

実環境におけるリフレクタレーの電波散乱特性の数値解析

小林 克也, 陳 強, 澤谷 邦男 (東北大学大学院工学研究科)

概要: 本報告では, リフレクタレー (reflectarray, RA) の散乱波を等価波源 (equivalent source, ES) の放射波で表し, レイ・トレーシングの一種である shooting and bouncing ray (SBR) 法を適用するハイブリッド法 (ES-SBR) により, RA を含む都市モデルの電磁界解析が可能であること検証する. この検証は, モーメント法 (method of moments) と一様回折理論 (uniform theory of diffraction) によるハイブリッド法 (MoM-UTD) の結果と比較することで行う. 次に, 大都市における高層ビルの間で発生する不感地帯が RA 設置により解消されることを, ES-SBR で計算した電界分布の結果を用いて検討する. この検討は 2 種類の RA を用いて行い, 用いる RA による電波環境改善効果の違いを示す.

キーワード: リフレクタレー, 伝搬, 不感地帯

1. まえがき

近年, 携帯電話をはじめとする移動体通信端末が急速に普及しており, 周波数資源の利用効率の観点から, 移動体通信の周波数は移動体通信の利用拡大に従って高くなっていく傾向がある. 電波の周波数が高くなると直進性が高くなるため, 都市部に乱立するビルの中に, ビルの屋根に設置された基地局アンテナからの電波が侵入しにくくなり, 通信品質が劣化するという問題が発生する. 通信品質が劣化するこの領域は「不感地帯」と呼ばれ, 高層ビルが増加し続ける都市部において深刻な問題となっている. この問題を解決する方法として, リフレクタレー (reflectarray, RA) と呼ばれる, 到来した電波を所望の方向に散乱させる特性をもった散乱体を高層ビルの壁や屋根に設置することで, 別のビルに設置された基地局からの電波を不感地帯に反射させるという方法が提案されている [1]. これまで, RA の広帯域化 [2], 2 偏波への対応 [3] といった RA 自体の設計に焦点を当てた研究は数多く行われてきた. しかし, RA 散乱波の伝搬や都市内における不感地帯の電波環境に与える影響を検討するという研究は未だ行われていない.

上記のことを検討するためには, RA とビルを含む都市モデルにおける電磁界分布の数値解析が必要である. これまで, RA の散乱波の解析にはモーメント法 (method of moments, MoM) [4], 有限差分時間領域 (finite-difference time-domain, FDTD 法) [5], 有限要素法 (finite element method, FEM) [6] といった高精度な数値解析手法が用いられてきた. これは, RA の素子は波長に対して小さく, 複雑な構造をしており, RA の散乱波を計算するためには各素子の細かい構造を考慮しなければならないからである. しかし, 波長に対するビルの大きさを考慮に入れると, これらの高精度な手法は都市モデル全てを解析する手法として実用的ではない. 一方, 幾何光学 (geometrical optics, GO) と一様回折理論 (uniform theory of diffraction, UTD) に基づくレイ・トレーシング法 [7] は, 屋内・屋外環境での電波伝搬の解析によく用いられ

る手法であり, 都市モデル内の電波伝搬を効率よく解析できる. しかしながら, レイ・トレーシング法では幾何光学近似の性質によってレイの反射を鏡面反射として扱う一方, RA は入射波を鏡面反射するとは限らないので, この手法を用いて RA を含む都市モデルの電波伝搬を正確に解析することはできない.

屋内または屋外の環境において, 周波数選択性構造 (frequency selective structure, FSS) からの散乱波の伝搬を解析する場合でも, 以上と同様の問題が発生し, この問題を決するために文献 [8] でハイブリッド法が提案されている. この手法では, FSS の反射・透過特性を予め Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio [9] で計算して等価波源 (equivalent source, ES) を求め, 次にレイ・トレーシング法によって電波伝搬を計算する. この手法は表面等価定理 [10] に基づいており, 等価波源の各セグメントからの放射波を shooting and bouncing ray (SBR) 法を用いて伝搬させて足し合わせることで, FSS の散乱波の伝搬を等価的に求める. 以降本報告ではこのハイブリッド法を equivalent source-shooting and bouncing ray (ES-SBR) と呼ぶ. ES-SBR は FSS ではなく RA とビルを含むモデル内における電波伝搬の計算に適用可能である. ここで, 文献 [8] では等価波源に等価電流と等価磁流を用いているが, Schelkunoff の等価定理 [11] を適用すれば, 等価電流又は等価磁流のどちらかを用いだけで十分な結果が得られることが指摘できる. また, 文献 [8] では線上での電界強度分布を ES-SBR で計算した結果を, CST による厳密な数値解析手法の結果と比較することで ES-SBR の妥当性を評価している. しかし, RA とビルを含むモデルを用いて不感地帯の電波環境の変化を解析する場合は, 統計的手法を用いて, リフレクタレーの散乱波が不感地帯の電磁界分布に与える影響を評価しなければならない. 従って, ES-SBR で計算した電磁界分布の統計結果が妥当なものであることを示す必要がある.

本報告では, RA の散乱波の影響を考慮に入れて RA を含む都市モデルの電磁界分布を解析し, RA が不感地帯の電波環境を改善する効果を統計的に検討する. この電磁界分布の解析手法として, 文献 [8] の ES-SBR に Schelkunoff の等価定理を適用したものをを用いる. 以降の節では, まず ES-SBR を用いて計算した電界分布の累積分布関数 (cumulative distribution function, CDF) が妥当であり, RA を評価するために用いることが可能であることを検証する. この検証は, ES-SBR と, MoM-UTD [12] の結果を比較することで行う. ここで, 実際の RA を含む都市モデルも MoM-UTD で解析可能であるが, ES-SBR は RA の近傍界測定結果から等価波源を求めて用いることができる点, また計算時間が短縮できる点において優れているということを指摘しておく. ES-SBR の妥当性が

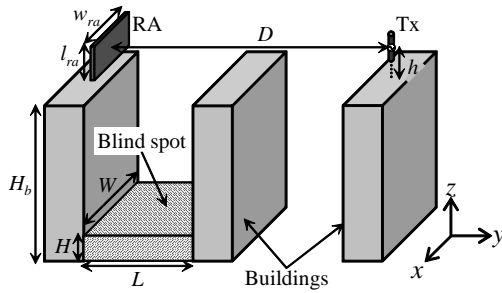


図 1: リフレクタレーと 3 つのビルを含む都市モデル .

示された後は, ES-SBR で RA を含む都市モデルの電磁界分布を解析し, その結果を用いて, RA 設置による不感地帯の電波環境改善効果を検討する. この検討は 2 種類の RA をそれぞれ用いて行い, 設置する RA の違いによる電波環境改善効果の違いも示す.

2. 等価波源によるハイブリッド法

文献 [8] の ES-SBR では文献 [10] の表面等価定理を用いる. この定理は, 仮想的な閉面上に境界条件を満たす適切な電流密度と磁流密度を配置することにより, その閉面の外側の電磁界が求められるというものである. 本報告では, Schelkunoff の等価定理 [11] を用い, 仮想的な閉面上の電界の接線成分, すなわち等価面磁流を用いて散乱波を計算することで, 計算の効率化を図る. 図 1 は RA とコンクリートのビルを含む伝搬モデルを表している. RA への入射波は垂直入射である. 6 面を持つ仮想的な閉面は図 2 のように RA を囲んでいる. 不感地帯を照射するための反射波が主な考慮すべき成分であるので, 入射波の進行方向に対して反対側の仮想閉面上の磁流のみを考慮する. つまり, 他の面上の磁流が不感地帯に与える影響は無視できると仮定する. 考慮する後ろ側の仮想平面を N 個のセグメントに分け, その中心点を図 3 それぞれ一つの仮想波源 T_i , ($i = 1, 2, \dots, N$) として用いる. それぞれの仮想波源の放射パターンは, 各セグメント上で等価面磁流を面積分することで求められる. すべての仮想波源の放射パターンを求めた後は, レイ・トレーシングを用いて都市内伝搬モデルにおける電磁界分布を計算する. 図 3 のそれぞれの仮想波源 (T_1, T_2, \dots, T_N) と実際の波源 (基地局) についてレイ・ラウンチングを行い, 不感地帯の受信点に到達するレイを求める. そして, 受信点に到達したレイの寄与を合計することで電界値を計算できる.

2.1 リフレクタレーの等価波源

仮想平面での散乱電界は MoM を用いて厳密に計算する. これは, RA の素子は複雑な構造を持ち, 波長に対して小さいためである. ここで, 仮想平面での散乱電界は実験的に測定したものをを用いることもできる. RA からの散乱電界の仮想平面にに対する接線成分を E_s とする

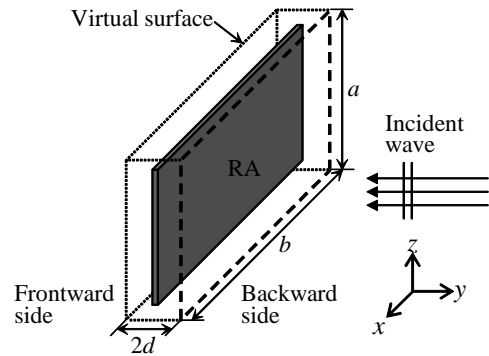


図 2: リフレクタレーを囲む仮想閉面 .

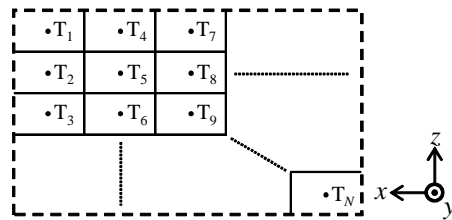


図 3: 仮想閉面の後ろ側の平面から求める等価波源 .

と, Schelkunoff の等価定理の等価面磁流 M_s は次式で表される [11].

$$M_s = 2E_s \times \hat{n} \quad (1)$$

ここで, \hat{n} は仮想平面の法線ベクトルである. このとき, それぞれの仮想波源の放射界は次のようになる [10][11].

$$\hat{E}_r = 0 \quad (2)$$

$$\hat{E}_\theta = -jke^{-jkr} \hat{L}_\phi / 4\pi r \quad (3)$$

$$\hat{E}_\phi = jke^{-jkr} \hat{L}_\theta / 4\pi r \quad (4)$$

ここで, k は真空中における波数であり,

$$\hat{L}_\theta = \iint_{S'} (-M_x \cos \theta \cos \phi + M_y \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta) \times \exp(jkr' \cos \psi) dS' \quad (5)$$

$$\hat{L}_\phi = \iint_{S'} (-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi) \times \exp(jkr' \cos \psi) dS' \quad (6)$$

である. M_x, M_y, M_z は式 (1) の M_s の成分であり, r は観測点の座標 (x, y, z) , r' は S' 上の点の座標 (x', y', z') , そして ψ は r と r' の間の角の大きさである. S' は積分領域であり, 仮想波源となるセグメントの面積である.

2.2 電波伝搬の計算

全ての波源の放射パターンが求めれば, 3次元のレイ・トレーシング法を用いて都市内における電波伝搬の解析と不感地帯での電磁界分布の計算を行うことができる. こ

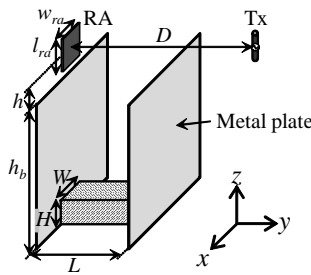


図 4: 金属板の大きな散乱体とリフレクタレーを含む伝搬モデル。

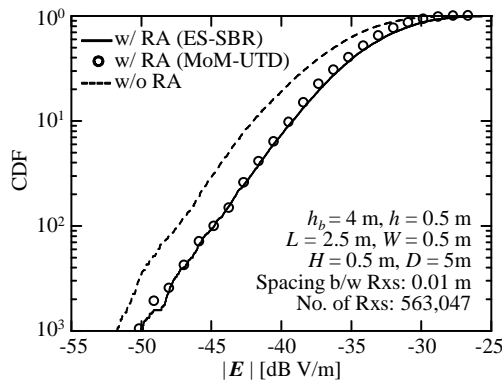


図 5: 金属板の大きな散乱体とリフレクタレーを含む伝搬モデルにおける不感地帯の電界分布。

の計算には SBR を用い、実際の波源と等価波源波源を含む全ての波源からのレイを受信点まで進める。受信点における電界値は到達したレイの寄与を合計したものであり、このようにしてリフレクタレーとビルを含む都市モデルの電界分布を計算できる。

3. 計算結果

3.1 等価波源によるハイブリッド法の妥当性の検証

ハイブリッド法を都市モデルに適用する前に、図 4 に示す、RA と電氣的に大きな散乱体である金属板を含むモデルを用いて、ES-SBR の妥当性を示す。金属板の素材は完全導体 (perfect electric conductor, PEC) とする。RA による不感地帯の電波環境改善効果を検証するためには、電磁界分布の CDF を用いて電磁界分布の変化を統計的に評価する必要がある。これに基づき、図 4 において、RA を設置した場合と設置しない場合の不感地帯における電界強度 $|E|$ の CDF を計算する。RA を設置した場合の電界分布は、ES-SBR と MoM-UTD [12] を用いて計算し、その結果を比較する。MoM-UTD による解析手法は十分正確な結果を与えることは文献 [12] で示されている。実際の RA を含む都市モデルも MoM と UTD による方法で解析可能であるが、等価波源を用いたハイブリッド法は、RA の近傍界測定結果から等価波源を求め

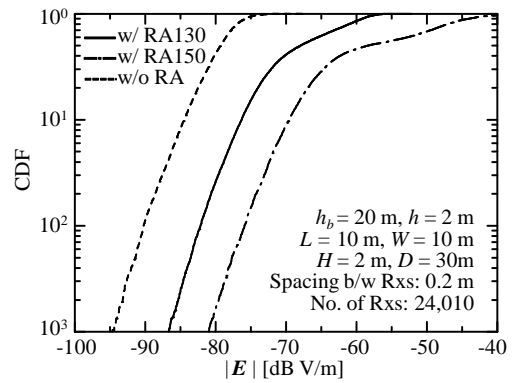


図 6: リフレクタレーを含む都市モデルにおける不感地帯の電界分布。

て用いることができる点、また計算時間が短縮できるという点において優れている。

用いた RA は正面 ($\theta_{inc} = 90^\circ, \phi_{inc} = 90^\circ$) から平面波が入射したときに散乱波のメインビーム方向が $\theta = 130^\circ, \phi = 90^\circ$ を向くように設計したもので、 $l_{ra} = 0.525$ m, $w_{ra} = 0.375$ m, このときの等価波源は $a = 0.81$ m, $b = 0.57$ m, $d = 0.0075$ m, $N = 1$ である。解析周波数は 2 GHz, 実波源 (Tx) には半波長ダイポールアンテナを用い、その送信電力は 0 dBm である。レイ・トレーシングの最大反射回数は 20 回, 最大回折回数は 1 回である。

計算結果を図 5 に示す。MoM-UTD は RA と Tx を MoM 領域, 金属板を UTD 領域として計算した結果である。破線は RA を設置しない場合の結果であり、通常の SBR により計算した。同図の結果より、ES-SBR と MoM-UTD の結果はよく一致している。ES-SBR を用いて計算した不感地帯における電磁界分布の CDF は、RA の効果を評価するための結果として妥当であることが示された。

3.2 リフレクタレーを含む都市内伝搬モデルの解析

次に、図 1 の都市モデルの不感地帯における電界分布を等価波源によるハイブリッド法を用いて解析する。用いた RA は RA130 と RA150 の 2 種類である。RA130 は正面 ($\theta_{inc} = 90^\circ, \phi_{inc} = 90^\circ$) から平面波が入射したときに散乱波のメインビーム方向が $\theta = 130^\circ, \phi = 90^\circ$ を向くように設計したもので、 $l_{ra} = 0.65$ m, $w_{ra} = 4.55$ m, このときの等価波源は $a = 0.96$ m, $b = 4.71$ m, $d = 0.0075$ m, $N = 13$ である。RA150 は正面 ($\theta_{inc} = 90^\circ, \phi_{inc} = 90^\circ$) から平面波が入射したときに散乱波のメインビーム方向が $\theta = 150^\circ, \phi = 90^\circ$ を向くように設計したもので、 $l_{ra} = 0.66$ m, $w_{ra} = 4.68$ m, このときの等価波源は $a = 0.99$ m, $b = 4.86$ m, $d = 0.0075$ m, $N = 13$ である。解析周波数は 2 GHz, 実波源 (Tx) には半波長ダイポールアンテナを用い、その送信電力は 0 dBm である。レイ・トレーシングの最大反射回数は 20 回, 最大回折回数は 1 回である。

計算結果を図6に示す。同図より、RAを設置した場合の結果は電界強度が大きい方にシフトしていることがわかる。このことから、RAを設置することで不感地帯の電波環境を改善できることが示された。RA150を設置した場合の方が大きな電波環境改善効果を得られたのは、RA150のメインビームが不感地帯を向いているためである。また、図4のモデルに比べて電波環境改善効果が大きくなるのは、図1のモデルの方が実波源からのレイが不感地帯に到達するまでにより多くの反射を要して伝搬距離が長くなるためである。さらに、コンクリートの反射率がPECのそれよりも小さく、不感地帯に到達する電力が反射の度に減少してしまっただけでも原因の一つである。このような環境の場合、RAの散乱波の影響が大きくなるため、RA設置による不感地帯の電波環境改善効果が大きくなると考えられる。

4. むすび

本論文では、ES-SBRを用いてRAを含む都市内伝搬モデルの解析を行った。このES-SBRでは、まず計算又は実験により求めたRAの散乱波からSchelkunoffの等価定理を用いて等価波源の放射パターンを求める。次に、実波源と等価波源の各放射パターンを用いてレイ・トレーシングを行い、都市モデルの電磁界分布を計算する。ES-SBRとMoM-UTDを用いて求めた不感地帯での電磁界分布の統計結果が一致したことから、ES-SBRはRAを含む都市内伝搬モデルの解析を行う上で妥当な手法であると言える。また、ES-SBRを用いて、RAを含む都市モデルの解析を行った。その結果、不感地帯の電界強度は全体的に大きくなり、RAの設置によって不感地帯の電波環境を改善できることが示された。この解析では2種類のRAをそれぞれ用い、設置するRAによる電波環境改善効果の違いを評価できることも示された。

謝辞

参考文献

- [1] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 881-885, Aug. 2009.
- [2] M. R. Chaharmir, J. Shaker, and H. Legay, "Broadband design of a layer large reflectarray using multi cross loop elements," *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 57, no. 10, Oct. 2009.
- [3] Long. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Microstrip Reflectarray Using Crossed - Dipole with Frequency Selective Surface Loops," presented at

the Int. Symp. on Antenna and Propagation (ISAP2008), Taipei, Taiwan, Oct. 27-30, 2008.

- [4] C. Tienda, M. Arrebola, J. A. Encinar, and G. Toso, "Analysis of parabolic reflectarray in dual-reflector configuration," in *Proc. 4th EuCAP*, 12-16, April 2010.
- [5] K. Keyghobad and H. Oraizi, "Phase response of microstrip reflectarray elements by FDTD analysis," presented at workshop on CEM-TD, 15-17, Oct. 2007.
- [6] M. Albooyeh and N. Komjani, "A reflectarray antenna for circular polarization," in *Proc. 39th EuMC*, Sept. 29-Oct. 1 2009.
- [7] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, pp. 879-891, Nov. 1994.
- [8] M. Yang and A. K. Brown, "A hybrid model for radio wave propagation through frequency selective structures (FSS)," *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 58, no. 9, pp. 2961-2968, Sept. 2010.
- [9] Microwave Studio. Darmstadt, Germany, Computer Simulation Technology Ltd. Bad Nauheimer Str. 19, D-64289.
- [10] A. Taflove and S. C. Hangness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2005, p. 338.
- [11] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed. New York: Wiley-IEEE Press, 1990, pp. 37-39.
- [12] Z. Liu, J. Yang, and C. Liang, "The hybrid higher-order MoM-UTD formulation for electromagnetic radiation problems," presented at Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility (APEMC2008), Singapore, May 19-23, 2008.