

セルフリー展開技術の最新動向

Technology Trends for Deployment of Cell-free System

菅野一生 村上隆秀 新保宏之 天野良晃

Abstract

セルフリーは、これまで移動通信システムの展開で利用されてきたセルの概念をなくし、均一な無線品質を面的に提供可能な技術として注目されている。一方、セルフリーの広域展開に向けては、無線信号処理や、ネットワークのスケールビリティの確保及び消費電力の削減といった様々な課題があり、研究開発が活発に行われている。本稿では、これらの課題に関連する要素技術と取組みを紹介する。

キーワード：セルフリー、分散アンテナ、ユーザセントリックネットワーク、無線アクセスネットワークアーキテクチャ

1. はじめに

世界各国で第5世代移動体通信システム(5G)のサービス展開が進められている。これと並行して、2030年頃の商用化を目指して、Beyond 5G/6Gの研究開発が進められており、多くのコンソーシアムが設立され、検討が活発に進められている^{(1)~(3)}。これらの検討によれば、Beyond 5G/6Gでは、高速・大容量、高信頼・低遅延、多接続といった5Gで求められている通信要件を更に拡大するとともに、通信エリアの拡大やエネルギー効率の改善といった新たな要件が加わる可能性がある。これらの要求に対応できる無線要素技術や周波数活用方法、無線アクセスネットワークアーキテクチャなどが幅広く検討されている。

要素技術の一つとして、セルフリー(またはCell-Free massive MIMO)が注目されている⁽⁴⁾。セルフリーではこれまでの移動通信システムに用いられてきたセルの概念を取り払い、多地点に分散して配置されたア

ンテナを連携させることで、これまで課題であったセル間干渉による性能劣化を大幅に低減することが期待できる。また、建物や樹木、人体等の遮蔽物による伝搬損影響が大きいミリ波帯において、多地点のアンテナが信号を送受信するマクロダイバーシチにより、信頼性を高めることが期待できる。このような性質を生かし、ユーザがどこにいても高品質な無線環境を提供できる。更に、接続されるユーザの通信要件に応じて、分散アンテナの連携信号処理や連携規模、ネットワークや計算機リソースを適切に利用することで多種多様な通信要件をどこでも満足できるユーザセントリックなネットワークを展開するための基盤技術となり得る。

セルフリーについては、分散配置したアンテナを連携させる観点で概念が共通するCoMP(Coordinated Multi Point)や分散MIMO等、関連技術の研究開発が幅広く行われてきた。また、屋内などの限定的なエリアにおいて実証実験なども進められている。一方、本技術を利用して広域にサービスエリアを展開するためには、まだ解決すべき課題が多く存在する。そこで本稿では、まず、セルフリー技術及びその要素技術について概説し、次に同技術を展開する観点で必要な技術やアーキテクチャ、及びその研究動向について解説する。

2. セルフリーの研究動向

2.1 セルフリーの概念

本章ではセルフリーについての基本原理と利点、構成

菅野一生 正員 (株)KDDI 総合研究所無線通信方式グループ

E-mail is-kanno@kddi.com

村上隆秀 正員 (株)KDDI 総合研究所電波応用グループ

新保宏之 正員: シニア会員 (株)KDDI 総合研究所電波応用グループ

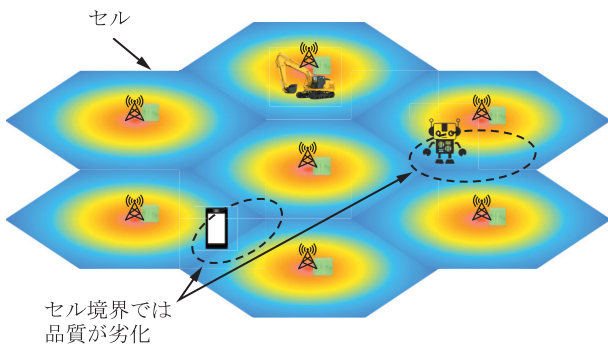
天野良晃 正員 (株)KDDI 総合研究所電波応用グループ

Issei KANNO, Member (Wireless Communication System Laboratory, KDDI Research Inc., Fujimino-shi, 356-8502 Japan), Takahide MURAKAMI, Yoshiaki AMANO, Members, and Hiroyuki SHINBO, Senior Member (Advanced Radio Application Laboratory, KDDI Research Inc., Fujimino-shi, 356-8502 Japan).

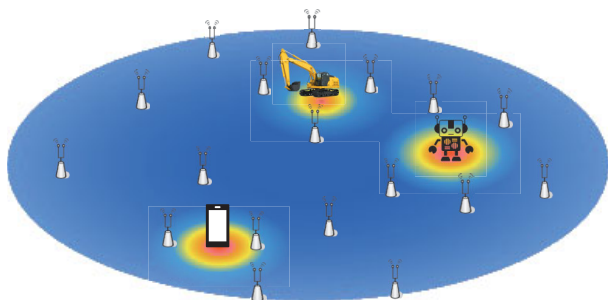
電子情報通信学会誌 Vol.106 No.9 pp.790-795 2023年9月

©電子情報通信学会 2023

要素を概説する。まず、図1を用いてこれまで利用されてきたセルラシステムとセルフリーの違いを説明する。同図(a)に示すように、現在の移動通信システムでは、各基地局が無線エリアとしてセルを形成し、セルを敷き詰めて配置することでサービスエリアを構築している。



(a)セルラシステム



(b)セルフリーシステム

図1 セルフリーの概念

端末は通信状態が良好なセルを選択し、該当するセルを形成する基地局との間で通信を行う。通信トラフィック需要が多いエリアではセルを密に配置することで通信容量を増加させる対応が取られている。しかしながらセルを密に配置すると、サービスエリア全体の通信容量を増やすことができるものの、セルの境界部分において干渉が発生し、通信品質を大きく劣化させる可能性がある。

セルフリーシステムでは、同図(b)に示すように、分散して配置した多数のアンテナやネットワーク機器が同時接続するユーザに適した通信エリアを適応的に構成することがコンセプトとして提案されている。すなわち、これまでのセルラがネットワーク中心にエリアが構築されているのに対し、セルフリーではユーザ中心にエリアを提供することから、これを実現するネットワークはユーザセントリックネットワークと呼ばれ、ユーザの場所によらず良好な通信品質を提供できる可能性がある。

2.2 セルフリーの構成要素と研究動向

図2にセルフリーの構成要素を示す。ターゲットエリアにアクセスポイント (AP: Access Point) としてアンテナを分散して配置し、各 AP はフロントホール回線を介して中央処理装置 (CPU: Central Processing Unit) と接続されている。ターゲットエリア内の端末 (UE: User Equipment) は AP を介して CPU と接続する。CPU では無線信号処理やアクセス制御が行われ、またコアネットワークとのインターフェースを有している。無線リンクでは時間・周波数分割したりリソースを空間多重してエリア内の UE とデータ通信を行う。空間多重を行う UE のアンテナと全 AP のアンテナの間の伝搬チャネルは大規模な MIMO チャネルとみなすことができ、空

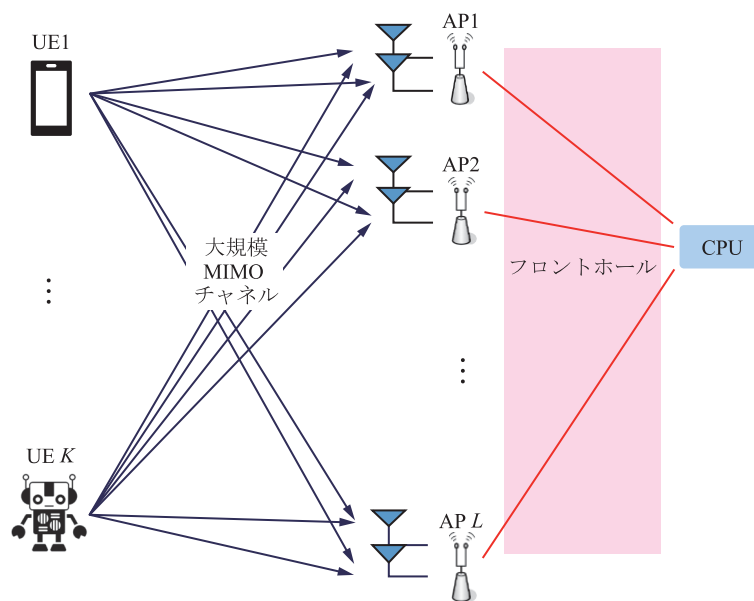


図2 セルフリーの構成要素

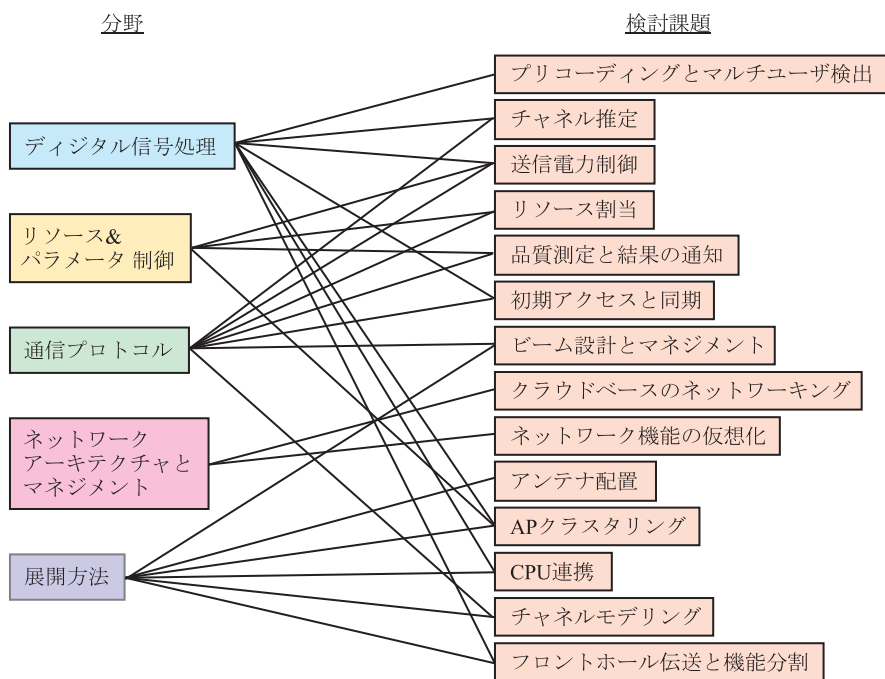


図3 セルフリーの実現に向けた検討領域

間信号処理を行うことで各ユーザの信号を分離することができる。このように分散して配置したアンテナの信号を集約して信号処理することでユーザ間干渉を低減でき、良好な通信品質を得ることが期待できる。

上記コンセプトの実現に向けて、研究が進められている検討領域を図3に示す。デジタル信号処理分野では、上記で述べたユーザを分離するためのダウンリンクのプリコーディングやアップリンクのマルチユーザ検出、またそのためのチャンネル推定技術が広く研究されている。これらには、これまで多く研究されてきたMIMOで用いられる空間信号処理を適用することが可能であるが、空間多重ユーザ数や展開規模に応じて計算量が爆発的に増加することから、スケーラビリティを確保する信号処理方式が必要となる。具体的には、ユーザごとに信号処理に用いるAP数を制限することで計算量を効果的に軽減するAPクラスタリング方式と組み合わせた低演算量の信号処理の検討が活発に行われている。また、時間・周波数リソースや送信電力、MCS (Modulation and Coding Scheme) などの無線通信パラメータを適切に制御することで様々な所要の通信品質を満たす仕組みについても検討が進められている。なお、分散配置したアンテナを効果的に連携させるためには、フロントホール回線を効率的に提供する必要がある。一般にトレードオフの関係にあるフロントホールの容量確保と信号処理性能のバランスが取れる効果的なAPとCPUの機能分割の検討が重要になっている。一例として、ミリ波帯やサブテラヘルツ帯を利用した超広帯域な無線信号伝送に適したアナログRoF (Radio over Fiber) や、広

帯域信号を多地点に効率良く多重伝送するIFoF (IF over Fiber) などの検討が進められている^{(5), (6)}。

3. 展開に向けたネットワークアーキテクチャ

セルフリーの展開に向けては、無線アクセスネットワーク (Radio Access Network: RAN) の構築が必要となる。RANは、無線通信を提供するUEとコアネットワークを接続する役割を担っており、信号処理部やデータ処理部等の基地局機能と、それらを接続する伝送路から構成される。3GPPでは、5GシステムのRANであるNext Generation RAN (NG-RAN)、及び基地局機能であるgNodeB (gNB) が定義されている。また、O-RAN Allianceでは、NG-RANの管理と制御を行うRAN Intelligent Controller (RIC) が定義されている。これらは、従来のセルラシステムを想定しており、セルフリーの信号処理の実現に向けた拡張の検討が必要である。

セルフリーの提案初期においては、単一のCPUにAPを接続し、全てのAPを連携して無線信号処理を行う概念が示された。しかし、RANの展開を都市全体と想定すると、全てのユーザの信号処理を一か所のCPUで実施することは、計算機リソースや伝送路の制約から現実的ではない。そこで、現実的なRANの構成が検討され、図4に示すように、複数のCPUを分散的に配置してAPを収容することで、特定の局舎の計算機リソースや伝送路へのトラヒックの集中を回避しつつ、基地局設備の柔軟な配置を可能とする構成が示されている。ま

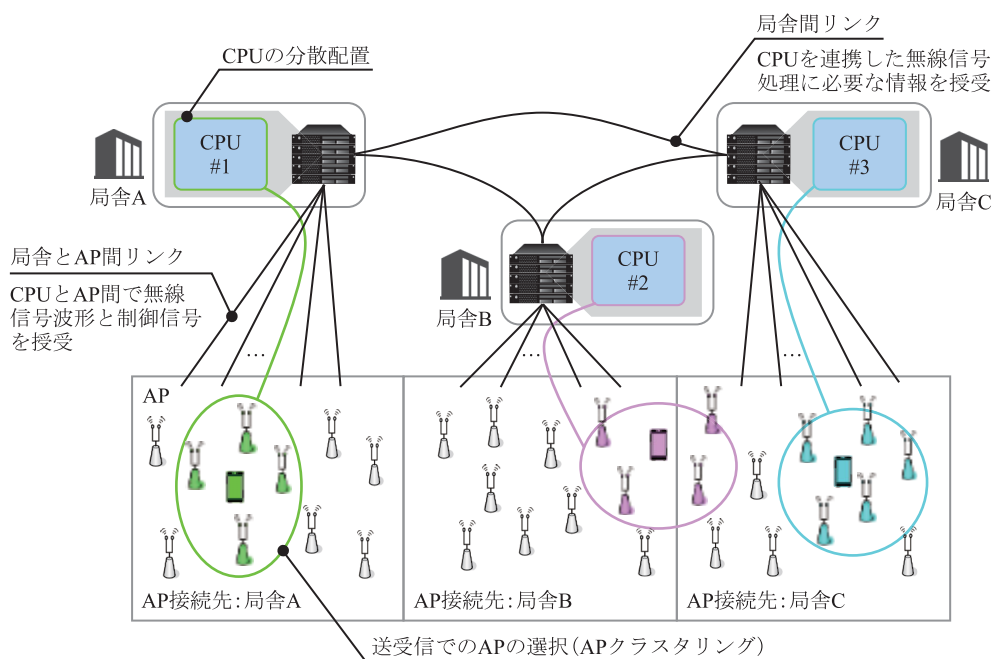


図4 スケーラブルなセルフフリー RAN の例

た、分散配置された CPU 間で無線信号波形を共有して処理を行い、かつ 2.2 で述べた AP クラスタリング方式を適用することにより、スケーラビリティを確保する RAN が検討されている⁽⁷⁾。

実際の RAN では、計算機リソースと伝送路容量は有限であることから、トラフィック需要や通信品質要求の変動に対応できる、RAN の柔軟性と拡張性が求められる。このために、仮想マシンまたはコンテナで仮想化された基地局機能を汎用サーバ上に立ち上げ、基地局機能の柔軟な配置や拡張を行う、仮想化 RAN 技術が検討されている。また、仮想化 RAN 技術の導入を前提に、ユーザの無線環境の状況などに応じて RAN の構成を柔軟に変更することで、必要とされる通信品質の確保を可能とする、ユーザセントリック RAN が検討されている⁽⁸⁾。

今後は、前述したようなセルフフリー向けの RAN アーキテクチャを基に、RAN の大規模環境への展開を想定したスケーラブルな管理及び制御の手法や、コアネットワークとの連携によって通信品質をエンドツーエンドで確保する手法等の検討が進むと考えられる。

4. 実用化に向けた動き

4.1 標準化動向

モバイル通信システムの標準化団体である 3GPP における LTE (Long Term Evolution) 及び 5G NR (New Radio) の標準規格では、異なるサイトに配置された分散アンテナが協調動作する CoMP の伝送方式として、

Joint Transmission (JT) や Joint Reception (JR) が既に標準化されている。原理的には膨大な数の AP をエリア内に分散配置して各アンテナ間の同期を確保し、JT によるマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 伝送を行うことでセルフフリーを動作させることが可能である。しかし、現規格では実現できる性能に限界があると考えられる。一例として、空間多重するユーザの数の上限になる復調参照信号 (DMRS) の最大ポート数による制約が挙げられる。5G NR で空間的に多重できるユーザ数は最大 12 であり、現在これを 24 まで増加させる方法が議論されている。一方、広域に多数のアンテナを分散して配置する場合は、より多くのユーザを空間多重できる可能性があり、これに適したポート数の拡大や、参照信号の柔軟な利用が期待される。また、チャンネル状態情報 (CSI: Channel State Information) の測定や UE からのレポート、UE の移動に合わせた連携アンテナの切替を効率的に行うメカニズム等が標準化されることが期待される。

O-RAN Alliance では、RAN のオープン化、仮想化、インテリジェント化のために、相互接続が可能なインタフェースの国際標準仕様の策定が行われている。現在検討されている仕様は、5G 及びその高度化である 5G-Advanced 向けが中心である。一方、セルフフリーのような Beyond 5G / 6G での導入を想定した技術は、Next Generation Research Group (nGRG) で検討されている。nGRG は、2022 年 6 月に設立されたりサーチャタスクフォースである。検討は、Research Stream (RS) と呼ばれる単位で行われており、例えば、RS01 では Beyond 5G / 6G のユースケース、RS02 ではアーキテク

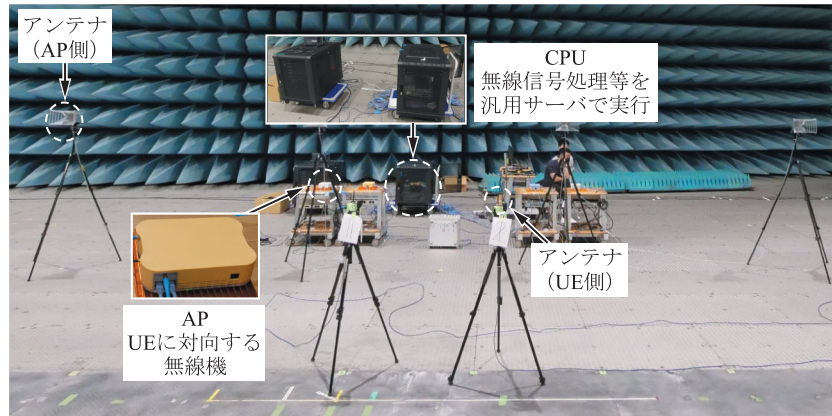


図5 セルフリー実証実験系の例⁽¹²⁾ 2台のCPUに4台のAPが接続され、2台のUEとの無線通信における無線品質やユーザスループットが測定できる。

チャ、RS03ではAI/MLのRANへの適用が検討されている。最終的には、各RSでの検討結果に基づき、次世代のO-RANの発展の方向性を勧告するWhite Paperがまとめられる予定である。セルフリーを展開するRANについては、RS01において、3.で挙げたユーザーセントリックRANが、一様な通信品質を必要とするユースケースとともに検討されている⁽⁹⁾。今後は、アーキテクチャ等を含めた具体的な検討が進むと想定される。

4.2 技術実証に関する動向

これまでのセルフリーの研究は、理論検討及び計算機シミュレーションによる評価が中心であったが、近年はテストベッドを構築しての実証も報告されている。例えば、単一のCPUに16台のAPが接続され、16台のUEとの無線信号処理をクラウド基盤で行うテストベッドを構築し、屋内無線伝送実験でスループットを測定した結果が報告されている⁽¹⁰⁾。また、スケーラブルなセルフリーに関連した技術の実証例として、8台のAPと4台のUEを想定したCSI測定システムを構築し、APクラスタリングを含むユーザ間干渉抑圧方式について、実測データを用いて評価した結果が報告されている⁽¹¹⁾。また、図5に示す汎用サーバで構築された2台のCPU、及び4台のAPと2台のUEシミュレータ装置を用いた実証基盤を構築し、CPU間の連携によるユーザ間干渉抑圧方式を、屋内無線伝送実験で評価した結果が報告されている⁽¹²⁾。このような実証により、実環境においてセルフリーによって均質な無線通信品質が確保され得ること、及びセルフリーの無線信号処理をRANで行うことの実現性が示されつつある。今後は、実用化に向けて、より広いエリアを対象とした無線品質の均一化の検証、標準化を見据えた実装を含むシステム化技術の検証、及びアプリケーションを含めたユースケース実証が進むと考えられる。

5. ま と め

本稿では、セルフリーの要素技術の概要と、展開に向けた課題や取組みについて解説した。セルフリーは均質な無線品質を面的に提供可能な技術として期待されており、その実現に向けて様々な要素技術の研究が進められている。今後は更に、システム化に向けたRANの研究、及び実用化に向けた実証実験、3GPPやO-RAN等での標準化を含めた取組みが進むことが期待される。

謝辞 本稿の内容に関わる知見の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（採択番号00401）により得られたものである。

文 献

- (1) Hexa-X.
<https://hexa-x.eu/>
- (2) Next-G-Alliance.
<https://nextgalliance.org/>
- (3) Beyond 5G Promotion Consortium.
<https://b5g.jp/en/>
- (4) H.Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E.G. Larsson, and T.L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, March 2017.
- (5) D. Novak, R.B. Waterhouse, A. Nirmalathas, C. Lim, P.A. Gamage, T.R. Clark, M.L. Dennis, and J.A. Nanzer, "Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 52, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2016.
- (6) KDDI Research Inc., "World first successful demonstration of wireless network deployment methodology for Beyond 5G," Oct. 2021. (Press Release)
<https://www.kddi-research.jp/english/newsrelease/2021/100701.html>
- (7) V. Ranjbar, A. Girycki, M.A. Rahman, S. Pollin, M. Moonen, and E. Vinogradov, "Cell-free mMIMO support in the O-RAN architecture : a PHY layer perspective for 5G and beyond networks," *IEEE Comm. Stand. Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 28-34, March 2022.
- (8) T. Murakami, N. Aihara, A. Ikami, Y. Tsukamoto, and H. Shinbo, "Analysis of CPU placement of cell-free massive MIMO for user-centric RAN," 2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, pp. 1-7, Budapest, Hungary, April 2022.
- (9) O-RAN Alliance, RS01-2023-RI03 Research Item Description, "User-centric RAN for homogenized radio quality," Jan. 2023.
- (10) D. Wang, C. Zhang, Y. Du, J. Zhao, M. Jiang, and X. You,

"Implementation of a cloud-based cell-free distributed massive MIMO system," IEEE Commun. Mag., vol. 58, no. 8, pp. 61-67, Aug. 2020.

- (11) A.P. Guevara, C.-M. Chen, A. Chiumento, and S. Pollin, "Partial interference suppression in massive MIMO systems: taxonomy and experimental analysis," IEEE Access, vol. 9, pp. 128925-128937, 2021.
- (12) A. Ikami, Y. Tsukamoto, N. Aihara, T. Murakami, and H. Shinbo, "Interference suppression for distributed CPU deployments in cell-free massive MIMO," 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), pp. 1-6, London, United Kingdom, Sept. 2022.

(2023年4月14日受付 2023年5月15日最終受付)



かん の いっせい
菅野 一生 (正員)

2008 東工大大学院理工学研究科博士課程了。同年 KDDI 株式会社入社。以来、無線通信方式、アンテナ、電波伝搬の研究開発に従事。2012 から 2014 の間、国際電気通信基礎技術研究所出向。現在、KDDI 総合研究所にて 6G に向けた通信方式の研究開発に従事。現在 KDDI 総合研究所無線通信方式グループリーダー。博士(工学)。2010 IEEE WCNC Best Paper Award 受賞, 2011 年度本会学術奨励賞, 2012 年度, 2020 年度本会通信ソサイエティ活動功労賞各受賞。



むらかみ たかひで
村上 隆秀 (正員)

2007 東北大学院工学研究科博士後期課程了。同年から KDDI 株式会社, (株)KDDI 研究所 (現 KDDI 総合研究所)。光アクセスネットワーク及び無線アクセスネットワーク (RAN) の研究開発, LTE, 5G 基地局及びアンテナの開発に従事。博士 (工学)。



しんぼ ひろき
新保 宏之 (正員: シニア会員)

1997 電通大・電気通信・電子情報卒。1999 同大学院情報システム学研究科博士前期課程了。同年 KDD (現 KDDI) 株式会社入社。以来, TCP/IP, ネットワーク運用, Beyond5G/6G, 月面の通信実現の研究に従事。現在, KDDI 総合研究所電波応用グループシニアエキスパート。2003 年度本会学術奨励賞, 2015 情報処理学会山下記念研究賞各受賞。



あまの よしあき
天野 良晃 (正員)

1999 名大大学院工学研究科修士課程了。同年 KDD (現 KDDI) 株式会社入社。以来, スマートアンテナ, SDMA 方式, 電波伝搬, 携帯端末無線性能評価手法, 及び次世代移動通信システムの研究開発に従事。現在 KDDI 総合研究所電波応用グループリーダー。第 22 回電波産業会電波功績賞, 2005 本会学術奨励賞各受賞。

