

学 位 論 文 題 名

IEEE802.11n 規格に準拠する無線LAN システムの屋内伝搬特性の実験的検討と数値解析に基づく推定法に関する研究

学位論文内容の要旨

計算科学と計算機科学分野における国家プロジェクトである次世代スーパーコンピュータ「京」計算機 (K-Computer) に代表されるように、わが国においてはペタスケールの大型計算機システムが常時利用できる環境が整備されつつある。ハードウェアの整備とともに重要なのが、計算資源の有効活用を図るためのソフトウェアの整備および利用技術の高度化である。特に、これら要件は大学研究者が中心となって、実用的な応用ソフトウェアの開発や提供などで貢献できる分野である。

このような社会的要請に応えるために、本論文においてはスーパーコンピュータでの利用を想定した大規模電磁界シミュレータ *Jet FDTD* を開発し、その有効性や信頼性を示すことを目的として研究を行った。大規模電磁界シミュレーションの適用事例として、無線 LAN システムなどのモバイル・ネットワークの設計を可能にする屋内伝搬特性の推定法について検討した。解析手法として FDTD 法を採用し、計算リソースの観点からこれまで取り扱いが困難と考えられていた大規模建物内部における屋内伝搬特性の推定を可能にした。具体的には、戸建住宅や複数階にわたるオフィス・ビルを対象とし、それら建物ならびに什器類を数値モデル化し、建物内部の電磁界分布の数値解析からアクセスポイントの設置場所に依存した送受信特性および伝搬特性を明らかにした。

本論文の新規性は、市販無線 LAN システムの性能評価、通信可能範囲や通信容量を数値解析に基づいて推定する方法、数値解析に有効な人体モデル形状を提案していることである。さらに、解析結果の有効性ならびに実験結果の妥当性を検証するため、さまざまな電波環境における解析結果と実験結果の比較検討を行った。本論文の有効性及び信頼性は次のとおりである。数値解析においては、既存のプログラムに対してチューニングを行い、主記憶容量の効率的な使用により計算処理性能の向上を実現している。さらに、実験においては、市販無線 LAN、ノート PC とデータ収集用フリーソフトウェアを利用して、高信頼な測定データが得られるよう工夫している。加えて、数値モデルの開発においては、建物構造の把握、媒質定数の決定などについて多くの検討結果を示している。

第 1 章は序論であり、研究の背景と本論文の概要について述べている。

第 2 章においては、大規模電磁界シミュレータ *Jet FDTD* の解析アルゴリズムについて、マクスウェルの方程式に基づく差分表現、Yee セル、吸収境界条件、解析パラメータの決定方法を示している。

第 3 章においては、FDTD 法の分散メモリ型並列処理法の適用方法について解説している。

第 4 章から第 7 章において、著者の研究成果を示している。近年、無線通信技術の向上により高出力かつ高速な無線 LAN 規格 IEEE802.11n の策定と市販装置の開発が行われ、単一の無線 LAN アクセ

スポイントで比較的広い範囲をカバーエリアとすることが可能になった。このことにより、柔軟なモバイル・ネットワークの構築が可能となる一方で、屋内伝搬特性に関する詳細な測定やシミュレーションによる推定法が求められている。

第4章においては、無線 LAN システムの屋内伝搬特性推定のための実験手法および数値モデルの開発を行っている。さらに、数値シミュレーションを支援するためのユーティリティを開発し、大規模構造物の数値モデルを比較的短時間で開発するためのツールを整備している。

第5章においては、市販の IEEE802.11n 規格に準拠する 2.4GHz 帯無線 LAN 装置を利用して、大規模および一般的なオフィス環境、戸建住宅と複数フロアでの屋内伝搬特性について測定を行い、受信電界強度(RSSI)と平均スループットの関係を明らかにしている。これら複数の屋内伝搬環境での測定とその結果に対する考察から、RSSI とスループットの間には線形な関係があり、この関係は測定環境によらずほぼ同一の直線により近似できることを明らかにした。導出された関係式を利用することで、RSSI 値からスループット値を推定できる。RSSI はスループットに比較して測定が容易であり、数値シミュレーションで容易に評価可能である。さらに、測定結果の妥当性を確認するため、FDTD 法に基づく大規模数値シミュレーションを行い、よく一致する結果が得られることを示した。以上のことから、数値シミュレーションで得られた RSSI 分布と実験で求められた RSSI とスループットの関係を表す近似直線を組合せることで、任意の場所でのスループット値を推定することが可能になる。したがって、本論文の研究成果は無線 LAN アクセスポイントの設置位置や設置台数を見積る際の有効な設計手法となる。

第6章においては、市販され一般に入手可能な IEEE802.11n 規格に準拠した 2.4 および 5GHz 帯無線 LAN システムを利用し、木造 2 階建戸建住宅における屋内伝搬特性の測定および比較検討を行っている。2 種類の製造メーカーの異なるアクセスポイントを使用し、設置場所および通信パラメータ値によるスループットの変化について詳細な実験と数値解析を行った。第5章および第6章の検討結果から、市販の IEEE802.11n 規格無線 LAN 装置ではいずれも RSSI と平均スループットの関係が直線で近似できることを明らかにした。この理由は、市販の製品では十分な MIMO-OFDM 特性が実現されていないためであり、主に小型無線子機の構造上の制約が原因と考えられる。一方、高出力電力により、広いカバレッジと良好なスループットを実現することが可能である。

第7章においては、人体ファントムモデルを考慮した屋内伝搬特性について、計算機シミュレーションに基づく検討を行っている。人体ファントムを含めた従来の報告は、特定のファントム形状、数及び配置に基づく検討に限定されている。また、人体ファントムとして、単純な直方体型および円柱型が多く用いられている。しかし、人体ファントム形状に依存した伝搬損失特性の違いに関する議論はなく、詳細に比較検討する必要がある。本論文では、立ち姿勢人体ファントムとして直方体または楕円柱から構成されるモデルおよび詳細形状のモデルの3体について検討した。屋内廊下における伝搬損失特性について、人体ファントム形状、空間占有率及び配置パターンをさまざまに変化させてときの FDTD 解析結果から、数値解析に適した条件を明らかにしている。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果を要約している。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	大 宮	学
副 査	教 授	赤 間	清
副 査	教 授	水 田	正 弘
副 査	准教授	棟 朝	雅 晴

学 位 論 文 題 名

IEEE802.11n 規格に準拠する無線LAN システムの屋内伝搬特性の実験的検討と数値解析に基づく推定法に関する研究

数値シミュレーションに基づく計算科学は、理論及び実験に比較して新しい研究手法である。近年、計算機等のハードウェアの進歩に加え、ネットワーク技術を活用した計算機クラスタの構築やそれらシステムで実行可能な応用ソフトウェアの開発環境が充実している。この結果、計算科学的な研究手法と世界レベルの大規模計算機システムは、あらゆる科学技術分野の革新、最先端の学術研究及び製品開発における国際競争力向上など世界を先導する成果を生み出すことに不可欠な基盤技術となるものと期待される。

このような背景のもと、高精度かつ高速な数値シミュレーション応用ソフトウェアの開発が急務である。本研究では、時間領域差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 法に基づいた大規模電磁界シミュレータ Jet FDTD を開発し、その有効性を示すため無線 LAN システムの屋内伝搬特性推定に適用した。併せて、大規模数値モデルの開発を合理的時間内で行うためのツールを整備した。具体的には、IEEE802.11n 規格に準拠した市販の無線 LAN システムの屋内伝搬特性推定について実験及び数値シミュレーションによる検討を行っている。無線 LAN システムとして、2.4GHz 帯あるいは 2.4GHz/5GHz 帯デュアルバンド対応の市販アクセスポイント 2 機種、設置環境として小/大規模オフィスの複数階及び戸建住宅を検討している。数値シミュレーション結果は実験結果をよく推定しており、実験結果の妥当性と数値解析の有効性を明にした。また、人体ファントムモデルの屋内伝搬損失に及ぼす影響を数値評価し、数値シミュレーションに有効な人体ファントムモデルを示した。本研究の成果は、大規模電磁界シミュレーションのあらたな可能性を示し、今後とも発展が望まれるモバイルネットワークを支える基盤技術として活用が期待される。

第 1 章では、研究背景、研究目的と研究成果の概要を述べた後、論文構成を示している。

第 2 章及び第 3 章では、本研究で開発が行われた大規模電磁界シミュレータ Jet FDTD において採用している時間領域差分法の基本式、吸収境界条件、計算パラメータ決定法及び分散メモリ型並列処理のためのプログラミング法について解説を行っている。

第 4 章では、大規模電磁界シミュレータ Jet FDTD の入力データフォーマット、入力データ作成方法及びソフトウェアツールについて論じている。

第 5 章では、IEEE802.11n 規格に準拠する市販 2.4GHz 帯無線 LAN アクセスポイントを利用し

たワイヤレスネットワーク構築のために有効な設計資料を提供することを目的として、小規模及び大規模オフィスと戸建住宅での屋内伝搬特性評価と推定法について検討した。実験に基づく検討から、受信電界強度 (RSSI) とデータ転送速度 (スループット) の関係は線形であり、それは通信環境に依らず同様な式で表現されることを示した。さらに、RSSI 分布に関する大規模電磁界シミュレーションから、数値解析結果は実験結果をよく推定することを明らかにした。以上のことから、任意の場所でのスループットを推定するための方法として、数値シミュレーションにより得られた RSSI 分布と実験により導出した RSSI とスループットの関係式を組み合わせることを提案し、無線 LAN 装置の設置場所を決定するための有効な設計手法を示した。

第 6 章では、第 5 章での結果の有効性を示すため、IEEE802.11n 規格に準拠する市販の 2.4GHz/5GHz 帯デュアルバンド無線 LAN アクセスポイント 2 機種を利用して、屋内伝搬特性の比較検討を行った。戸建住宅において、RSSI 及びスループットの測定を行い、両者には線形な関係があることとその関係式を具体的に示している。さらに、データ伝送時にウィンドウサイズを変化させ、機種の違いによるスループット特性差とその原因を明らかにした。

第 7 章では、数値シミュレーションに有効な人体ファントムモデルを明らかにすることを目的として検討を行った。その結果、直方体モデルに比較して楕円柱モデルを適用することが適していることを明らかにした。

第 8 章では本研究に関する総合結論として、第 2 章から第 7 章で述べた成果を要約している。

以上のことから、本研究においては大規模電磁界シミュレータ Jet FDTD を開発し、それを無線 LAN システムの屋内伝搬特性推定に適用することで、その有効性を明らかにした。さらに、市販の無線 LAN 装置を利用した屋内モバイルネットワークの構築及び設計に有効なシステムの性能評価法、通信可能範囲や通信容量を数値シミュレーションに基づいて推定する方法及び数値シミュレーションに有効な人体モデル形状を明らかにした。これにより、屋内伝搬特性推定に関する研究において、十分な成果を上げている。

これを要するに、筆者は、数値シミュレーションによる高速無線 LAN システムの屋内伝搬特性推定法の提案を行い、屋内モバイルネットワーク構築に有効な設計手法を示した。これにより、屋内伝搬特性推定に関する多くの有益な知見を得ており、情報科学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。