

大学の研究・動向

第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

情報学研究科 通信情報システム専攻 通信システム工学講座 デジタル通信分野

教授 原 田 博 司

准教授 村 田 英 一

助教 水 谷 圭 一

1. はじめに

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、物と物との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用出来る周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、第4世代移動通信システムとしてLTEやWiMAX2などの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでいますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020年代の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第5世代移動通信システムの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室では第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、高周波帯を活用した端末共同超多重MIMO伝送技術、高能率スマート無線M2M通信システム、の3つのテーマを中心に研究活動を進めています。本稿では当研究室の研究動向およびその成果の一部を紹介致します。

2. 超広域ブロードバンド移動通信システム

第5世代移動通信システム（図1）においては、第4世代移動通信で実現出来なかった2つの項目を解決する必要があります。一つは、さらなるブロードバンド移動通信の実現です。LTEにおいては、5MHz/Chのチャンネルを最大4チャンネル利用して、下り最大伝送速度が約300Mbps、上り最大伝送速度が約75Mbps（いずれも64QAMを用いる場合）を実現します。そして、LTE-Advancedにおいては、さらにこのチャンネルを最大で20チャンネル束ねる事で、下り最大伝送速度3Gbps、上り最大伝送速度1.5Gbpsの実現を目指しています。第5世代移動通信システムでは、さらに10倍以上の伝送速度、すなわち10Gbpsオーダーの通信速度の実現が必要となる

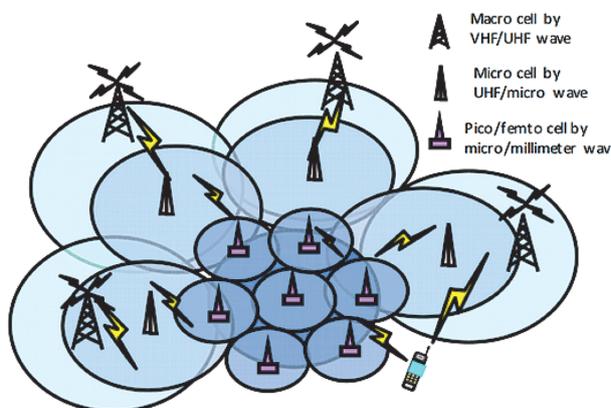


図1 第5世代移動通信のセル構成のイメージ[1]

とされています。

もう一つの解決すべき課題は、センサやメータ、モニタなどの人間以外の機器を携帯電話などのネットワーク基盤で収容する方策を検討する必要性です。しかし、この機器数は膨大であり、場合に寄っては現在の携帯電話網の加入者数を超える可能性すらあります。しかし、その伝送速度は決してブロードバンドではなく、高々一機器あたり数 100kbps で収容出来るものが多数です。

この2つの問題点を解決するためには、新しい周波数帯の利用を検討する必要があります。前者の問題を解決するためには、10GHz 帯以上の高い周波数帯の利用を検討するか、各周波数帯に存在する利用可能な周波数チャンネルを複数利用（周波数アグリゲーション）し、合計で目標とする伝送速度を実現するかのどちらか、もしくは両方を行う必要があります。この場合、各周波数帯で行っている情報伝送をどのように制御するのかという問題が発生します。もしこの制御情報を広域で伝送できれば、制御の一元化が可能となります。すなわち、ブロードバンド伝送用の周波数帯と、制御情報等を伝送するための広域通信システム用の周波数帯を持つことで、より効率的な伝送が可能となります。また、後者の問題を解決するためには、低速の通信速度ではあるものの、広域に伝送し、できるだけ多くのセンサやメータ、モニタなどの機器を収容する無線通信システムが必要となります。

本研究室では、この第5世代移動通信システムにおける広域通信網の必要性に着目し、第5世代移動通信システムにおける制御信号を広域に伝送するための手段として、また、多数のセンサ、メータ、モニタなどの機器を広域に収容するための広域通信システムとして、VHF 帯を利用した超広域ブロードバンド移動通信システムの利活用を提案しています。

VHF 帯における移動通信システムに関しては、2007 年 6 月に「地上テレビジョン放送のデジタル化により空き周波数となる VHF/UHF 帯における電波の有効利用のための技術的条件」として一部答申されました。この答申においては、170-205MHz を移動通信、特に公共、公益分野における共同利用型ブロードバンド移動通信システムの用途に割り当てられています。この答申を受け、「公共ブロードバンド移動通信システムの技術定条件」としてその技術基準が 2011 年 3 月に策定されました[2][3]。この規格、ARIB STD-T103 には、IEEE 802.16-2009[4]をベースとして、IEEE 802.16 規格そのものを



図2 開発した VHF 帯移動通信システムのフィールド（奈良県五條市）実証実験

利用するモード1と、IEEE 802.16規格が主に想定しているマイクロ波帯から、VHF帯に移行する場合に必要なパラメータ最適化を行ったモード2とがあります。さらにモード1の中にも、元々IEEE 802.16規格がもつ5MHz帯域幅で512ポイントのFFTサイズを使用するモードと、10MHz帯域幅で1024ポイントのFFTサイズを使用するものを5MHz帯域幅に圧縮してVHF帯の周波数選択性フェージングに対応するモードの2つがあります。これまでに、このシステムに関するコンセプト提案[5]や、電波伝搬特性取得[6]が行われ、送信電力20W、6dBiの3段コリニアアンテナを地上高45mに設置したときに、受信電力-80dBm(10MHz/Ch)を満足する範囲が基地局から10km弱であることが確認されています[6]。また、この規格に対応する無線機の開発も行われていますが[7]、64QAMまで完全動作し、移動通信環境下でも動作する無線機の設計開発は行われていませんでした。

本研究室では、VHF帯ブロードバンド移動通信システム規格ARIB STD-T103に準拠した、QPSK、16QAM、64QAM-OFDMAシステムの200MHz帯移動通信環境における運用を検討し、チャネル推定等化法の検討、前方誤り訂正符号利得の評価、システム全体としての通信品質シミュレーション評価を行う[8]とともに、実際に当該条件で運用可能な無線装置を開発しました[9]。開発した装置は、フェージングエミュレータを用いた伝送特性試験を行い、周波数選択性マルチパスフェージング環境においても10⁻⁶の誤り率が得られる事を実機により証明し[8][9]、屋外伝送特性、特に山間部でほとんど見通しのきかないNLOS環境において奈良県五條市にて実証フィールド試験を行い(図2)、このような過酷な通信環境でも2km以上のエリアにおいて数Mbpsの伝送が実現可能であることを、図3に示す通り実証しました[10]。

今後、さらに高度な復調信号処理の提案や、規格そのものの変更、新規提案、標準化を行いながら、さらなる超広域ブロードバンド化を目指します。

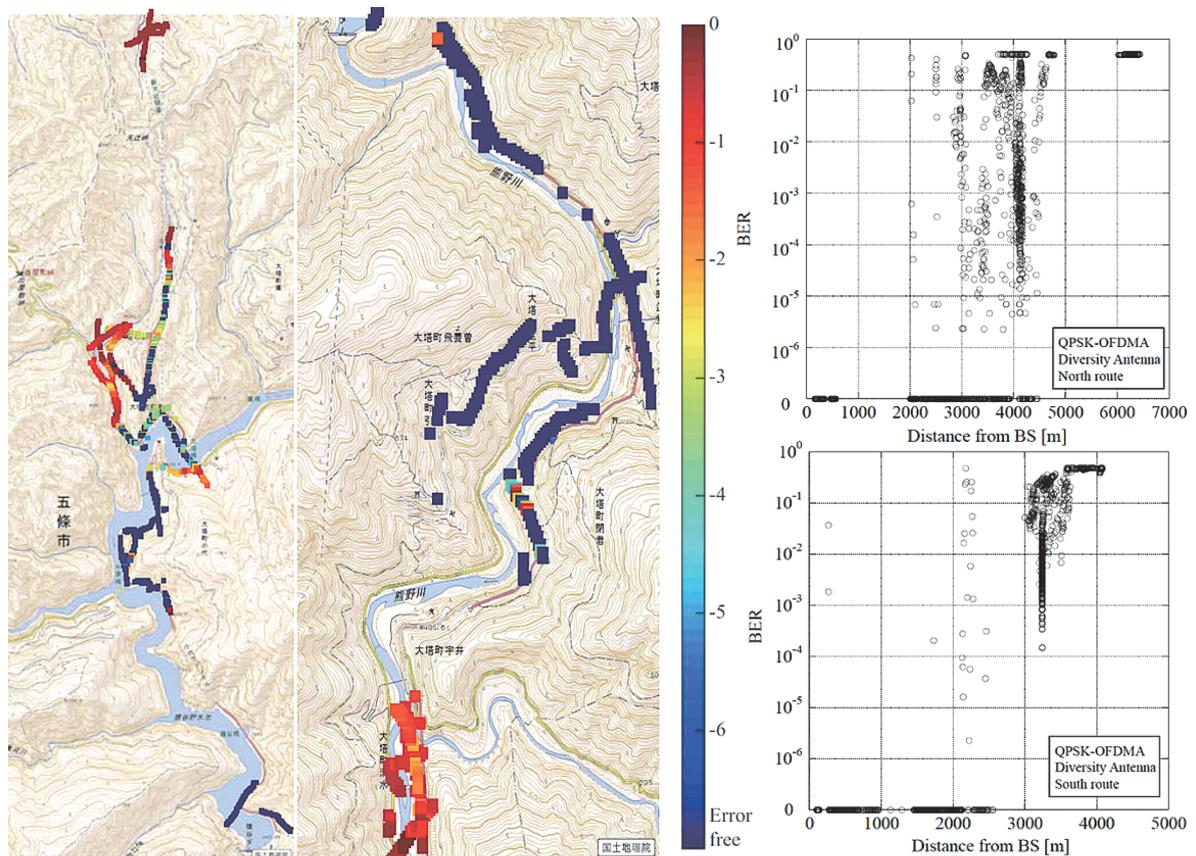


図3 山間部見通し外環境における広域伝送実証実験結果

3. 高周波数帯を活用した端末共同超多重 MIMO 伝送技術

携帯端末（3G HSDPA 系、LTE）や無線 LAN（IEEE 802.11n、802.11ac）では、周波数利用効率を向上する MIMO（Multi-Input Multi-Output）多重伝送が実用化されています。ある瞬間に同じ周波数を利用するのは 1 つのユーザ端末のみであるためシングルユーザ MIMO と呼ばれています。LTE では 2 ストリーム多重（同じ周波数で情報を 2 系統）伝送が、802.11n では 3 ストリーム多重伝送までが一般に普及しています。

MIMO 多重伝送に利用できるストリーム数は伝搬環境に依存しており、多くのストリームを効率よく利用するためには伝搬路の多様性が必要です。実際、無線 LAN 802.11n の例でも、3 ストリームが可能な機器を用いた際の伝送速度改善効果は環境に強く依存することが体験できます。同時に効率よく利用できるストリーム数を拡大し周波数利用効率を向上させるには、受信アンテナ数を増加させることやアンテナ間相関低減を狙ってアンテナを空間的に離して配置することが効果的です。しかし、これらでは物理的なサイズが増大してしまうため、携帯端末等では現実的ではありません。

このため、基地局から多ストリームを送信しつつ、少ないアンテナ数の携帯端末を複数同時に収容するマルチユーザ MIMO が盛んに研究されてきました[11,12,13]。マルチユーザ MIMO では携帯端末側での信号分離を補助するために基地局側においてプリコーディングが行われます。このプリコーディングは伝搬路状況に合わせて行う必要があるため伝搬路の変化に弱く、携帯端末の移動速度が大きく制限されてしまう課題があります。

移動による伝搬路変化がユーザ間干渉を引き起こしますが、十分な受信アンテナ数（受信信号数）が利用できれば無線信号処理によってこの干渉を効果的にキャンセルできます[14]。一方、ユーザが密集している電車・バス内では対地速度は速いもののユーザ間の相対位置関係に大きな変化はなく、携帯端末間には安定した通信が期待できます。このことを利用して図 4 のように各ユーザの携帯端末間に近距離の安定した協力関係を築き、共同信号処理グループとして利用することによって同一移動体内に超多素子の仮想アレイアンテナを構成すれば飛躍的に伝送特性が向上する可能性があります。それだけでなく、十分なアンテナ数が確保できれば携帯端末側に十分な信号分離能力が得られるため、プリコーディング送信自体が不要となります。

携帯端末のグループを構成するネットワーク技術は、アドホックネットワーク関連技術として研究が蓄積されています。特に移動環境においては MANET（Mobile Ad hoc Networks）や車々間通信ネットワークとして活発に研究されてきました。本研究は、このアドホックネットワーク技術を活用して携帯電話システムの周波数利用効率を改善するものと捉えることができます。特に、この携帯端末間の連携に用いるアドホックネットワークの周波数帯として、今後 5G で利用が検討されている高周波数帯の利用に着目している点が特徴です。

高周波数帯は、主にアンテナ開口が減少することに起因して伝搬損が増加するため近距離での利用が主となりますが、これまでよりも広い周波数帯域を確保できるため高速な伝送が可能となります。5G ではカバー範囲の狭いスモールセルでこの周波数帯を利用することが考えられていますが、本研究のシステムでは、スモールセルのカバー範囲外において、この高周波数帯を端末連携アドホックネットワークに活用します。これにより、端末間連携で問題となる、連携に要する周波数資源の確保と、連携に要する時間の問題を大幅に軽減できます。

以上のように、本研究では近傍の携帯端末間で受信信号を共有することにより等価的なアンテナ数を

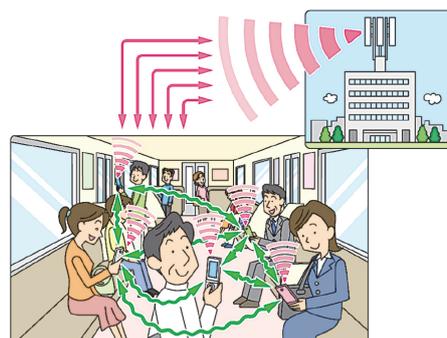


図 4 移動体内における携帯端末連携

増加させ、基地局との通信における周波数利用効率を格段に向上することに取り組んでいます[15]。この際、共有信号数を増加させるほど伝送特性が向上するものの、一方で共有に要する時間や電力などが増大するため、この削減が重要となります。そこで、伝搬路状況に応じて効果的な携帯端末をリアルタイムに選定し、適応的に受信信号を共有することに取り組んでいます。(端末間で受信信号そのものを共有することは簡単な一例であり、無線信号処理の観点からは種々の方法が考えられます)

例えば、伝搬路状況を知るための最小限の情報としてトレーニング信号のみを最初に携帯端末間で共有することが考えられます。この共有したトレーニング信号に基づき基地局からの信号の受信処理に有効な受信信号を適応的に選択する2つの手法を検討しました。本稿では、この手法の伝送実験結果を紹介します。

基地局アンテナを3号館南棟の塔屋屋上(地上高約25.5m)に設置し、等価等方輻射電力1Wで4つのQPSK信号を空間多重で送信しました。6台の携帯端末を車両に搭載し京都大学本部キャンパス外周を走行しました。図5に基地局アンテナおよび車両内部を示します。二つの信号選択手法との特性比較のため、全ての信号を共有する全受信信号共有法と、状況によらず単純に全ての組み合わせを順に選択するラウンドロビン(RR)法の特性も取得しています。できるだけ近い伝搬路において比較するために1フレーム50ms毎に4つの共有手法を切り替えました。現在、携帯端末間通信には無線LANを用いていますが、今年度中に12.8GHz帯に移行する計画です。

基地局からの信号を受信した携帯端末は、その受信波形中のトレーニング信号部分を1.7ms間隔で他の携帯端末に送信します。あらかじめ定められた携帯端末1台がそれらトレーニング信号から受信状況を把握し基地局信号の受信信号処理に最も適した受信波形組を決定し携帯端末に通知します(8ms区間TCP)。選択された携帯端末のみが基地局からの受信波形全体を1.7ms間隔でブロードキャストによって他の携帯端末に送信します。図6に各手法10パケット平均のビット誤り率(BER)の累積分布関数(CDF)を示します。予め定められた固定順で4信号を共有する4slot-RoundRobin法は、6信号を用いる全受信信号共有法(図中6slot-FullCollabo)よりもBER特性が大きく劣化しています。一方、適応的に4信号を選択し共有する2つの手法(4slot-MinError, 4slot-MaxMinSINR)ではBER特性の劣化を抑えられていることがわかります。

今後は、高周波数帯を用いた携帯端末間連携を実現し、この連携に適した無線信号処理方式、信号共有プロトコルなどについて研究を進めます。

4. 高能率スマート無線 M2M 通信システム

第5世代移動通信システムには人と人同士の通信以外にも、物と物同士の通信(M2M: Machine-to-Machine)も包括的統合的に組み込まれる予定です。このM2M通信では、図7に示すように、各種メータ、センサ、モニタに無線デバイスを具備させ、この無線デバイス間をSUN(Smart Utility Network)

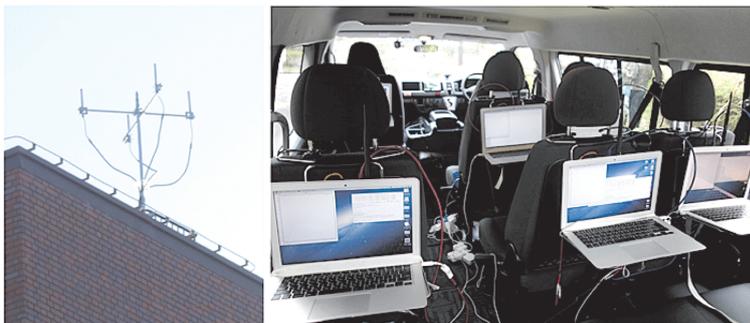


図5 基地局アンテナと車両内の移動局

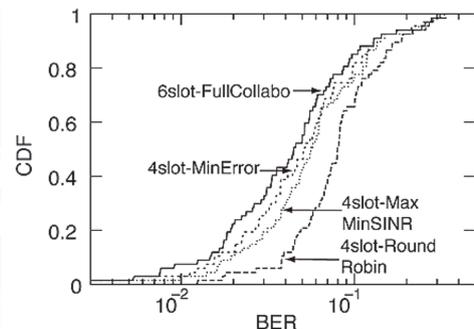


図6 BERのCDF特性

と呼ばれるネットワークを用いて接続し、各種メータ、センサ、モニタで取得した情報を広域に収集します。その収集した情報の解析結果をもとに、逆に各種メータ、センサ、モニタの制御を行う、双方向ネットワーク Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) の研究開発が国際的に行われています[16]。Wi-SUN は低消費電力通信が実現可能な IEEE 802.15.4g 規格[17]をベースにしており、その応用範囲は、最初は電気、ガス、水道などの次世代メータ、スマートメータからであったが、農業[18]、防災、交通などにも適用することが検討されています。農業、防災における Wi-SUN を考える場合、アクセスポイントからセンサ端末までの通信距離、すなわち通信エリアはできるだけ広い方がよい。IEEE 802.15.4g を用いたシステムは、日本においては 920MHz 帯を用い、送信出力は免許不要の場合は 20mW であるため、通信距離はオムニアンテナ使用時で約 500m である。この距離を数 km 程度まで拡大し、さらに交通などへの利用を考える場合、すなわち移動体通信を行う上で必要となる機能を研究開発する必要があります。

本研究室では、低 SNR・移動通信環境でも運用を可能とするために、搬送波周波数オフセット除去やシンボル同期を高精度に実現する高能率同期技術[19]や、アンテナダイバーシチ技術、前方誤り訂正技術などの復調信号処理を端末の低消費電力性を担保しつつ実現する技術[20]の研究開発を行っており、図 8 に示すように、開放地において現在の約 1.7 倍となる 6.5km、都市部において現在の約 2.0 倍となる 0.8km 程度の通信エリア拡大を見込んでいます。現在は既に開発しているプロトタイプ機[21]に随時提案技術を追加実装を行い、様々な実証フィールドにおける評価を進めています。

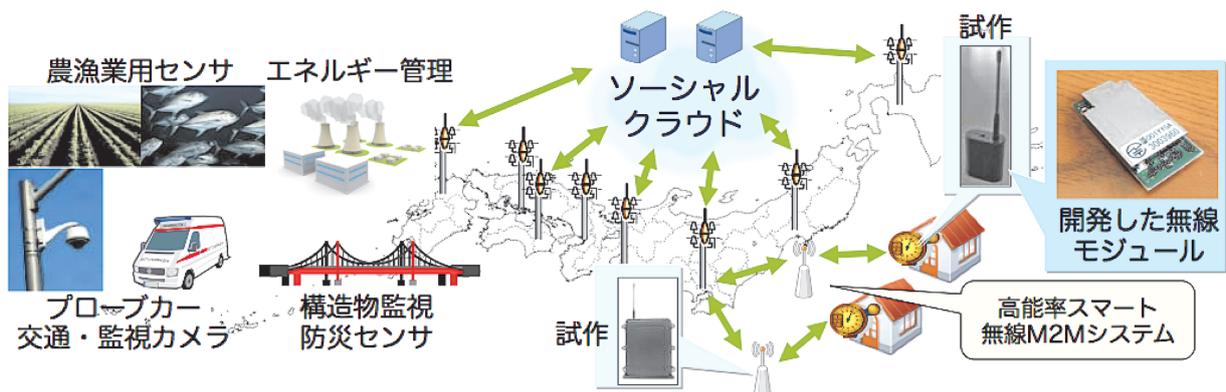


図 7 Wi-SUN が産み出す新たな社会アプリケーション

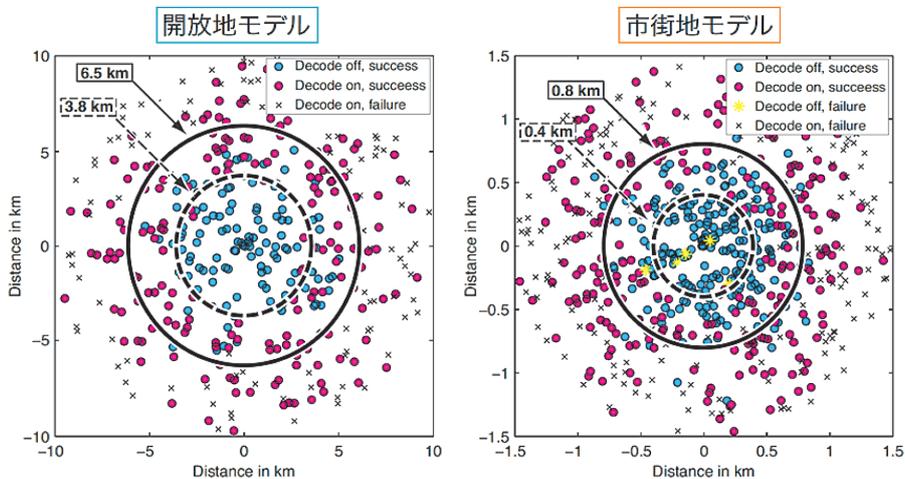


図 8 提案信号処理技術によるカバレッジエリアの拡大

5. おわりに

原田研究室での研究概要についてごく簡単なながらも紹介させていただきました。皆様のご理解とご支援をたまわれますと幸いです。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- [1] 原田他, “次世代移動通信システムにおけるワイヤレスクラウドを用いたダイナミックスペクトルアクセスに関する研究開発,” 信学技報, SR2013-95, pp. 109-216, 2014年1月.
- [2] ARIB STD-T103.
- [3] 大堂他, “VHF帯広帯域移動通信システム(可搬型)の物理層仕様について,” 信学技報, RCS2011-3, pp. 13-18, 2011年4月.
- [4] IEEE 802.16-2009.
- [5] 原田他, “VHF帯ブロードバンド移動通信システム～概要～,” 信学技報, RCS2008-87, pp. 205-210, 2008年8月.
- [6] 大堂他, “VHF帯ブロードバンド移動通信システム実現に向けた電波伝搬実験,” 信学技報, SR2008-21, pp.21-28, 2008年7月.
- [7] M. Oodo and H. Harada, “Current Status of 200 MHz band Public Broadband Wireless Communication System in Japan,” WPMC 2014, Sept, 2014.
- [8] 牧野, 水谷, 原田, “VHF帯ブロードバンド移動通信システムの受信機設計に関する検討,” 信学技報, RCS2014-333, pp. 189-194, 2015年3月.
- [9] 原田, 水谷, “VHF帯ブロードバンド移動通信システムの開発,” 信学技報, RCS2014-276, pp. 43-48, 2015年1月.
- [10] 原田, 水谷他, “ルーラルエリアにおけるVHF帯ブロードバンド移動通信システムの伝送特性,” 信学技報, RCS2015-45, pp. 119-124, 2015年5月.
- [11] Satoshi Nishino, Hidekazu Murata, “Experimental evaluation of low complexity user selection schemes for multi-user MIMO systems,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E98-A, no.2, pp.606-610, Feb. 2015.
- [12] 佐藤 弘基, 村田 英一, “マルチユーザMIMOにおけるタイミング同期及び推定タイミングに基づく周波数オフセット補償法,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J98-B, no.2, pp.188-196, Feb. 2015.
- [13] 齊藤 俊, 村田 英一, “ユーザ選択を用いた線形及び非線形MU-MIMOプリコーディングに関する実験的研究,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J98-B, no.2, pp.197-204, Feb. 2015.
- [14] Hidekazu Murata, Ryo Shinohara, “Performance improvement of ZF-precoded MU-MIMO transmission by collaborative interference cancellation,” IEICE Commun. Express, vol.4, no.5, pp.155-160, May 2015.
- [15] 林 勇治, 村田英一, “線形及び非線形信号処理を用いた端末共同干渉キャンセルの屋外伝送実験,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J98-B, no.7, July 2015.
- [16] 原田, “スマートユーティリティネットワーク:概要と標準化動向,” 信学技報, SR2010-48, pp. 57-64, 2010年10月.
- [17] IEEE 802.15.4g-2012.
- [18] 原田, “ソーシャルICTを実現するWi-SUN農業モニタリングシステム,” 信学技報, SR2010-48, pp.57-64, 2014年8月.
- [19] 小幡, 水谷, 原田, “広域M2M無線通信システムにおける搬送波周波数オフセット推定法に関する

検討,” 信学技報, SRW 研究会, 2015 年 6 月発表予定.

[20] 望月, 水谷, 原田, “IEEE 802.15.4g システムの広域化に関する検討,” 信学技報, SRW 研究会, 2015 年 6 月発表予定.

[21] 原田, 水谷, 望月, 小幡, “IEEE 802.15.4g を用いた広域・移動 Wi-SUN 通信システム,” 信学技報, SRW2014-54, pp. 43-48, 2015 年 3 月.