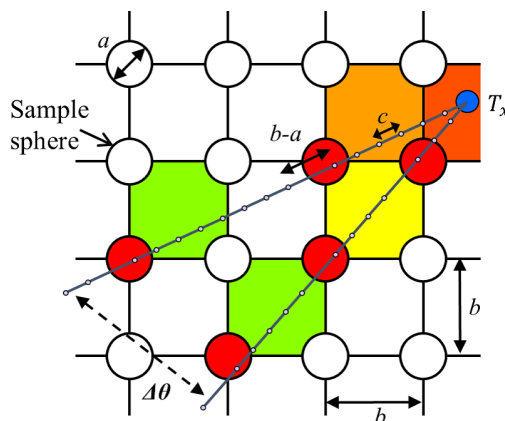


図 1: SBR 法の概要

3. 反射波、透過波の計算方法の比較

3.1 従来の反射・透過表現の問題点

SBR 法においては、散乱体の平面において反射・透過の計算を行うために平面方程式を用いる。従来方法においては図 4 に示すように、壁に対して平面方程式が 1 つ定義されていた。光線が厚みをもつ内部壁に衝突して反射する様子を表す際に、対応する平面方程式を用いて反射波を計算し、新たに反射波を生成する。したがって、図 4 のように内部壁の右側、左側のどちらから入射しても厚みを表現することができず、厚みのない面としてシミュレーションがなされていた。

透過に関しても、光線が内部壁に到達したら、その厚みの分だけ進ませた位置に「透過した光線を新たに放射する点（以下、透過点とする）」を生成し、そこから光線を新たに放射することで透過波を表現している。しかし、この方法では内部壁の右側から入射した場合は左側に厚みが生じ、左側から入射した場合は右側に厚みが生じてしまう。したがって、透過波生成の際には、内部壁に対する光線の入射方向に依存する厚みになってしまうため、統一性を持たせることができていなかった。

従来方法によるシミュレーション結果を図 2, 3 に示す。ピンク色の線で囲われた長方形が厚みを持つ建物の外壁であり、その内部にある L 字型の線が内部壁である。また、×印が送信点を表している。このように従来方法では、反射、透過どちらにおいても内部壁の厚みを正しく表現できていなかった。

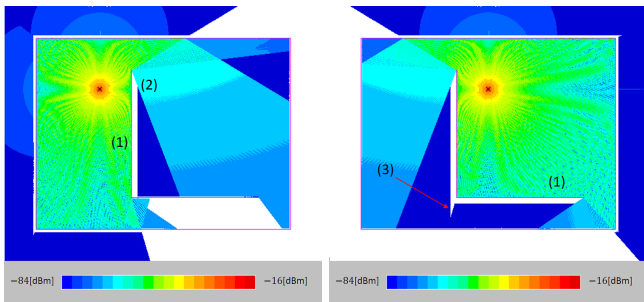


図 2: 従来の問題点 (a) 図 3: 従来の問題点 (b)

図中の (1) に見受けられるように、厚みを考慮しない状態の壁において反射が生じている。図 2 では、光線が透過したのち、右側に厚みを生成し、そこから透過波が放射されている様子が (2) で伺える。一方、図 3 では、左側に厚みを生成していることがわかるため、統一性を持つ厚みを表現できていなかった。また、(3) に示した位置に不適切な白抜きのピクセルが生じているが、この点については次項にて詳しく述べる。

3.2 従来方法における角付近に入射した光線に対する問題点

従来方法における問題点は、透過の際に右側と左側の両方に厚みが生じたり、反射の際に厚みを考慮しない計算になること以外にもある。それは、ある壁に入射した光線が、他の壁面から透過していくような状況で生じる。

例えば、内部壁の角付近に光線が浅い角度で入射した際に、図 5 に示すように透過点がずれてしまう問題が生じる。この場合、光線が入射するのは壁の右側であるが、透過波を新たに放射する送信点は壁の下側となる。しかし、従来方法では壁の左側の延長線上に新たな送信点を設けるため、そのずれの分だけ白抜きのピクセル（光線の不達領域）が生成され、光線の強度も弱くなっていた。このような問題を解決するためにも、従来方法のような 1 つの平面方程式を用いたアルゴリズムでは不十分であると考えられた。

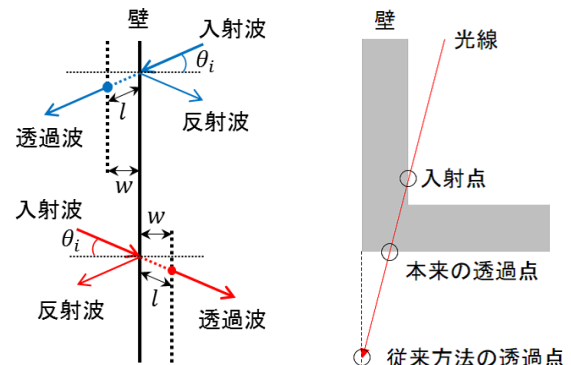


図 4: 厚みの統一性について 図 5: 従来の誤った透過処理

3.3 提案方法における反射・透過の計算方法

提案方法では、中心線に対して右側・左側の平面及び始点・終点を考慮した内部壁を用いて、光線の反射、透過の処理を行う。ここでは建物内部で放射された光線が、内部において反射・透過する様子について述べる。中心線に対して右側の面を R 面、左側の面を L 面、始点の面を S 面、終点の面を E 面とする。

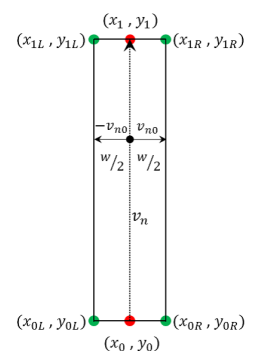


図 6: 内部壁の生成法

L 面から光線が入射する場合には、L 面において反射・透過が生じる。そのため、反射の計算は内部壁を用いて行う。透過の処理に関しては、L 面に衝突した光線のほとんどが面番号の等しい R 面に透過すると考えられる。そ

ここで、L面に光線が衝突した入射点から光線の向かう方向を示す単位波数ベクトルを用いて、延長線上のR面との交点を求める。ここで、

$$R \text{ 面の方程式} : a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$$

$$\text{単位波数ベクトル} : \hat{\boldsymbol{v}} = l\hat{\boldsymbol{x}} + m\hat{\boldsymbol{y}} + n\hat{\boldsymbol{z}}$$

$$\text{入射点} : (x_i, y_i, z_i)$$

とすると、L面上の入射点からR面上の脱出点までの伝搬距離 t は

$$t = -\frac{a_1x_i + b_1y_i + c_1z_i + d_1}{a_1l + b_1m + c_1n} \quad (1)$$

と求まる。この t を $(x_i, y_i, z_i) + t\hat{\boldsymbol{v}}$ に代入すれば脱出点の座標が求まり、そこから新たに光線を放射することで透過波を表現できる。R面に入射した場合については、L面上において同様に透過点を求める。

しかし、前節で触れたような問題も考えられる。そこで、上式で求めた透過点座標が内部壁の定義域内に収まっているかを確認する。対応する内部壁に正しい透過点が存在しない場合は、全ての壁面に対して同様に透過点が存在するか探索し、その中で t が最小となる点を最終的な透過点とする。

4. 結果及び検討考察

表 1: シミュレーションパラメータ

使用アンテナ	無指向性アンテナ
送信電力	0 dBm
使用電波周波数	1.5 GHz
ピクセルの一边の大きさ	0.10 m
偏波	垂直偏波

4.1 水平断面における解析結果の比較

図7は、従来方法で問題が生じていたL字型の内部壁を持つ建物モデルにおいて、水平断面を可視化面としたシミュレーション結果である。(a)(b)とも内部壁の両側に厚みの半分ずつ白抜きが生じている。また、(b)では角付近の問題が改善されていることがわかる。したがって、従来方法の問題点が改善され、正しく厚みを表現できていることが確認できた。

次に、現実の建物に近いモデルを用いたシミュレーションの実現のため、建物内部に複数の内部壁を設置した場合において、電波の挙動を比較する。シミュレーション結果を図8に示す。図に示すように内部壁を設置することで廊下と部屋を簡易的に表している。従来方法では内部壁の厚み部分まで色付けがなされているが、提案方法

では改善されている。そのため、実際の建物モデルに近い場合においても、厚みを正しく考慮したシミュレーションを行えることが確認できた。

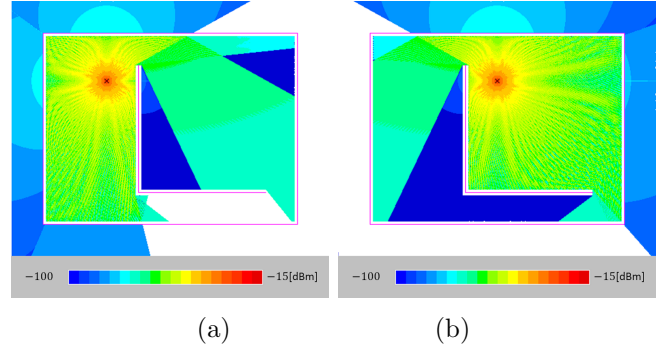
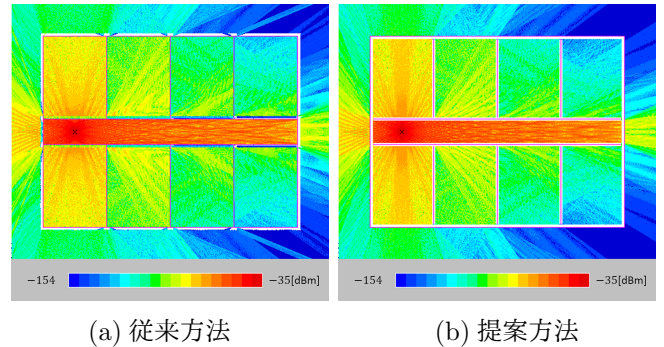


図 7: 問題点の改善



(a) 従来方法 (b) 提案方法

図 8: 水平断面の解析結果 散乱 5 回

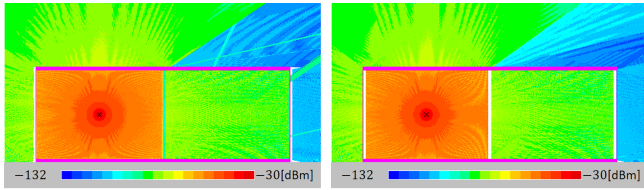
4.2 垂直断面における解析結果の比較

可視化面を地面に対して垂直に設定した場合について、内部壁を透過する電磁波の挙動を比較した。1階建ての建物モデルに内部壁を1つ設置した場合のシミュレーション結果を図9に示す。従来方法では内部壁の厚み部分が塗られてしまい、厚みの統一性が保たれていないことがわかる。また、内部壁と床の接点付近で散乱した光線は、外壁を無視して追跡がなされてしまっていた。この状態では、複数階層の建物モデルで解析精度が下がってしまうと考えられる。提案方法ではこれらの問題が改善されていることが確認できる。

次に、複数階層の建物のモデルを用いたシミュレーション結果を図10の(a)(b)に示す。どちらも内部壁の厚み部分を白抜きにした状態でシミュレーションを行うことができています。また、従来方法で生じていた外壁を無視してしまう光線も見受けられない。したがって、可視化面を垂直に設定した場合においても厚みを正しく考慮したシミュレーションを行えることが確認できた。

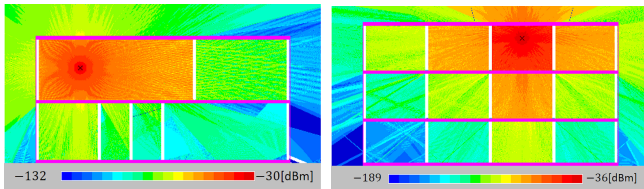
4.3 従来方法と提案方法のグラフによる比較

図8の(a)(b)に示すシミュレーション結果において、 $y = 170$ [pix], $0 \leq x \leq 500$ [pix] の範囲で直線状にデータ



(a) 従来方法 (b) 提案方法

図 9: 垂直断面の解析結果 散乱 3 回



(a) 2 階モデル 散乱 3 回 (b) 3 階モデル 散乱 5 回

図 10: 複数階層の場合の解析結果

を抽出し、グラフによる比較を行う。ただし、1 [pix]=0.1 [m] である。

図 11 に示すように、送信点 ($x = 100$ [pix]) の近くではおおむねグラフは一致しているが、送信点から遠ざかるほど受信電力の差が大きくなるのがわかる。遠ざかるにつれて内部壁に複数回反射・透過するため、厚みの生成される位置を修正した影響が生じたと考えられる。したがって、屋内において散乱現象が多く生じる建物モデルでは、提案方法が有用であると考えられる。

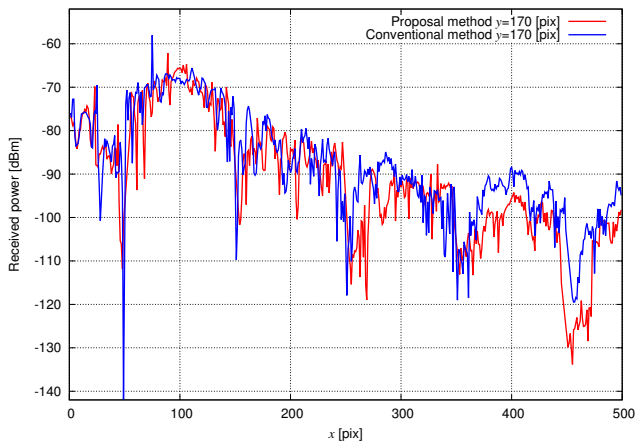


図 11: 従来方法と提案方法の比較

5. 結論

本論文では、細田氏の作成した三次元空間における SBR 法による透過波計算手法 [6] をベースにし、荒生氏の作成した建物の外壁に用いた透過アルゴリズム [7] を内部壁にも対応できるように改良し、従来方法と比較することで解析精度の向上と妥当性について検証した。

はじめに、従来方法において内部壁の厚みの定義が不

十分であったため、内部壁の面の中心線に対して両側に厚みの半分ずつ面を移動させた位置に面を生成するように改良を行った。これにより、内部壁の位置を明確に示すことができるようになった。

次に、定義された内部壁の両側の平面を用いて光線の入射点から透過点を生成する計算手法を導入した。この導入により、従来方法においては透過点生成の位置のずれが生じていたが、この問題を改善することができ、厚みの統一性が保たれるようになった。このことにより、従来方法と比較して反射波・透過波のずれを修正できた。

水平断面・垂直断面において従来方法と比較を行い、提案方法の導入により解析精度の向上を確認できた。

今後の課題として、実測値との比較も行えるように、実際の建物のように複雑な建物モデルにおいてもシミュレーションを行うことが必要となる。

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します。また、ご相談に乗って下さった本学白井研究室の皆様へ、心から感謝の気持ちとお礼を申し上げます。

本研究の一部は、平成 28 年度日本学術振興会 科学研究費補助金基盤研究 (C)15K06083 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 中西 泰介, “移動体通信用基地局アンテナからの放射電磁界の可視化”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2003.
- [2] 若林 弘隆, “SBR 法を用いた三次元空間における電磁波伝搬解析とその可視化について”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2005.
- [3] 音居 謙吾, “改良 SBR 法を用いた高周波帯における電磁波伝搬解析”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2007.
- [4] アモンティパラット アモンチャイ, “回折波を考慮した三次元 SBR 法による電磁波伝搬解析”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2008.
- [5] 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”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2014.
- [6] 細田 大輝, “SBR 法による屋内外電磁波伝搬解析”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2013.
- [7] 荒生 一樹, “SBR 法による電磁波散乱解析アルゴリズムの検討”, 中央大学理工学研究科修士論文, 2015.