

	いま い てつ ろう		
氏 名	今 井 哲 朗		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学 位 授 与 年 月 日	平 成 14 年 9 月 11 日		
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項		
研 究 科, 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 ・ 通 信 工 学 専 攻		
学 位 論 文 題 目	レ イ ト レ ー シ ン グ 法 に よ る 電 波 伝 搬 の 推 定 法 に 関 す る 研 究		
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 澤 谷 邦 男		
論 文 審 査 委 員	主 査 東 北 大 学 教 授 澤 谷 邦 男	東 北 大 学 教 授 杉 浦 行	
	東 北 大 学 教 授 安 達 文 幸	東 北 大 学 助 教 授 陳 強	

論 文 内 容 要 旨

セルラ方式による移動通信システムでは、セル設計において、所望の通信品質を維持しつつ、少ない基地局数で周波数利用効率を最大限に引き出すことが要求される。そのためには、地形・地物による影響を考慮した高精度な伝搬損失の推定が必要である。ただし、近年のデジタル伝送方式導入等によるシステムの高度化に伴い、伝搬遅延や到来方向の推定も重要となってきた。一方、推定するサービスエリアは、近年の携帯電話利用者の激増とともに、屋外から屋内、地下街、トンネル内へと拡大してきている。このような多種多様な伝搬環境における諸々の伝搬特性を一元的に推定可能とする方法にレイトレーシング法がある。しかし、レイトレーシング法では、演算で考慮する“構造物の数”や“基本要素（反射，透過，回折）の最大回数”が増えると演算処理量が極端に増大することから、処理の高速化が重要な課題であった。本研究では、送受信間の伝搬路をモデル化することにより演算で考慮する構造物の数を極力少なくし、さらに、モデル化した伝搬路に適した各種高速アルゴリズムを提案することにより、推定精度を損なうことなく演算処理量の大幅な低減を実現できることを明らかにした。また、提案する伝搬路モデルと高速アルゴリズムを前提とする伝搬推定システムの実現方法を示すと同時に、測定結果との比較により実際の伝搬路における演算処理量と推定精度を明らかにした。検討した伝搬環境は、①トンネル内、②屋内、③低アンテナ基地局屋外（基地局アンテナを周辺建物より低い道路際に設置した場合）、④高アンテナ基地局屋外（基地局アンテナを周辺建物より高い場所に設置した場合）の4種類である。本論文は全編7章よりなり、各の章における内容は以下の通りである。

第1章では緒論であり、セルラ方式による移動通信システムの発展過程から、今後の最適な

セル設計を行う上で電波の伝搬推定に要求される“伝搬環境”と“伝搬特性”について述べ、それらを背景として考えるとレイトレーシング法による伝搬推定が有効であることを示した。ただし、セル設計の伝搬推定法として実用化するためには、伝搬推定のシステム化とともに演算処理量の大幅な低減が必須であり、本研究の課題であることを述べた。

第 2 章では、レイトレーシング法を用いたトンネル内伝搬推定の有効性について検討した。トンネル内の伝搬は、その断面サイズと周波数の関係および送受信間距離により“幾何光学的領域”と“モード伝搬的領域”に大別されるが、従来、レイトレーシング法による推定は主に幾何光学的領域について検討されてきた。そこで本検討では、モード伝搬的領域も含めてレイトレーシングを行うとともに、馬蹄形のトンネルによる周波数 2GHz 帯の測定結果と比較した。その結果としてモード伝搬的領域においても、レイトレーシングで設定する最大反射回数を送受信間距離に依存して増加させることにより精度良い推定が可能であることを明らかにした。測定結果との誤差（累積 50%値）は、垂直偏波および水平偏波ともに 3dB 以下であった。また、幾何光学的領域においては、馬蹄形のトンネル断面を四角形、六角形、八角形で近似した 3 モデルによる推定結果を測定結果と比較したところ、送受信アンテナが垂直偏波時には推定精度にモデル間の差はほとんど生じないが、水平偏波時にはその差が現れ八角形モデルの精度が一番良くなることを明らかにした。この場合の測定結果との誤差（累積 50%値）は、垂直偏波では各モデルとも約 3.5dB であり、水平偏波では四角形モデル：4.5dB、六角形モデル：4dB、八角形モデル：3dB であった。

第 3 章では、レイトレーシング法を用いた屋内伝搬推定的高速化について検討した。屋内の伝搬環境は、壁面、柱、パーティション等によりレイアウトが複雑であり、かつ、構造物の数が極めて多いことが特徴である。したがって、従来のレイトレーシング法では演算処理に膨大な時間を要する。そこで本検討では、推定精度を大きく損なわない範囲で演算処理量の大幅な低減を図るために、まず、送受信アンテナを垂直偏波とすることにより、伝搬路を“鉛直面内 1 回反射の伝搬路”とモデル化できることを明らかにした。次に、その伝搬路モデルを前提とした、

- ① HY-RAYT 法：レイランシング法とイメージング法の長所を組み合わせたレイのトレース法
- ② レイ受信モデル：レイランシング法で課題となる受信エリアの最適化処理を回避するモデル
- ③ 構造物探索法：レイランシング法において出射したレイと交差する構造物を屋内レイアウトから効率良く探索する方法

といったレイトレーシング処理の高速アルゴリズムを提案した。シミュレーションにより得られたこれら①~③の効果は以下の通りである。

- ① 推定誤差 2dB 以下を得るための演算処理量はイメージング法の数百分の 1
- ② 出射間隔が $\Delta\theta=1^\circ$ の場合、受信エリアが $\Delta S \geq 10\lambda \times 10\lambda$ でも推定誤差は 2dB 以下
- ③ 従来法（逐次探索法）に比べて探索時間を約 1/2 に低減可能

また、実際の伝搬路における周波数 2.2GHz 帯の測定結果と提案モデルを用いたレイトレーシング法による推定結果は良く一致することを確認した。

第 4 章では、レイトレーシング法を用いた低アンテナ基地局屋外伝搬推定の高精度化について検討した。従来の検討では、道路の両側に連続する壁面を仮定した溝型伝搬路モデルを適用することにより演算処理の高速化が図られてきた。ただし、このモデルは適用範囲が極めて狭いという欠点を有する。そこで本検討では、溝型伝搬路モデルと同程度の演算処理量で、かつ、より一般的なエリア内の伝搬特性を高精度に推定することが可能な、

- ① 拡張溝型伝搬路モデル：左右連続壁面に実壁面情報を射影した溝型伝搬路の拡張モデル
- ② レイパスモデル：大地反射の有無によるペアを前提としたレイパスのモデル

の 2 つのモデルを提案した。ここで、拡張溝型伝搬路モデルを適用した伝搬推定システムを構築するためには、実際の道路や建物情報から拡張溝型伝搬路モデルへと変換する必要があるが、変換に使用する建物は、道路および交差点から周囲約 10m の建物を探索すれば良いことをシミュレーションより明らかにした（ただし、建物の幅：50m、周波数：0.8GHz の場合）。また、実際の伝搬路における周波数 0.8GHz 帯の測定結果と提案モデルを用いたレイトレーシング法による推定結果は良く一致することを確認した。

第 5 章では、レイトレーシング法を用いた高アンテナ基地局屋外伝搬推定の高速度化について検討した。高アンテナ基地局屋外伝搬の場合、建物屋上の回折は特に重要である。しかし、演算処理の高速化を図るために、従来の検討では水平面内の 2 次元レイに基づく近似的なレイトレーシングが行われてきた。そこで本検討では、3 次元のレイトレーシングを行うとともに演算処理量の大幅な低減を図るために、まず、送受信間の伝搬領域を移動局からの距離に応じて階層的に定義する“階層伝搬路モデル”を提案し、さらに、この伝搬路モデルを前提とする、

- ① 多重回折モデル：多重回折レイの送受信間パスを厳密に求めるモデル
- ② レイパス探索アルゴリズム：送受信間パスを効率良く求めるアルゴリズム

を提案した。シミュレーションにより明らかにしたこれら①と②の効果は以下の通りである。

- ① ウェッジの組合せに GTD の回折条件を適用してパスを求めるため、ウェッジの 3 次元的な配置による制限は受けない。
- ② レイパス探索制御と建物数削減制御により構成。レイパス探索制御により演算処理量は約

$1/L^N$ (L : 領域数, N : 反射+回折の最大回数) に削減可能. 建物数削減制御により, 例えば, $L=2$ で許容推定誤差が 2dB の場合には演算量を約 1/10 に削減可能.

また, 実際の伝搬路における周波数 2.2GHz 帯の測定結果と提案モデルを用いたレイトレーシング法による推定結果を比較したところ, 伝搬遅延と到来方向の両特性において概ね一致することを確認した.

第 6 章では, 高アンテナ基地局屋外における広帯域伝搬特性とそのモデル化について検討した. 5 章で提案したレイトレーシング用階層伝搬路モデルの演算処理量低減効果を十分に得るためには, ①設定する伝搬領域の数とサイズ, ②各の領域内で設定する反射と回折の最大数, ③各の領域内で設定する建物選択しきい値 (建物の高さ下限値), の最適化が必要である. ここで, 実際の伝搬路, 特に市街地においてレイトレーシングを行うと, 伝搬特性に大きな影響を与えるレイは, 道路沿いの建物で反射, 回折を経験して移動局に到達するものであることが分ってきた. この特性は “電波は主に道路方向から移動局に到来する” という従来 of 測定結果とも一致する. そこで本検討では, このようなレイトレーシングによる推定結果や従来 of 測定結果に基づいて階層伝搬路モデルの高精度化・最適化を図る前段階として, 遅延時間と基地局側到来角度および移動局側到来角度を同時に扱える一般的で簡易な “時空間パスモデル” を提案した. このモデルの特徴は以下の通りである.

- ① 時空間パスプロファイルは, 既存モデルより得られる遅延パスプロファイルを用いて推定
- ② 遅延パスから時空間パスへの変換には, 提案する到来角度推定モデルを適用
- ③ 地形・地物等を考慮した遅延パスの推定モデルを用いることにより, 時空間パス推定モデルは地形・地物の影響を反映した実用的なモデルとなる
- ④ 各時空間パスのレベル変動として, “長区間変動”, “短区間変動”, “瞬時変動” を考慮することが可能

また, 市街地における周波数 2GHz 帯の測定結果と比較することにより, 提案モデルが実伝搬路を精度良く模擬できることを明らかにした. なお, 時空間パスモデルとレイトレーシング用階層伝搬路モデルを比較することにより, 階層伝搬路モデルの最適化も考察した.

第 7 章では結論であり, 本研究で得られた成果を総括するとともに, レイトレーシング法を用いた伝搬推定において今後検討すべき課題について述べた.

以上, 本研究の成果により, 移動通信システムで想定されるほぼ全伝搬環境において, セル設計上要求される “周辺構造物を考慮した高精度で実用的な伝搬推定” をレイトレーシング法により実現可能であることを明らかにできたと考える.

論文審査結果の要旨

セルラー方式移動通信システムにおいては、周波数利用効率を高めるために電波伝搬特性を予測して最適なセル設計を行う必要がある。また、デジタル伝送方式の高度化に伴って、伝搬損失だけでなく伝搬遅延や電波到来方向の推定が重要となっている。著者は、レイトレーシング法を用いて都市内の電波伝搬特性を高速・高精度で推定する方法について検討すると共に、伝搬遅延や電波到来方向の推定が可能な伝搬モデルを提案した。本論文はその成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、トンネル内伝搬特性の推定について述べている。考慮すべき反射回数の最大値の基準を求め、この基準を用いることによりモード伝搬が優勢なトンネルの寸法においてもレイトレーシング法により高精度な伝搬推定が可能であることを示している。

第3章では、屋内伝搬推定について述べている。屋内には壁面、柱、パーティションなどの複雑な散乱体が置かれているので、従来のレイトレーシング法を用いると膨大な数値計算時間が必要となる。そこで、レイラウンチング法とイメージング法の組合せ、各レイのパス履歴制御及び構造物探査法を提案し、これらを組合せたレイトレーシングアルゴリズムを用いることにより、推定精度を低下させることなく従来の方法の数百分の1程度の数値計算時間で伝搬推定ができることを数値計算と実験により示している。

第4章では、基地局アンテナの高さが低く、道路に沿った伝搬が優勢である場合の伝搬推定について述べている。このような伝搬路では、道路側面を連続壁面と仮定した溝型伝搬モデルが従来用いられてきたのに対して、ここでは実際の建造物を考慮するために不連続な壁面とした拡張溝型伝搬モデルを提案し、推定精度の高精度化を図っている。また、実験との比較からその妥当性を示しており、実用上有用な手法といえる。

第5章では、高アンテナ基地局の場合の屋外伝搬推定について述べている。この場合は、建物の側面だけでなく屋上からの回折を考慮する必要があるが、計算時間が膨大となるために従来は2次元レイに基づいた近似的な手法が用いられてきた。著者は屋上の回折を精度良く考慮できる3次元レイトレーシング法を用いると共に、移動局周辺をリング状の領域に分けて、それぞれの領域の建造物から反射・回折するレイを能率良く求めるレイパス探索アルゴリズムを提案して、計算時間の大幅な短縮を達成している。また、これにより高速・高精度で伝搬推定が可能となることを実測値との比較により明らかにしており、高く評価できる。

第6章では、高アンテナ基地局の場合の伝搬推定モデルを提案している。このモデルは、道路に沿った建物が伝搬特性に大きく影響を与えることに着目し、短区間遅延パスの実測値、あるいは長区間遅延パスの推定値から伝搬損失、伝搬遅延及び電波到来方向の推定を可能とするモデルであり、実用上極めて有用である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、レイトレーシング法を用いて電波伝搬特性を高速・高精度で推定する方法を開発すると共に、伝搬遅延や電波到来方向の推定が可能な伝搬モデルを提案し、その有効性を示したもので、電波伝搬工学ならびに無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。