

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330098

研究課題名(和文) 高速モバイルネットワーク構築のための高精度時空間電波伝搬モデルの基盤研究

研究課題名(英文) A fundamental study of highly precise wave propagation modeling in the space and time domains to configure high-speed mobile networks

研究代表者

大宮 学 (OMIYA, Manabu)

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：30160625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高速・広帯域ワイヤレスネットワークの構築を支援するための屋内伝搬特性推定及び回線設計に有効な手法の提案を目的とする。一般的なオフィス環境を想定した屋内伝搬特性推定及び評価のため、大規模電磁界解析ソフトウェア及び数値モデルの開発、それを利用した計算機シミュレーションを行った。数値モデルとして、コンクリート壁や床などの建物基本構造に加えて、什器及び鉄筋を考慮することで、高精度な伝搬特性及び伝搬経路の推定を計算機シミュレーションにより実現した。

研究成果の概要(英文)：This work is intended to provide an effective method for the prediction of indoor wave propagation characteristics and the design of wireless communication systems to support building the high-speed and broadband wireless network. At first, in order to predict and evaluate indoor radio wave propagation characteristics in the ordinary office environment, an application software based on the large-scale computational electromagnetics and precise numerical models are developed here. Then they are used in carrying out the numerous computer simulations and evaluations. The numerical model containing the furniture and the reinforcing rods as well as the fundamental premise such as concrete walls and floors make it possible to predict indoor wave propagation characteristics and radio link performances accurately by the computer simulations.

研究分野：計算科学

キーワード：移動通信 電波伝搬 屋内伝搬 チャンネルモデリング 無線LAN MIMO-OFDM 計算機シミュレーション  
電磁波解析

### 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット PC をはじめとする高速移動体通信の発展は目覚しく、サービスエリアに関しても屋外と屋内の区別がなくなりつつある。このように、無線を利用した移動通信サービスは多様化するとともに、従来の枠組みを超えた柔軟な利用法の検討が進められるなど、新たな時代を迎えようとしている。特に、周波数利用効率の一層の向上を目指す移動通信システムを開発するためには、屋内環境における伝搬損失特性、伝搬遅延時間特性及び到来角度特性を同時に扱える時間・空間電波伝搬モデルに関する高信頼なモデルを明確にする必要がある。

### 2. 研究の目的

時間・空間電波伝搬モデルの研究開発において、屋外見通し内あるいは見通し外環境における伝搬遅延プロファイルと到来角度プロファイルを同時に推定できる電波伝搬モデルの実験的な導出が試みられており、その成果は国際電気通信連合の勧告として標準化がなされている。一方、屋内環境においては、無線 LAN 搭載 PC、ゲーム専用機及びデジタル家電等の普及により無線通信の利用が急増している。また、WiFi 及び WiMAX 搭載端末では屋外と屋内の区別なく利用できることが求められている。屋内環境で 사용되는無線通信システムの設計や通話品質の評価を行うためには、高精度な屋内電波伝搬モデルが不可欠である。

本研究の目的は、スマートフォン及びタブレット PC などの高速モバイル端末の利用に代表される高速・広帯域モバイルネットワーク構築を支援するための屋内伝搬特性推定および回線設計に適用する数値評価手法を提案し、その有効性を検証することである。

### 3. 研究の方法

次世代高速モバイルネットワーク構築に貢献する大規模屋内電波伝搬シミュレーションを実施できる応用ソフトウェアを開発する。利用可能な大型計算機システムの多くがクラスタシステムであることを考慮して、ソルバには時間領域差分法に基づくアルゴリズムを採用する。さらに、その有効性を検証するため北海道大学情報基盤センターに設備されている大規模・超高速スーパーコンピュータシステム HITACHI SR16000 モデル M1 を利用した超並列計算機シミュレーションを実施する。その計算精度及び大規模分散メモリ型並列計算に必要な計算資源量や計算時間等の性能を検討する。一方、計算機シミュレーション結果の妥当性は、現実のオフィス環境を利用した測定結果と比較検討を行うことで検証する。そのため、普段利用している建物複数階分に相当する数値モデルを開発する。その際に、妥当な解析結果を得るための空間分解能や建物構成要素の有無によるシミュレーション結果への影

響等を明確化する。検討する周波数帯は無線 LAN システムで使用されている 2.4GHz 帯及び 5GHz 帯とし、それら周波数帯間での計算結果の差異について議論する。

### 4. 研究成果

(1) 電波伝搬特性推定及び評価のための大規模電磁界解析システムの開発と計算機シミュレーションによる評価を行った。大規模電磁界解析システムの開発にあたっては、時間領域差分法(FDTD 法)に基づくアルゴリズムを採用し、現在の大型計算機の主流であるクラスタシステムで合理的な時間内に結果が得られるよう大規模分散メモリ型並列処理に適用した。ソフトウェアは下記(2)で説明する数値モデルを読み込むためのインタフェースを備え、必要に応じて随時機能拡張を行っている。計算機シミュレーションでは本学情報基盤センターで利用サービスを行っている大型計算機システム HITACHI SR16000 モデル M1 を利用し、単一フロア及び複数フロアの解析に対して論理演算ノード 40 台または 80 台を使用し、いずれも約 20 時間の処理時間でシミュレーション結果を得ることができる。さらに、計算機シミュレーションで生成される大規模データを効率よく保存・利用するために汎用的なデータ形式 HDF5 (Hierarchical Data Format)をソフトウェアに実装し、データ圧縮機能によるファイル容量の低減と計算機プラットフォームに依存しないデータ取り扱いを可能にした。

開発を行ったソフトウェアを *Jet* FDTD と命名し、希望者に対して利用サービス及び利用支援を行っている。今後も、機能拡張や解析対象の充実に対応していく予定である。

(2) 一般的なオフィス環境を想定した電波伝搬特性推定及び評価のため、数値モデルの開発とそれを利用した計算機シミュレーションを行った。オフィス環境として、本学情報基盤センター北館 3 階及び 4 階を数値モデル化した。オフィスビルでは、外壁や床・天井などのコンクリート構造内部に鉄筋や鉄骨が含まれている。屋内伝搬特性推定において、これら金属構造物の影響を無視することはできない。そこで、建築図面等で鉄筋構造を調査し、それらを数値モデル化した。次に、5GHz 帯 IEEE802.11n/ac 規格に準拠した無線 LAN システムを利用した屋内電波伝搬推定を計算機シミュレーションにより行うため、空間分解能 10mm の数値モデルから高分可能な数値モデルを作成するソフトウェアツールを開発した。この成果に基づいて、空間分解能 5mm 及び 2.5mm の数値モデルを作成した。これら 3 種類の数値モデルを利用して計算機シミュレーションを行い、周波数 5GHz では計算資源量と計算時間を考慮して、空間分解能 5mm の数値モデルが適していることを示した。なお、周波数 2.4GHz においても同一の数値モデルを使用することとした。

コンクリート壁内部の鉄筋構造の数値モデル表現を容易にするため、有限範囲内の周期構造をコンパクトに表現する新たな手法を開発し、その設定方法を提案した。具体的には、キーワードと数値パラメータを組合せて周期構造を数値モデルとして表現する手法である。この手法を利用することで、コンクリート壁および床内部の鉄筋構造を同一構造単位ごとにテキスト1行で表現することが可能になり、従来の数値モデル表現と比較して10分の1以下の行数で表現できるようになった。この結果、数値モデルの開発及び修正等を短時間で実行できる環境が整備された。

上記(1)に示した *Jet* FDTD 及び数値モデルを利用し、周波数 2442MHz 及び 5200MHz について計算機シミュレーションを行った。それら結果から、単一フロアの解析結果では什器による影響が無視できないことを明らかにした。さらに、複数フロア間の透過損失がコンクリート壁内部の鉄筋構造に依存することを見出し、屋内伝搬特性推定を実施する際に有効なデータを提示した。

(3) 伝搬遅延時間特性及び電波到来角度特性を推定する手法として、数値モデルとポイントングベクトルを同時に可視化する方法を提案した。これにより、大規模電磁界シミュレーション結果から導出されるポイントングベクトルの可視表示に基づく伝搬チャネル推定及び評価を行うことで、MIMO-OFDM 通信において重要なマルチパス伝搬路を高精度に求めることができることを明らかにした。以上の結果、伝搬遅延時間特性及び電波到来角度特性を推定するために有効なデータ取得法を確立した。

伝搬経路推定方法について、無線 LAN 子機から親機に逆にたどる方法を試みた。計算機シミュレーションでは、空間離散格子における6つの電磁界成分が求められることから、それら成分からポイントングベクトルを求める。親機から子機への伝搬経路を特定するために、子機からポイントングベクトルに沿って、逆方向に一定の割合で移動する。検討結果から、無線 LAN 親機及び子機間の伝搬経路を示すことができたが、不自然な屈曲などが観測された。この理由は、経路推定において追跡している信号成分が随時変化しているためである。これは空間内に多数の信号強度が異なるマルチパス波が存在すること及び数値解が低空間分解能であることが原因であると考えられる。したがって、経路推定にあたっては空間分解能の向上あるいは障害物が存在しない空間では電波が直進することを仮定した解析が必要である。

(4) 無線 LAN アクセスポイントの最適設置位置決定を支援するための進化した計算手法を利用したシミュレーション法を示し、計算時間短縮を目的とした並列化手法を検討した。進化した計算手法として、パラメータフリ

ー遺伝的アルゴリズム(PfGA)及びマイクロ遺伝的アルゴリズム(MGA)について検討した。これらアルゴリズムは煩雑なパラメータの設定なしに自動最適化を実現することから、汎用的かつ利用が簡便である。マイクロ波フィルタ設計を利用した並列処理特性評価検討は、逐次処理に比較して PfGA では22倍、MGA では26倍を実現できた。この結果から、MGA は並列処理に高度に適合し、少ない処理時間で最適値に到達することを明らかにした。さらに、MGA のさらなる高速化を目的に集団に含まれる個体数を変化させた検討を行い、子個体生成のための交叉処理において最良個体の出現割合を常に一定にすることで個体数を増加するほど少ない世代数で最適値を見出すことができることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

京谷 篤, 大宮 学, 無線 LAN システムのオフィス環境複数フロア間での伝搬損失および伝搬チャネルに関する検討, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, 40 巻, 2016, 25-28

京谷 篤, 大宮 学, オフィス環境における隣接フロア間屋内電波伝搬損失の考察, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, 39 巻, 2015, 41-44

H. Otani, S. Yamaguchi, S. Yonezawa, M. Omiya, A Large-scale numerical Simulation of Indoor Radio Wave Propagation for a Wireless LAN System, 2015 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 査読有, 1 巻, 2015, 312-314  
DOI:10.1109/COMP.EM.2015.7052645

H. Otani, S. Yamaguchi, Y. Maeda, M. Omiya, High-speed, Automatic and Optimal Design of Microwave Filter Using Genetic Algorithm, 2014 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 1 巻, 2014, 163-164  
DOI:10.1109/ISANP.2014.7026581

H. Otani, S. Yamaguchi, Y. Maeda, M. Omiya, A Parallelization Method of Genetic Algorithms for Optimal Design of Microwave Filter, 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics, 査読有, 1 巻, 2014, 211-212  
DOI:10.1109/iWEM.2014.6963711

山口 将一, 米澤 聡, 大宮 学, 5GHz 帯無線 LAN システムの屋内伝搬チャネルモデリング, 映像情報メディア学会技

術報告, 査読無, 38 巻, 2014, 5-8

大谷 元, 山口 将一, 前田 祐史, 大宮 学, 遺伝的アルゴリズムに基づく自動最適設計法の並列処理に関する比較検討, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, 38 巻, 2014, 1-4

大宮 学, スーパーコンピュータを利用した大規模電磁界シミュレーション, 映像情報メディア学会技術報告, 37 巻, 査読無, 2013, 57-64

米澤 聡, 前田 祐史, 大宮 学, 什器を備えたオフィス環境における 2.4/5GHz 帯無線 LAN システムの屋内伝搬特性, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, 37 巻, 2013, 21-24

前田 祐史, 米澤 聡, 大宮 学, 遺伝的アルゴリズムに基づくダイクロイックフィルタの自動最適化設計, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, 37 巻, 2013, 17-20

〔学会発表〕(計 20 件)

京谷 篤, 無線 LAN システムのフロア間伝搬損失に関する検討, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 2016 年 3 月 16 日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)

A Kyoya, Electromagnetic Simulations and Numerical Models for an Accurate Prediction of Indoor Radio Wave Propagation in an Office Environment, 2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2016 年 2 月 25 日, 広州 (中国)

師 捷, 並列処理マイクロ遺伝的アルゴリズムの個体数に関する検討, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会 2015 年 11 月 7 日, 北見工業大学(北海道・北見市)

京谷 篤, 無線 LAN システムの複数フロア透過損失に関する検討, 平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2015 年 11 月 7 日, 北見工業大学(北海道・北見市)

大谷 元, パラメータフリー GA によるダイクロイックフィルタ自動最適設計のための並列処理手法に関する比較検討, 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 8 日, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県・仙台市)

京谷 篤, 無線 LAN システムの屋内伝搬特性推定のための電磁界シミュレーションと数値モデル, 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 8 日, 東北大学青葉山キャンパス(宮城県・仙台市)

大宮 学, 無線 LAN システムの複数フロア間での屋内伝搬損失特性の測定に基づく検討, 2015 年電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 12 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県・南草津市)

大宮 学, FDTD 法による電磁界解析での活用, 第 1 回名古屋大学情報基盤センター・ネットワーク型共同研究シンポジウム, 2015 年 1 月 20 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

K. Hagita, Efficient Data Compression by Efficient Use of HDF5 Format, International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'19), 2014 年 11 月 20 日, New Orleans (USA)

大谷 元, パラメータフリー GA に基づく自動最適設計の並列処理に関する比較検討, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2014 年 10 月 25 日, 北海道科学大学(北海道・札幌市)

趙 巍, デュアルバンド無線 LAN システムのオフィス環境複数階での屋内伝搬特性, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2014 年 10 月 25 日, 北海道科学大学(北海道・札幌市)

大宮 学, デュアルバンド無線 LAN システムの屋内伝搬に関する大規模数値電磁界シミュレーション, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 25 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)

大谷 元, パラメータフリー GA によるダイクロイックフィルタ自動最適設計の並列処理と速度向上度の関係, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 23 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)

大宮 学, 大規模数値シミュレーションに基づくデュアルバンド無線 LAN システムの屋内伝搬チャネル推定, 映像情報メディア学会 2014 年年次大会, 2014 年 9 月 2 日, 大阪大学吹田キャンパス(大阪府・吹田市)

大宮 学, HPC に基づく高速・高精度屋

内電波伝搬シミュレーション,2014年電子情報通信学会総合大会,2014年3月19日,新潟大学五十嵐キャンパス(新潟県・新潟市)

米澤 聡,什器を備えたオフィス環境における5GHz帯無線LANの屋内伝搬,平成25年度電気・情報関係北海道支部連合大会,2013年10月19日,室蘭工業大学(北海道・室蘭市)

山口 将一,遺伝的アルゴリズムを利用したダイクロイックフィルタの自動最適設計への並列処理の適用,平成25年度電気・情報関係北海道支部連合大会,2013年10月19日,室蘭工業大学(北海道・室蘭市)

前田 祐史,ダイクロイックフィルタの自動最適設計における遺伝的アルゴリズムの比較,平成25年度電気・情報関係北海道支部連合大会,2013年10月19日,室蘭工業大学(北海道・室蘭市)

米澤 聡,什器を備えたオフィス環境における5GHz帯屋内伝搬特性,2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会,2013年9月18日,福岡工業大学(福岡県・福岡市)

前田 祐史,進化型計算に基づくダイクロイックフィルタの自動設計,2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会,2013年9月18日,福岡工業大学(福岡県・福岡市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://fox49.hucc.hokudai.ac.jp/~omiya/records/fund.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大宮 学 (OMIYA, Manabu)

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号: 30160625