

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04385

研究課題名（和文）第5世代移動通信システム実現のための高精度無線伝搬特性推定基盤技術研究

研究課題名（英文）Fundamentally technical study of highly precise prediction of radio wave propagation characteristics to build the fifth generation mobile communication system

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） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、第5世代(5G)移動通信システム実現のために必要な屋内及び屋内から屋外への伝搬特性を推定する数値解析手法の提案と、それを利用した特性推定である。

5G移動通信では高速通信を実現するため、28GHz帯を利用することから、この周波数帯での電波伝搬特性を明らかにすることが急務である。さまざまな屋内環境における伝搬特性を明らかにするためには、測定よりも数値解析が有効である。本研究では、28GHz帯での伝搬特性推定を行うための大規模電磁界解析手法の提案を行った。さらに、会議室及び戸建住宅に関して数値解析を行い、計算資源や計算時間などの基本的要件ならびに数値結果の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

5G移動通信システムでは高速通信を実現するために、28GHz帯ミリ波周波数と数十メートルを通信範囲とするスモールセルを利用する。28GHz帯における屋内及び屋内から屋外への伝搬特性推定に関する検討は未だ十分に行われておらず、その研究成果が期待されている。

研究代表者の研究グループが開発を行っている伝搬特性推定のための数値解析手法及び数値モデル化手法を高精度化及び高速化し、28GHz帯における伝搬特性推定に適用した。それら検討から、さまざまな屋内環境における伝搬モデルを明らかにし、その標準化に貢献した。

研究成果の概要（英文）：Objectives of the research are proposing a numerical method to compute indoor and indoor-to-outdoor propagation characteristics and predicting them, which is necessary to build the fifth generation (5G) mobile communication system.

Since the frequency band of 28 GHz is utilized to perform the high-speed communication in the 5G system, clarifying radio wave propagation characteristics in the frequency band is one of urgent research subjects. Calculations is more effective than measurements to predict propagation characteristics in various indoor environment. At first, the work proposed a method of large-scale electromagnetic field computation to predict radio wave propagation characteristics in the 28 GHz band. Second, the fundamental requirements such as computer resources and computational times were discussed as well as the reliability of numerical results for the propagation characteristics in a conference room and a residential house.

研究分野：工学

キーワード：通信工学 無線通信 移動体通信 5G 屋内電波伝搬 ミリ波 数値解析 電磁界解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) インターネットを利用するスマートフォンなどの携帯端末の普及及び IoT (Internet of Things) の導入によって、短期間に膨大なトラフィックの増加が予想されることから、それを高速かつ高効率に処理することが緊急の課題である。このようなことから、5G 移動通信システムに関する研究が世界各国において行われている。5G 移動通信では高速通信を実現するために、これまで利用されていなかった 28GHz に代表される新たな周波数帯の利用が想定されている。したがって、5G 移動通信を実用化するためには高周波数帯における伝搬損失、マルチパス波の到来遅延時間及び到来角度特性などの伝搬特性を明らかにすることが必要である。

(2) 研究代表者の研究グループにおいては、Wi-Fi などで利用されている 2GHz 及び 5GHz の周波数帯での屋内伝搬特性を高精度に推定するための数値解析手法の提案及び数値モデルの開発を行っており、多くの研究成果を報告している。そのひとつとして、時間領域差分(FDTD)法に基づく大規模電磁界解析のためのアプリケーションソフトウェアの開発に成功している。これまで培ってきた数値解析技術が、5G 移動通信で利用される 28GHz 帯の屋内伝搬特性推定にも有効であることが期待できることから、それを確認及び検証することが必要である。さらに、28GHz 帯においては、壁面及び什器などの形状や電気特性を注意深く検討する必要があるものと考えられる。したがって、これまで開発を行ってきた数値解析手法及び数値モデルの適応範囲と新規の開発要件を明らかにすることが、5G 移動通信を実現するために重要である。

2. 研究の目的

5G 移動通信システムを実現するために必要不可欠な屋内伝搬特性及び屋内から屋外への伝搬特性を高精度に推定可能な数値解析手法の確立と、それを利用した特性推定を行う。5G 移動通信では高データスループットを実現するために、28GHz 帯の高周波数を利用し、スモールセルと呼ばれる数十メートルの通信範囲を対象とする。28GHz 帯における屋内伝搬及び屋内から屋外への伝搬特性推定に関する検討は未だ十分に行われておらず、その研究成果が期待されている。研究代表者の研究グループが開発を行った 2GHz 帯及び 5GHz 帯における屋内伝送特性及び屋内から屋外への伝送特性の数値解析に基づく推定方法及び数値モデル化手法を高精度化及び高速化を実現し、28GHz 帯における屋内伝搬特性の推定を試みる。これにより、28GHz 帯における伝搬モデルを提案し、その標準化に貢献する。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者の研究グループが開発を行っている大規模電磁界解析システム Jet FDTD を利用して、28GHz 帯における伝搬特性推定の実行方法に関する基本的なデータ収集を行う。これまで 2.4GHz 帯及び 5GHz 帯を対象として、空間分解能 5mm で解析対象の数値モデル化を行った。28GHz 帯では、波長が前述の周波数帯と比較して 6 から 10 分の 1 程度になることから、推定精度を確保するためには空間分解能を 1mm 程度にすることが望ましい。さらに、従前の研究においては、オフィス環境フロア 1 階分を解析対象としていたが、28GHz 帯では伝搬範囲が限定されることから、高精度な伝搬特性推定を実現するために考慮すべき伝搬範囲を特定する。また、これまでの研究では大規模数値解析に利用する演算ノード数を 40 ないしは 80 としていた。本研究においては空間分解能を向上したことで、数値解析に必要な演算ノード数は百ノード以上になることが想定される。これら並列計算を実行するにあたり、演算ノードのネットワーク構成と並列プロセスの割り当てについて最適な方法を検討する。さらに、計算処理時間を計測し、数日程度で処理を完了可能な演算ノード数の決定及びプログラムチューニングを実施する。

(2) 会議室及び戸建住宅内部に設置されたアクセスポイント(送信器)を想定した屋内伝搬特性及び屋内から屋外への伝搬特性の推定を行い、得られた数値結果を既存の測定結果と比較する。その際、室内什器の構造、配置及び電気定数、コンクリート壁及び床内部の鉄筋構造の数値モデル化を検討することで、高精度な推定を可能にする。

4. 研究成果

(1) 計算機シミュレーションに基づいて、周波数 28GHz における伝搬特性及び通信可能範囲などの基本的な屋内伝搬特性推定を行った。始めに、アプリケーションソフトウェアとして開発を行っている大規模電磁界解析システム Jet FDTD を汎用的なスーパーコンピュータで利用するため、コードをスレッド並列化及び分散メモリ型並列処理に対応させ、さらに高速化のためのプログラムチューニングを実施した。併せて、電磁界成分値を保存する変数を単精度実数にすることで、数値的に取り扱う伝搬環境が大規模な解析対象であっても、倍精度実数の場合に比較して、必要な演算ノード数を 2 分の 1、実行時間を約 0.7 倍にすることができることを明らかにした。次に、周波数 28GHz での測定結果が報告されている会議室について数値モデルを開発した。その外寸は 11.73m×9.04m×4m、部屋内部に配置された金属キャビネット、机及び椅子などの什器を含めた。28GHz の波長が約 11mm であることから、空間分解能を 1mm とした。数値モデルを 104 個の空間領域に分割し、104 台の演算ノード(総 CPU コア数 4,160 個)及び総主記憶容量 35.4TB を利用した分散メモリ型並列処理により、屋内の電磁界成分の時間変化を求めた。この場合、電

磁界成分が定常状態に達するまでに必要な実行時間は約 120 時間(5 日間)であった。得られた電磁界分布の数値データを解析することで、伝搬特性を評価し、その結果が測定結果と一致する傾向が得られていることを確認した。以上のことから、計算機シミュレーションに基づく周波数 28GHz での屋内伝搬特性推定が可能であることを示した。

(2) 計算機シミュレーションで得られた会議室モデルの電磁界分布を利用して、統計解析に基づく屋内伝搬特性の推定を行った。会議室は外寸が 11.73m×9.04m×4m であり、レンガ外壁、2 面のコンクリート壁及び 1 面のガラス壁で囲まれている。内部には 7 台の金属キャビネット、会議机及び椅子などの什器が配置されている。見通し内環境及び見通し外環境、床上部及び会議机上部、主偏波成分及び交差偏波成分の全組合せについて伝搬損、シャドウファクタ及び交差偏波識別度などの伝搬特性パラメータの推定を行った。推定結果は、他の研究グループが報告している測定結果と傾向が一致することを明らかにした。交差偏波識別度が 14dB 以上であることから、交差偏波成分に比較して主偏波成分が支配的であることを示した。これは、会議室が広い空間であるのに対して、配置されている什器などの数が少ないのが原因であると考えた。ただし、外壁や金属キャビネットからの反射波は、それら近傍の床上部における電界強度分布に大きな影響を与え、それら領域では特徴的な伝搬特性になることを示した。

(3) 2 階建て戸建住宅モデルを開発し、計算機シミュレーションを実施した。大規模並列処理に適合させるために、全空間を演算ノードの主記憶容量に適合させて小領域に分割した。このとき、小領域は可能な限り立方体を近似するような形状とした。その結果、1 周期当たりの処理時間は、会議室モデルの場合に比較して 0.85 倍まで短縮された。解析空間内部の電磁界分布の数値結果に基づく予備的な検討から、次のことを明らかにした。戸建住宅では比較的狭い空間内に壁、ドア、間仕切り、什器等が配置されていることから、多数のマルチパス波が存在する環境である。また、屋内から屋外への伝搬は、窓ガラスを透過した成分及び金属窓枠に反射した成分が顕著である。すなわち、ミリ波周波数帯における電波は直進性が強いことから、壁、間仕切り及び什器の影響を受け易い。したがって、アクセスポイント(以後、AP と略称)設置位置に依存して、通信可能範囲が変化する。そこで、2 つの AP 設置位置を仮定し、伝搬特性推定及びそれらの比較検討を行った。ただし、AP 設置位置は住宅の 1 階中央付近または居間コーナ壁付近であり、床面からの高さは 1.7m である。ただし、戸建住宅及び什器等を 1mm の空間分解能で数値モデル化した。屋内及び屋内から屋外への伝搬特性推定のための計算機シミュレーションに必要な総主記憶容量は 58TB、180 台の演算ノードを利用した場合 6000 周期までの演算時間が 6.3 日であった。計算機シミュレーション結果として、戸建住宅内部及び屋外における受信電力の時間変化を示した。また、定常状態における伝搬損分布を求め、伝搬損モデルパラメータを導出した。2 つの AP 設置位置に関して導出された伝搬損モデルパラメータの比較検討を行い、屋内における伝搬損モデルパラメータは AP 設置位置に依存しないことを明らかにした。最後に、屋内から屋外への伝搬特性を示し、屋外での移動通信に対応可能な AP 設置位置について、戸建住宅の構造を考慮して検討した。その結果、次の結論を得た。すなわち、AP を住宅の中心に設置した場合、AP と観測点の間に窓ガラスが存在する屋外環境では受信電力が大きい。一方、AP を居間コーナ壁付近に設置した場合、屋外環境では受信電力が大幅に低下する。これは、伝搬方向が窓の幅方向に平行であるため、窓ガラスを透過する成分が少ないためである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 S. Nagatomo, M. Omiya	4. 巻 WE-1F
2. 論文標題 Computer Simulation of 28 GHz Millimeter-wave Propagation in Residential House Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/ISAP47258.2021.9614598	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Nagatomo, M. Omiya	4. 巻 M-6
2. 論文標題 Calculation of Electromagnetic Field Distribution for Predicting Indoor 28 GHz Millimeter-wave Propagation Characteristics in Residential House Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Technical Digest of 4th International Workshop on Photonics applied to Electromagnetic Measurements (PEM2021)	6. 最初と最後の頁 31-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Nagamoto, M. Omiya	4. 巻 MO-A4.1A.4
2. 論文標題 Prediction of 28 GHz Millimeter-wave Indoor Propagation Characteristics in a Residential House	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)	6. 最初と最後の頁 231-232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Nagamoto, M. Omiya	4. 巻 TUA25-4
2. 論文標題 Highly Precise Prediction of 28 GHz Indoor Radio Wave Propagation Characteristics in an Office Environment for Design of 5G Wireless Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2020)	6. 最初と最後の頁 113-116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TENCON50793.2020.9293708	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Nagamoto, M. Omiya	4. 巻 H2-4
2. 論文標題 Characterization of 28 GHz Millimeter-Wave Propagation in an Indoor Office Environment Based on Large-Scale Computational Electromagnetic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020)	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34385/proc.63.H2-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Nagamoto, M. Omiya	4. 巻 2G4-3
2. 論文標題 Prediction of 28 GHz Propagation Characteristics in an Indoor Office Environment Based on Large-scale Computer Simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020)	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Saito, M. Omiya	4. 巻 PS-4
2. 論文標題 Prediction of 5.2 GHz Indoor-to-outdoor Propagation through Concrete Walls in an Office Building	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition 2019	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/iWEM.2019.8887910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Saito, M. Omiya	4. 巻 TA1P-P.42
2. 論文標題 Predicting Outdoor Angular Characteristics and Power Distribution of Wireless LAN Signal Leaking from an Office Building	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 International Symposium on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長本さんご, 大宮 学
2. 発表標題 戸建住宅環境における屋内から屋外への28GHzミリ波伝搬に関する考察
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大宮 学, 長本さんご
2. 発表標題 5G無線ネットワーク設計のための屋内28GHzミリ波伝搬特性推定
3. 学会等名 令和3年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長本さんご, 大宮 学
2. 発表標題 大規模計算電磁気学に基づく戸建住宅の28GHzミリ波伝搬特性評価
3. 学会等名 令和2年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大宮 学
2. 発表標題 屋内から屋外への電波伝搬に関する屋外RSSI分布の推定
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------