

令和元年6月13日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18102

研究課題名(和文)次世代移動通信のための高周波数帯 電波伝搬動的特性に関する研究

研究課題名(英文)High Frequency Band Radio Propagation Characteristics for the Next Generation Mobile Wireless Communication

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来移動通信システムではネットワーク容量の飛躍的な増大を実現するため10GHz帯以上の高周波数帯無線の利用が期待されているが、これらの周波数帯無線の移動通信システムへの適用性には不明な点も多い。本研究では構築したチャンネルサウンダ、また共同実験により得られたチャンネル測定データを用い伝搬チャンネルの特性解析を行った。特に高周波数帯では搬送波波長が短くなる事から床面や壁面の凹凸等による拡散散乱の影響がより顕著になる事や、伝搬チャンネルの周波数特性、また歩行者等による伝搬チャンネルの変動特性を明らかにし、そのモデリング手法の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、電波の拡散散乱モデルやその伝搬シミュレーション手法を確立する事で、将来システムの設計や性能検証に利用できる伝搬チャンネル情報を明らかにした点にある。また、研究を通して欧州の大学との共同研究・共同実験を行い、研究活動の国際化や人材交流に寄与する事ができた。本研究を展開し、より性能・信頼性の高い無線通信システムの確立に役立てたい。

研究成果の概要(英文)：The utilization of radio waves higher than 10 GHz is expected in the next generation mobile wireless network to achieve the drastic increase of network capacity. However, the application of those higher frequency bands to mobile communication also needs careful investigation. In this research, we investigated the propagation channel characteristics through the several channel soundings. Notably, we clarified that the scattering waves significantly affect the channel characteristics. The frequency dependency of the channel and the dynamic channel characteristics by pedestrians were also investigated.

研究分野：無線通信

キーワード：無線通信 電波伝搬 MIMOチャンネル 高周波数帯無線 拡散散乱 周波数特性 動的チャンネル

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやこれらの端末を用いたクラウドアプリケーション、動画サービス等の普及に伴い、移動通信におけるトラフィック量は急増しつつある。近年、これらの増大するトラフィックを収容してゆくため第5世代移動通信(5G)システムが盛んに検討されている。概要を図1に示す。5Gシステムでは、ネットワーク容量の飛躍的な増大を実現するために従来では移動通信に用いられて来なかった高周波数(10GHz帯～70GHz帯)・広帯域(500MHz～7GHz)無線の利用が期待されている。高周波数帯は大きい伝搬損失のため長距離通信には適さないが、既存周波数帯の通信を組み合わせる事で高周波数帯のカバレッジの欠点を補完する Phantom Cell Architectureが3GPP等の国際標準化機関で活発に議論されている。また高周波数帯スモールセル基地局(BS)では、非常に多数の素子からなるアレーアンテナを構成し、高利得ビームフォーミングや大容量空間多重伝送を柔軟に組み合わせる事で、通信距離・通信容量を増大させる Massive MIMO 伝送技術の検討等が盛んに行われている。

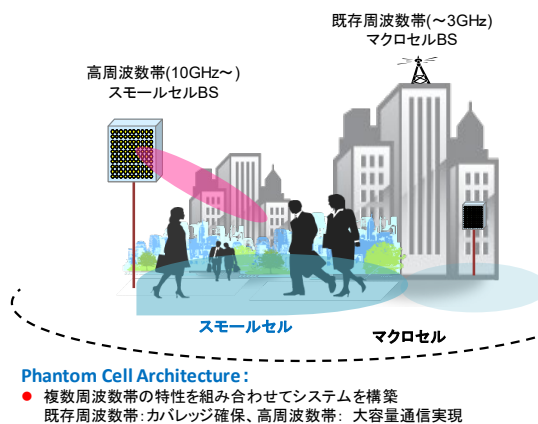


図1 将来無線ネットワーク概要

以上述べたように、将来移動通信システムではより一層高次の MIMO 伝送技術が必須となっているが、MIMO 伝送性能に大きな影響を及ぼす高周波数帯伝搬に関しては解明すべき様々な学術的な課題がある。図2に示す通り、基地局(BS)から移動機(MS)への電波伝搬は、直接伝搬路や建物壁面での正規反射路等の主要伝搬路を經由して伝搬する主要伝搬波(クラスタ伝搬)と床や壁表面等の凹凸や小さな構造物等による非正規散乱からなる拡散散乱波からなると考えられている。拡散散乱波に関しては電力遅延プロファイルが指数減衰に従う事等が知られているが、主に MIMO 伝送性能に影響を与える電力角度分布や偏波伝搬特性に関しては明らかにされておらず詳細な検討が必要である。他の課題としては、近距離・高周波数帯伝搬では伝搬路のフレネルゾーンが小さくなり看板等の小さな構造物や周辺歩行者による遮蔽の影響をより顕著に受けると考えられる。現在 Massive MIMO 伝送に関しては様々な技術検討が行われているが、伝搬路が歩行者に遮蔽される環境での伝送性能に関してはほとんど評価されていない。高周波数帯スモールセルが主にトラフィック逼迫地域、つまり混雑環境で利用されてゆく事を考慮すると、周辺歩行者による高周波数帯伝搬特性への影響の解明が必須である。

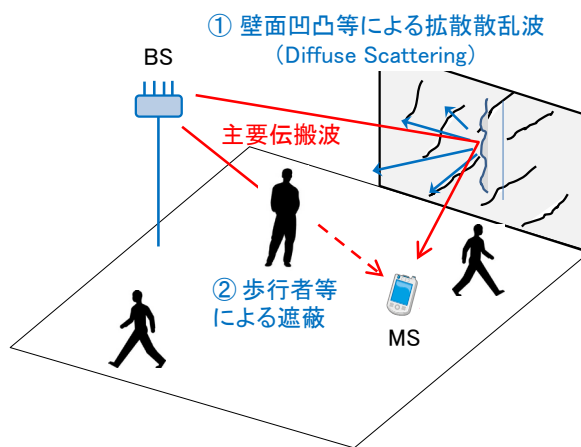


図2 高周波数帯伝搬の課題

2. 研究の目的

本研究では 10GHz 帯以上の高周波数帯において MIMO チャネル測定を行い、その特性解明、モデリング手法を確立する事を目的とする。まず、申請者の所属する研究グループが行った 11GHz 帯屋外/屋内チャネル測定データや新規に実施したチャネル測定データを用い、拡散散乱信号成分の推定手法を確立し、その特性評価を行う。本研究では電力の高い拡散散乱は壁や床での正規反射等の主要伝搬路とある程度類似した経路を伝搬すると考え、主要伝搬路と拡散散乱波の電力角度分布、Cross Polarization Ratio(XPR)の相関特性から拡散散乱伝搬パラメータを推定する新規手法を提案する。また屋外/屋内等の伝搬環境の違いが拡散散乱特性に与える影響を明確化する。

次に歩行者の存在する混雑環境において伝搬チャネル測定を行い、無人環境条件との比較により歩行者の MIMO チャネル特性に与える影響を明確化する。本研究では、測定を通して、特に歩行者による課題(A)で明確化を行った拡散散乱波への影響を明確化する。上記知見を用いて高周波数帯 MIMO チャネルモデルを新規提案し、Massive MIMO 伝送においてチャネル変動に追従するために必要な制御時間粒度、リンク確立時間分布等を明確化する。

また、高周波数帯の電波伝搬に適した伝搬シミュレーション手法についても検討を行う。これまで電波伝搬シミュレーションでは多面体状の建物での正規反射・回折を前提としたレイトレース法が広く用いられてきた。しかし建物壁面での凹凸等による拡散散乱波等を計算するためには、これらの影響をより正確に近似する手法が必要となる。本研究ではレーザスキャナやビデオカメラ等から得られた周辺環境幾何データを用い、物理光学近似及びモーメント法による電磁界シミュレーションを行う。電磁界シミュレーション結果と実験結果の比較を行い、測定の妥当性検証や伝搬メカニズムの解明に利用する。

### 3. 研究の方法

申請者の所属する研究グループが開発した 11GHz 帯 24×24 MIMO チャネルサウンダにより平成 24 年度に実施した屋外及び屋内チャネル測定データを用い、主要伝搬波と拡散散乱波の推定を行った。推定にあたって伝搬パラメータ推定プログラム(SAGE 法及び RiMAX 法)を作成した。伝搬パラメータ推定は多くの計算資源を必要とするため、申請者の所属する大学で開発・運営されている大規模分散計算環境 Tsubame を用い解析を行った。RiMAX 法では拡散散乱波の到来角度特性・偏波特性等が推定できないため、これらの新規パラメータ推定手法を検討した。具体的には伝搬データから主要伝搬波成分と拡散散乱波成分を取り除いた推定残差成分や、主要伝搬波成分の角度特性・偏波特性との相関を考慮して新規推定手法を検討した。屋外/屋内等、伝搬環境の違いが拡散散乱特性に与える影響を明確化した。

次にチャネルの動的特性測定については、Vector Network Analyzer (VNA)と RF スイッチを組み合わせた 12GHz 帯チャネルサウンダを新規開発した。VNA を用いた測定手法では、送受信機間をケーブルで接続する必要があり高周波数帯では長距離の測定に適さない。本研究開発では上記問題を解決するため Radio on Fiber (RoF)技術を用いた RF 回路を用い測定機開発を行った。屋内有人環境において伝搬チャネル測定を行い、無人条件時との比較から歩行者の主要伝搬波への影響(クラスタ数, クラスタ電力, クラスタ内遅延・角度分布)及び拡散散乱波への影響(時間・角度・偏波特性)を明確化する。測定時にはビデオカメラで同時に撮影を行い、各時刻の歩行者位置と伝搬チャネルの関係性を明確化する決定論的アプローチと、一定時間に渡る測定データからチャネル変動特性を明確化する確率論的アプローチを共に用いて検証を行った。

伝搬シミュレーション手法の検討では、デンマークの Aalborg 大学と共同で 2GHz から 28GHz の Super High Frequency (SHF)帯の伝搬チャネル測定を行った。SAGE 法を用いて到来波クラスタを推定し、伝搬チャネルの周波数特性を明らかにした。次に周辺環境の幾何データを用い、物理光学近似を用いた伝搬シミュレーションを行った。実測データとの比較を通し高周波数帯での物理光学近似シミュレーションの適用性について明らかにした。

### 4. 研究成果

11GHz 帯で測定した実験データを用い、屋外/屋内の様々な環境での到来波特性を解析した。電波の拡散散乱特性については、既存の拡散散乱モデルを拡張し、電波の遅延時間、到来角、偏波特性の統合的なモデリング手法を提案した。また RiMAX アルゴリズムを拡張し、主要到来波(Specular Multipath Component : SMC)と拡散散乱波(Dense Multipath Component : DMC)の伝搬パラメータをそれぞれ推定する手法を提案した。図 3 に 11GHz 帯で行った屋内伝搬測定データの解析結果の一例を示す。SMC は送受信機間を伝搬する直接波や壁面での正規反射波等に相当しており、特定の伝搬遅延・到来角度領域に偏在して存在している事が分かる。residual signal component (RSC)は測定データから SMC を減算した残差信号成分であり、DMC と測定ノイズに相当する。DMC は伝搬遅延・到来角度領域に広がって存在している事が分かる。提案チャネルモデルを用いて伝搬チャネルを作成し、実験データの再現性について評価を行った結果を図 4 に示す。SMC のみを用いてモデルデータを再構成した場合、見通し方向のチャネルについては再構成誤差が大きくなった。一方、SMC と DMC を用いてモデルデータを再構成した場合、モデルの再構成精度が大幅に改善している事が分かる。

図 5 に本研究で開発した 12GHz 帯チャネルサウンダを示す。VNA を用い送信ポートと受信ポート間の伝搬チャネル周波数応答を測定する。受信側は 16 素子アレーアンテナになっており、RF スイッチにより切り替えを行いながら測定を行う。また RF ケーブルによる伝搬損失を回避するため、RoF を用い、光ファイバを用い VNA に接続している。そのため、送受信距離が大きい条件でも伝搬測定を行う事が可能である。本測定装置を用いて有人環境で伝搬チャネル測定を行い、到来波クラスタの変動特性等を測定した。測定ではビデオカメラで同時に撮影を行っており、歩行者の位置と各到来波クラスタ電力の変動特性について決定論的なアプローチを用いて解析を行った。

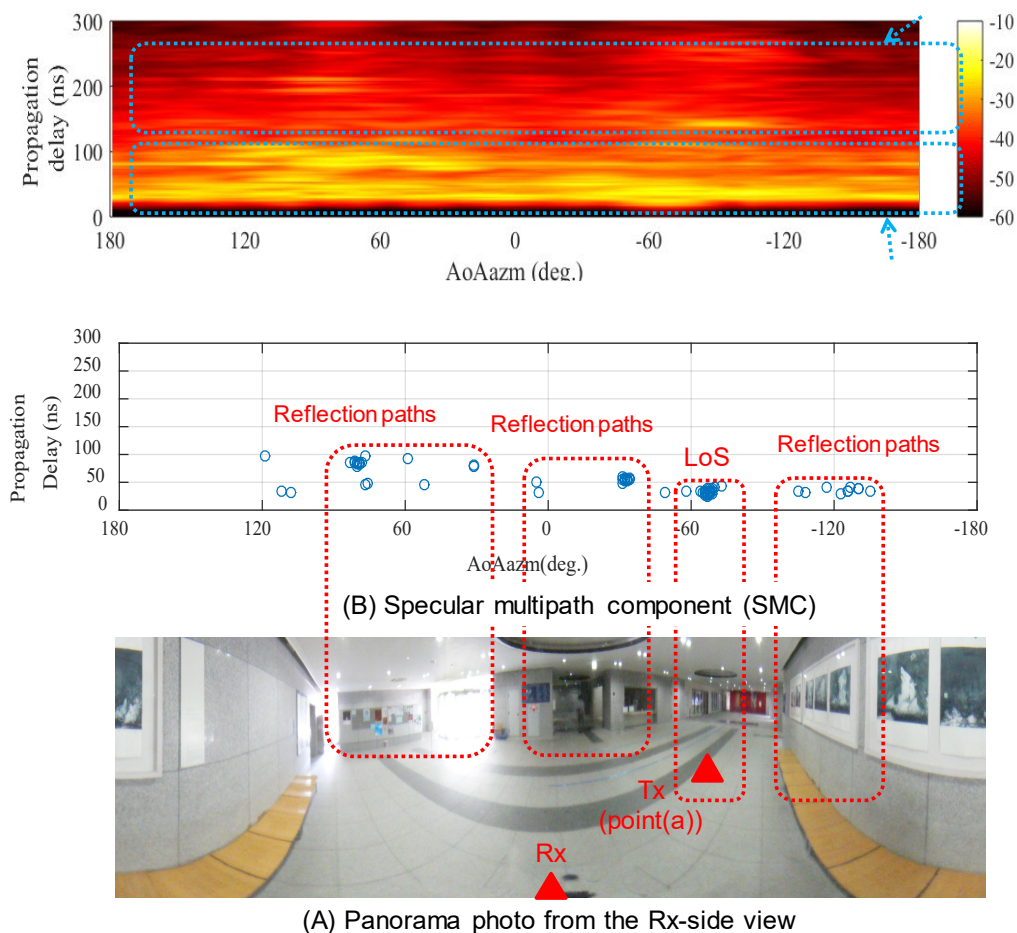


図3 屋内実験結果の例

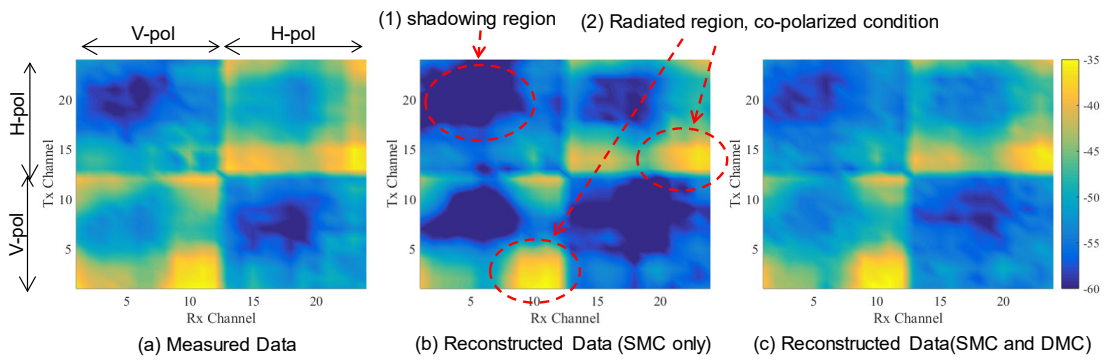


図4：伝搬チャネルの再現性

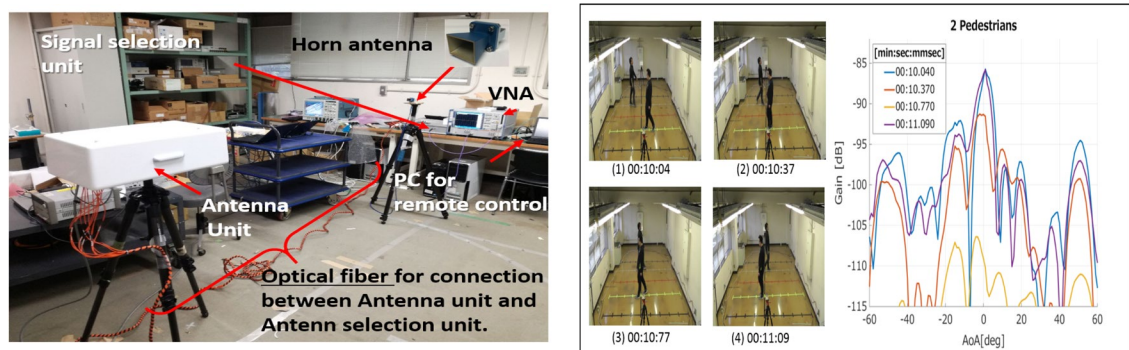


図5 RoF 技術を用いた 12GHz 帯チャンネルサウンダと有人環境における伝搬測定

図 6 に Aalborg 大学が開発した伝搬チャネルサウンダを示す。VNA をベースにした測定装置であるが、受信アンテナを回転台に設置し位置を変えながら測定を行う仮想アンテナアレーを用いる事で、単一の装置で複数の周波数帯の伝搬チャネル測定を行う事が可能である。本研究では、屋内の会議室、講義室、エントランスホール等、大きさや障害物の数の異なる環境で実験を行い、2GHz から 28GHz 帯にかけての伝搬チャネルの周波数特性についての検証を行った。またこれらの伝搬チャネル周波数特性を計算する事が可能な物理光学近似に基づく伝搬シミュレーション手法を確立し、実験データとの比較を通して適用性を示した。

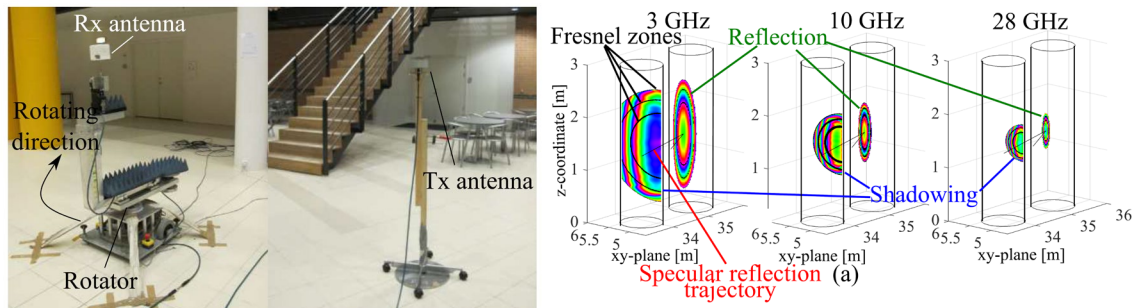


図 6 SHF 帯伝搬チャネルサウンダと物理光学近似を用いた伝搬シミュレーション

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (査読有, 計 6 件)

- [1] Panawit Hanpinitasak, Kentaro Saito, Wei Fan, Johannes Hejselbak, Jun-ichi Takada, Gert Frolund Pedersen, "Frequency Characteristics of Geometry-based Clusters in Indoor Hall Environment at SHF Bands", IEEE Access, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920890, 2019.
- [2] Brecht Hanssens, Kentaro Saito, Emmeric Tanghe, Luc Martens, Wout Joseph and Jun-ichi Takada, "Modeling the Power Angular Profile of Dense Multipath Components Using Multiple Clusters," in IEEE Access, vol. 6, pp. 56084-56098, Sep. 2018.
- [3] Kentaro Saito, Yunyi YAO, Jun-ichi Takada, "Parameter Estimation Refinement of MIMO Propagation Channel by Nonlinear Conjugate Gradient Approach Date of Evaluation", IEICE Communications Express, Vol.7, No.9, 328-333, Jul. 2018.
- [4] Panawit Hanpinitasak, Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, Minseok Kim, 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.
- [5] Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, 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.
- [6] Minseok Kim, Jun-ichi Takada, Kentaro Saito, "Multi-dimensional Radio Channel Measurement, Analysis and Modeling for High Frequency Bands", IEICE Transactions on Communications, vol. E101.B (2018), no. 2, pp. 293-308, Aug. 2017.

[学会発表] (計 21 件)

- [1] Kentaro Saito, Panawit Hanpinitasak, Wei Fan, Jun-ichi Takada, and Gert F. Pedersen, "Frequency Characteristics of Diffuse Scattering in SHF band in Indoor Environments", URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC) 2019, Mar. 2019.
- [2] Kentaro Saito, Panawit Hanpinitasak, Jun-ichi Takada, Wei Fan, Gert F. Pedersen. "Frequency Dependency Analysis of SHF band Directional Propagation Channel in Indoor Environment", 2018 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2018.
- [3] Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, Minseok Kim, "11 GHz band MIMO channel characteristics in a street micro-cell environment", EurAAP, 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2017, pp. 703-706, Mar. 2017.
- [4] Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, Minseok Kim, "Dense multipath component parameter estimation in 11GHz-band indoor environment", IEEE, 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2016, pp. 1-6, Sep. 2016.

- [5] Jun-ichi Takada, Minseok Kim, Kentaro Saito, “Characterization of Radio Propagation Channel at 11 GHz”, European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference, pp. 1-6, Jun. 2016.
- [6] Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, Minseok Kim, “Characteristics evaluation of dense multipath component in 11GHz-band indoor environment”, EurAAP, 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-3, Apr. 2016.
- [7] Panawit Hanpinitasak, Kentaro Saito, Jun-ichi Takada, Minseok Kim, Lawrence Materum, “Clustering method based on scatterer locations for indoor dynamic MIMO channel”, EurAAP, 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-4, Apr. 2016.
- [8] 齋藤 健太郎, 高田 潤一, チュートリアル講演 “アレー信号処理によるMIMOチャネル伝搬パラメータ推定”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 504, AP2018-190, pp. 23-28, 2019年3月.
- [9] 齋藤 健太郎, 高田 潤一, 金 ミンソク. 招待講演 “次世代無線通信システムに向けた電波伝搬研究の取り組み”, 電子情報通信学会技術研究報告 vol. 117, no. 363, SRW2017-64, pp. 25-30, Nov. 2017.
- [10] 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”, 電子情報通信学会 技術研究報告(短距離無線通信), Vol. 117, No. 178, pp. 19-24, Jul. 2017.

他 11件

〔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://www.ap.ide.titech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：高田 潤一

ローマ字氏名：Jun-ichi Takada

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。