

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04003

研究課題名(和文) マイクロ波・ミリ波移動通信のための高角度分解能電波伝搬特性に関する研究

研究課題名(英文) Study of High Resolution Directional Characteristics of Radio Propagation Channels for Microwave and Millimeter Wave Mobile Communications

研究代表者

高田 潤一 (Takada, Jun-ichi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：90222083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、10GHz以上の周波数帯において狭ビームアンテナを用いた移動通信システムを実現するための基礎研究として、高い角度分解能で電波伝搬特性を測定する装置(チャンネルサウンダ)を構築して伝搬路の角度特性を実験的に明らかにするとともに、伝搬環境中の散乱物体の詳細な形状データを使用した電波伝搬特性予測のためのシミュレーション技術を開発し、これらの成果を用いて狭ビームアンテナ向けの無線通信路モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：This study aims at realizing the mobile communication system utilizing narrow beam antennas at the frequency above 10GHz. Specifically, the instruments measuring the radio propagation characteristics, known as a channel sounder, with high directional resolution are built for the experiments. In parallel, simulation technique utilizing the detailed geometrical data for the propagation prediction is implemented. These results were used to construct the highly directional radio channel models for narrow beam antennas.

研究分野：工学

キーワード：電波伝搬 マイクロ波 ミリ波 移動通信 通信路モデル 角度特性

1. 研究開始当初の背景

セルラシステムに代表される移動通信システムはわずか 30 年の間に急速に普及し、その使用形態も音声から、データ、画像へと多様化してきている。それに伴いビットレートは、数 kbps から今や数十 Mbps に達し、先ごろ標準化された第 4 世代方式では Gbps に迫っている。今後も通信量は年 60-70% の割合で指数関数的に増大すると言われている。しかし、現在移動通信に使われている 6GHz 以下の周波数帯は既に様々な無線システムにより稠密に使われており、近い将来に必要とされる超高速無線システムを実現するためには高周波数帯の開拓が必須である。具体的に移動通信で高周波数帯を活用するための仕組みとして、広い範囲をカバーできる UHF 帯で制御信号を伝送し、データ通信はスモールセルと呼ばれる狭いサービスエリアで高周波数帯を用いて高速に行う、という方式が、移動通信の国際標準化機関である 3GPP でも議論されるようになってきた。

高周波数帯における移動通信の実現には様々な挑戦がある。高周波数帯は広帯域を確保でき高速伝送には有利である一方で、自由空間伝搬損失が非常に大きいために現在の携帯電話のセルサイズ (数百 m-数 km) を実現することは極めて難しい。半径 100m 以下の小セルを対象に通信を行う場合でも、通信速度に比例した伝送電力が必要となるため、アンテナのビーム幅を狭くして通信路利得を上げ、ユーザの移動に対して動的にビーム方向を追尾する技術が必要不可欠となる。特に高周波数帯においては人体による送受信アンテナ間の遮蔽でも受信電力が 20dB 以上減衰するため、この場合でも反射波・散乱波などにアンテナ指向性を向けることによって回線を確保する必要がある、見通し外の電波伝搬特性を明らかにすることが重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、10GHz 以上の周波数帯における狭ビームを用いた移動通信システムを実現するための基礎研究として、高い角度分解能での電波伝搬特性を実験的に明らかにし、散乱物体の詳細な形状データを使用した電波伝搬特性予測のためのシミュレーション技術を開発し、これらの成果を用いて狭ビームアンテナを含む無線通信路モデルを構築することを目指した。11GHz、25GHz、28GHz、38GHz、60GHz など様々な周波数帯が次世代移動通信システム用周波数の候補とされており、複数の周波数帯で検討を行うことによって、電波伝搬及び無線通信路特性の周波数依存性も明らかにすることができ、システム構成上の様々なトレードオフを検討する際にも有用な知見となる。

3. 研究の方法

本研究では、10GHz を超える複数の高周波

数帯において、屋内・屋外の半径 100m 以内を対象として、高い角度分解能での電波伝搬特性を明らかにし、これを元に同じく狭ビーム幅のアンテナを含む無線通信路の決定論的及び確率論的モデルを構築することを目指した。具体的には、

- (1) 高い角度分解能で電波伝搬特性を測定するチャンネルサウンダの構築
 - (2) 移動通信環境を対象とした高角度分解能の電波伝搬特性の測定と散乱経路の同定
 - (3) 散乱物体の幾何データを用いた散乱波の予測方法の確立
 - (4) 狭ビームアンテナを含む無線通信路の決定論及び確率論的モデルの構築
- の 4 つの項目に分けて研究を進めた。

4. 研究成果

- (1) 高い角度分解能で電波伝搬特性を測定するチャンネルサウンダの構築

チャンネルサウンダは電波伝搬路の遅延時間および角度に関するスペクトラムを測定する装置である。遅延時間測定には複数周波数の正弦波信号を重畳する、あるいは正弦波信号を広い周波数帯域で掃引して送信することで、伝搬路の周波数特性を測定し、フーリエ逆変換を用いて遅延スペクトラムを求める方法、疑似雑音系列など自己相関関数が鋭い単一ピークを持つ送信波形を使用し受信側では相互相関器を用いて直接遅延スペクトラムを求める方法などがある。角度測定には多素子のアレーアンテナを使用しビームフォーミング (整合フィルタ) を用いて角度スペクトラムを求める方法、ビーム幅の狭い高利得アンテナを回転して直接角度スペクトラムを求める方法などがある。

本研究では、現有の測定装置を最大限に活用し、また実際に実験試験局の免許を取得できる周波数帯域として (a) 12.8-12.95GHz、(b) 31.8-32.8GHz、(c) 58.3-58.7GHz で動作する高角度分解能チャンネルサウンダを構築した。(a) のチャンネルサウンダは周波数掃引により広帯域測定を行うベクトルネットワークアナライザに、光ファイバ無線方式の 16 素子切り替えアレーアンテナを装着した構成となっている。ベクトルネットワークアナライザは元々回路素子の伝達関数を測定する装置であり、送受信点間の距離に比例した高周波ケーブルが必要となるため、10GHz を超える帯域では同軸ケーブルの損失が大きく、10m を超える測定が困難となる。このため、受信アンテナが受けた高周波信号を光に変換して長距離伝送できる仕組みとしている。系を構築し、受信系およびアレーアンテナの校正手法を確立した。光ファイバの温度による線膨張の影響が各チャンネルの絶対位相に影響を及ぼすため、詳細な検討を行ったが、同一長の光ファイバを使用した場合、チャンネル間の相対位相誤差の影響は殆どないことを確認した。電波暗室にて動作確認の実験を行い、校正後の測定系で到来角・遅延

時間ともに正確に測定できることを確認した。(b)のチャンネルサウンダにもベクトルネットワークアナライザを使用しているが、角度スペクトラム測定にはビーム幅の狭いホーンアンテナを使用し方位角・仰角の2軸回転台に取り付けて走査する方式とした。ただし、このチャンネルサウンダは後述する理由で使用していない。(c)は過去のプロジェクトで構築した2x2MIMOチャンネルサウンダに、自動制御可能な2軸回転台に取り付けたビーム幅の狭い垂直偏波・水平偏波の高利得アンテナを接続し、両偏波成分を同時測定ができる構成を実現した。

2017年度には、ドイツ・フラウンホーファー集積回路研究所およびイルメナウ工科大学が構築した(d)30.0-37.0GHz、(e)57.0-64.0GHzで動作する高角度分解能チャンネルサウンダを借用する目処が立ち共同実験を実施する準備を整えた。(d)(e)は疑似雑音系列を用いた構成で、両者は高周波部以外は同一の回路を使用している。なお、電波免許の取得が研究期間中に間に合わず、実験自体は本研究期間の終了後に実施している。

(II) 移動通信環境を対象とした高角度分解能の電波伝搬特性の測定と散乱経路の同定

電波伝搬特性の測定については、屋内及び屋外見通し環境を対象として(c)のチャンネルサウンダを使用して実施した。このほか、角度分解能はやや低いものの過去の研究プロジェクトで取得した(f)10.8-11.2GHzの測定結果も使用した。いずれの実験結果についても、測定データから高角度分解能で散乱経路を同定する方法を適用している。当初は、いずれも既存の解析方法であるCLEANアルゴリズム(c)およびSAGEアルゴリズム(f)を使用していたが、推定性能及び処理速度を改善するためにSubgrid CLEANアルゴリズム(c)およびEM/NLCGアルゴリズム(f)を提案し、有効性を確認している。また、現在使われているUHF帯での標準的な通信路モデル化手法に準拠して、パラメタ推定の結果として得られた経路に対して、類似のパラメタをもつものをクラスタ化した。(c)および(f)の結果を従来のUHF帯域と比較し、クラスタの角度広がり周波数にほぼ依存しないことを明らかにした。

また伝搬角度・遅延情報から、幾何光学理論と3次元環境データを用いて散乱点位置を推定し、これを用いてクラスタ化する手法を提案した。従来法と提案法で、それぞれ構築した確率的通信路モデルと実験結果を、通信路容量の累積分布で比較し、提案法がより誤差が小さいことを示した。

さらに、散乱経路と全立体角カメラで撮影した環境画像と組み合わせて、散乱物の高分解能同定を行っており、(III)および(IV)への応用を可能とした。

(III) 散乱物体の幾何データを用いた散乱

波の予測方法の確立

伝搬環境を構成する各種の散乱物体の幾何データ取得方法については、すでにレーザスキャナを利用した高分解能測定法が実用化されているが、装置が高価である上に点群データの処理が難しいため、代替手段について検討した。まず、3次元画像計測手法について主に市販のソフトウェアを用いて実験的に検討を行い、表面材料の不均一性や凹凸をmm単位で正確に測ることはほぼ不可能であるが、散乱物体の概形の取得は可能であることを確認した。ただし、この場合もデータ形式は点群データとなるため処理の難しさは変わらない。このため、近年実用化された表面データをCAD形式で直接出力できる3次元レーザ測定器について検討を行うこととし、同測定器を所有するイルメナウ工科大学より借用することとしたが、チャンネルサウンダ同様に本研究期間終了までに評価が間に合わず、最近検討を開始したところである。

次に幾何データを使用した散乱波の予測方法については、すでに確立されている三角メッシュに対する物理光学法のシミュレーション手法を実装し、十分な計算精度が得られることを確認した。しかしながら、実際の電波伝搬環境における点群データからの三角メッシュの構成に関しては、特に複数視点から取得したデータの結合が必要となる場合には困難を極め、また幾何データ取得に関して述べた通り、十分な精度をもって取得できるものではないことから、現時点では、点群データを3次元CADに読み込んで、点群を参照しながら多面体を構築する、という現行法が妥当であると判断した。

(IV) 狭ビームアンテナを含む無線通信路の決定論及び確率論的モデルの構築

決定論的モデルの構築においては、(III)で述べた物理光学法のシミュレーションを、理想的なガウス過程で表される粗面に対して適用し、伝搬角度及び遅延時間の広がり特性を明らかにした。角度特性については、表面粗さが波長の1/8波長程度までは、正規反射成分が卓越し、レベルのみが低下する振る舞いが見られるが、それよりも粗さが大きくなると、拡散散乱の影響が卓越し、ほぼ全方向に同程度のレベルの拡散散乱波が発生することを確認した。また、遅延時間領域で観測すると、垂直入射の場合には、ほぼ同様と遅延応答が見られるのに対して、斜入射に対しては、平面の場合には端部回折の影響が見えるのに対して、表面粗さが増加すると面上のすべての点から同程度の強さの波が遅延軸上に広がった形で到来する、という現象が確認された。

確率的モデルは、(II)で述べた実験結果から得られたクラスタパラメタを使用し、現行の標準チャンネルモデルと同じ枠組みでランダムに発生させた伝搬経路を重畳することで実現した。実測結果とモデル結果を、通信

路容量の累積分布により比較して、両者が一致していることを確認し、モデル化が妥当であることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件, すべて査読あり)

- ① Kentaro Saito, Yunyi Yao, and Jun-ichi Takada, "Parameter Estimation Refinement of MIMO Propagation Channel by Non-Linear Conjugate Gradient Approach," IEICE Communications Express, Vol. 7, 2018 (accepted for publication).
<http://www.comex.ieice.org/>
- ② Minseok Kim, Jun-ichi Takada, and Kentaro Saito, "Multi-dimensional Radio Channel Measurement, Analysis and Modeling for High Frequency Bands," IEICE Transactions on Communications, vol. E101-B, no. 2, pp. 293-308, Feb. 2018 (invited).
DOI:10.1587/transcom.2017ISI0003
- ③ Panawit Hanpinitasak, Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, Minseok Kim, and Lawrence Materum, "Multipath Clustering and Cluster Tracking for Geometry-Based Stochastic Channel Modeling," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 11, pp. 6015-6028, Nov. 2017.
DOI:10.1109/TAP.2017.2754417
- ④ Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, and Minseok Kim, "Dense Multipath Component Characteristics in 11-GHz-Band Indoor Environments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 9, pp. 4780-4789, Sep. 2017.
DOI:10.1109/TAP.2017.2728087
- ⑤ Karma Wangchuk, Kento Umeki, Tatsuki Iwata, Pnawit Hanpinitasak, Minseok Kim, Kentaro Saito, and Jun-ichi Takada, "Double Directional Millimeter Wave Propagation Channel Measurement and Polarimetric Cluster Properties in Outdoor Urban Pico-cell Environment," IEICE Transactions on Communications, vol. E100-B, no. 7, pp. 1133-1144, Jul. 2017.
DOI:10.1587/transcom.2016EBP3303

[学会発表] (計53件)

- ① 村上厚介, 齋藤健太郎, 高田潤一, "光ファイバ無線技術を用いた 12GHz 帯 SIMO チャネルサウンダの開発," URSI-F

会合, no. 623, 2018.

- ② Diallo Djiby Marema, Kentaro Saito, and Jun-ichi Takada, "Identification of Scattering Objects in 11GHz Urban Microcell Radio Propagation Channels via Visual Inspection of 3D Images," URSI-F 会合, no. 622, 2018.
- ③ 三宅時生, 高田潤一, "物理光学法を用いた粗面散乱シミュレーション," 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, AP2017-204, 2018.
- ④ Minseok Kim, Tatsuki Iwata, Shigenobu Sasaki, and Jun-ichi Takada, "Millimeter Wave Indoor Channel Characterization using High Resolution Multipath Parameter Estimation," 電子情報通信学会短距離無線研究会, SRW2017-82, 2018
- ⑤ Dwi Joko Suroso, Kentaro Saito, and Jun-ichi Takada, "On Investigation of Directional Model for Large Spacing MIMO at 11 GHz Band - Eigenvalues Comparison of Measurement and Channel Synthesis -, " 電子情報通信学会短距離無線研究会, SRW2017-66, 2018.

[図書] (計1件)

- ① 高田潤一, 第5世代移動通信の電波伝搬 - 電波伝搬現象の本質的理解 -, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会アドバンスドワイヤレスシリーズテキスト, 2016.

[その他]

- ① ホームページ
<http://www.ap.ide.titech.ac.jp/>
- ② 東工大移動通信研究グループ年報
http://www.mcrg.ee.titech.ac.jp/?page_id=40

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 潤一 (TAKADA, Jun-ichi)
東京工業大学・環境・社会理工学院・教授
研究者番号: 90222083

(2) 研究分担者

金 ミンソク (KIM, Minseok)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 40467030

齋藤 健太郎 (SAITO, Kentaro)
東京工業大学・環境・社会理工学院・助教
研究者番号: 40756665