

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2016

課題番号：24686048

研究課題名(和文) 基地局連携セルラネットワークの実現に向けた要素技術の研究試作と標準化

研究課題名(英文) Technology development, hardware prototyping, and standardisation for basestation cooperated cellular networks

研究代表者

阪口 啓 (Sakaguchi, Kei)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：80323799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究開発では、第5世代セルラシステムの中核を成す基地局連携ヘテロジニアスネットワークの基本アーキテクチャを考案し、システムの運用に必要となるユーザアソシエーション・ダイナミックON/OFF制御・ダイナミッククラスタリングなどの各種無線リソース制御アルゴリズムを構築するとともに、システムレベルシミュレーションを行うことで第4世代セルラシステムに比べて1000倍以上のシステム容量が実現できることを証明した。また基地局連携C-RANデモンストラータを構築することでその実現性を実証するとともに、そのインターフェースや制御方式を国際標準化機関である3GPP に提案し標準規格への貢献を行った。

研究成果の概要(英文)：This project has proposed a system architecture for basestation cooperated heterogeneous networks as a baseline for 5G cellular systems. This project has developed several Radio Resource Management (RRM) algorithm needed to operate the basestation cooperated heterogeneous networks efficiently such as user association, dynamic ON/OFF control, and dynamic clustering. Performance improvement has been proven via system level simulations to achieve 1000 times better system rate than the conventional 4G cellular networks. This project has also developed prototype hardware of basestation cooperated C-RAN with new interface between LTE and small-cell basestation and control / data-plane splitting. Finally, this project has contributed to 3GPP standardization about the proposed interface and control protocols.

研究分野：無線通信工学

キーワード：ヘテロジニアスセルラネットワーク 基地局連携 C-RAN ユーザアソシエーション ダイナミックON/OFF制御 ダイナミッククラスタリング ハードウェア試作 国際標準化

1. 研究開始当初の背景

本研究が開始されたのは2012年4月であり、第4世代セルラネットワーク(4G)の導入によってスマートフォンやタブレット端末が本格的に普及し、モバイルトラフィックの指数関数的な増加が社会的な課題となっていた。一方、4Gではセルラシステムで初めて MIMO 通信方式が導入され、それまでの3Gに比べてピークデータレートが大きく改善されたものの、すべての基地局で同一の周波数を用いる1セル繰返しを採用していたため、セルエッジにおけるアウトageレートの劣化が引続き課題として残っていた。本研究の主要テーマである基地局連携技術は、当初はこのアウトageレートを改善する方式として概念の創出が進められてきたが、その後マクロセルの中に複数の小セル基地局を配置するヘテロジニアスネットワークへの適用が主流になった。特に小セル基地局にミリ波帯を用いることで、セルラシステム全体の容量を飛躍的に増加可能であることが本研究の成果も含めて明らかとなったため、ヘテロジニアスネットワークを前提とした基地局連携技術の研究開発が急務となった。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究では特にミリ波帯を小セル基地局に用いる基地局連携ヘテロジニアスネットワークのシステムアーキテクチャを提案し、その効率的な運用に必要なユーザアソシエーション技術・無線リソース制御技術・ダイナミックセル構成技術を確立し、またその有効性をプロトタイプハードウェアにより実証することを目的としている。またプロトタイプハードウェアに実装予定の新たなインターフェースおよび制御プロトコルを、外部機関と連携して国際標準化することも目指している。

3. 研究の方法

本研究では、基地局連携ヘテロジニアスセルラネットワークの実現に向けて以下の8つの研究課題に取り組む。なお当初の研究計画で設定した課題からとの対応関係も以下に示している。

課題1(旧) システムアーキテクチャ

課題1では、全体のシステムアーキテクチャの創出に取り組む。1つのマクロセルの中に複数の小セル基地局を設置するヘテロジニアスネットワークを前提として、バックホールネットワークおよび連携制御のアーキテクチャ、ユーザのモビリティ管理法を設計する。

課題2(旧) ユーザアソシエーション

課題2では、課題1のシステムアーキテクチャを前提として、最適なユーザアソシエーション(セル選択)アルゴリズムを構築する。ここではシステム全体の容量を目的関数として、ユーザの接続基地局をマクロ基地局と小セル基地局の中から選択する。これは従来のマクロ基地局間の基地局連携技術(Dynamic Point

Selection)をヘテロジニアスネットワークに応用した技術と言える。

課題3 基本性能評価

課題3では、課題1のシステムアーキテクチャと課題2のユーザアソシエーションアルゴリズムの基本性能評価を行う。そのために2GHz帯のマクロ基地局と60GHz帯の小セル基地局を用いたヘテロジニアスネットワークのシステムレベルシミュレータを構築し、システム容量の評価を行う。

課題4(旧) 無線リソース制御

課題4では、課題1のヘテロジニアスネットワークを効率的に運用するために、小セル基地局のON/OFF制御により消費電力を削減する無線リソース制御アルゴリズムを構築する。

課題5(旧) ダイナミックセル制御

課題5では、小セル基地局間に存在するユーザに対して周辺の小セル基地局が連携したビームフォーミングを行うことでユーザ指向のセルを形成するダイナミックセル制御アルゴリズムを構築する。これは従来の基地局連携マルチユーザ MIMO 技術をヘテロジニアスネットワークに応用した技術と言える。

課題6(旧) 小セル基地局の試作

課題6では、従来の4Gマクロ基地局を拡張する形態で、マクロ基地局と小セル基地局が連携するヘテロジニアスネットワークの試作機を構築する。

課題7(旧) 実証実験

課題7では、課題6で構築するヘテロジニアスネットワークの試作機を用いて簡単な環境において実証実験を行い、課題1で提案するシステムアーキテクチャの実用性と有効性を検証する。

課題8(旧) 国際標準化

課題8では、課題2から課題7までの研究成果を踏まえて、従来のセルラネットワークに新たに必要となるインターフェースや制御プロトコルを明らかにし、それらを外部機関と連携して国際標準化機関(3GPP)へ提案する。

4. 研究成果

課題1 システムアーキテクチャ

図1に本研究で提案した基地局連携ヘテロジニアスセルラネットワークの全体アーキテクチャを示す[3]。ここでは従来のマクロセルにミリ波帯を用いた小セル基地局を複数導入することでシステムレート的大幅な改善を目指している。またミリ波帯の大きな伝搬損失に起因する小セル基地局の限られたエリアカバレッジの問題を解決するため

に、ユーザ端末の制御プレーンを常に LTE 基地局が管理するデータ/制御分離通信方式を導入する。図中では青色が制御プレーン、赤色がデータプレーンを示しており、ユーザ端末の位置に関わらず常に制御プレーンをマクロ基地局が管理することにより接続性を担保しつつ、端末が小セル基地局のエリアに入ると即座にミリ波広帯域通信にデータプレーンを切替えることが可能となっている。またマクロ基地局と小セル基地局間には大容量かつセキュアな新たなフロントホールを導入する。これらのヘテロジニアスネットワークをクラウド上に設置された頭脳 (C-RAN) が制御することにより、システムレートを最大化するユーザアソシエーション (ユーザの接続基地局の選択) や、消費電力を最小化する小セル基地局の ON/OFF 制御を行う。これはマクロ基地局と小セル基地局が協調する広義な基地局連携技術と言える。

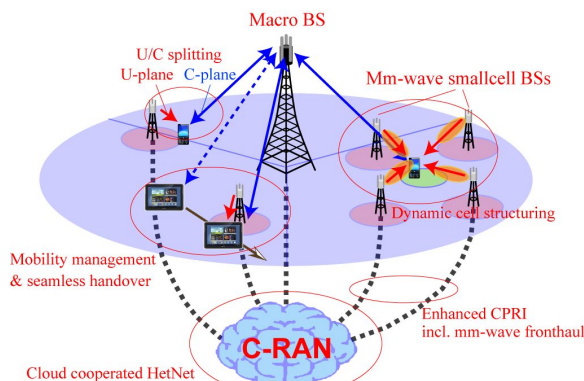


図 1 基地局連携ヘテロジニアスセルラネットワーク

課題 2 ユーザアソシエーション

課題 2 では、課題 1 のシステムアーキテクチャを前提として、最適なユーザアソシエーション (セル選択) アルゴリズムを構築した [3]。ここでは式 (1) に示すシステムレートを最大化する様に各ユーザの接続先をマクロ基地局と小セル基地局の中から選択する。

$$R = \sum_{u \in M} \min \left(\frac{W_M C_{u,M}^c}{|M|}, L_u \right) + \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{u \in S_s} \min \left(\frac{W_s C_{u,s}^c}{|S_s|}, L_u \right) \quad (1)$$

図 2 に最適化後のユーザの接続先の例を示す。横軸は各ユーザが要求するトラフィックの量を示しており、縦軸はその累積確率分布を示している。また青色はマクロ基地局に接続されたトラフィック (ユーザ) を表しており、赤色は小セル基地局に接続されたトラフィック (ユーザ) を表している。これからユーザアソシエーションを最適化することにより、大容量トラフィックは主として小セル基地局に、小容量トラフィックは主としてマクロ基地局に接続されることが分かった。

課題 3 基本性能解析

課題 3 では、課題 1 のシステムアーキテクチャと課題 2 のユーザアソシエーションアルゴリ

ズムの基本性能評価を行った [3]。そのために表 1 の諸元を持つシステムレベルシミュレータを構築した。マクロ基地局には 2GHz の周波数を用いる 4G (LTE) 基地局を想定し、一方小セル基地局には 3.5GHz 帯を用いる場合と 60GHz 帯を用いる場合の 2 通りのシミュレータを構築した。

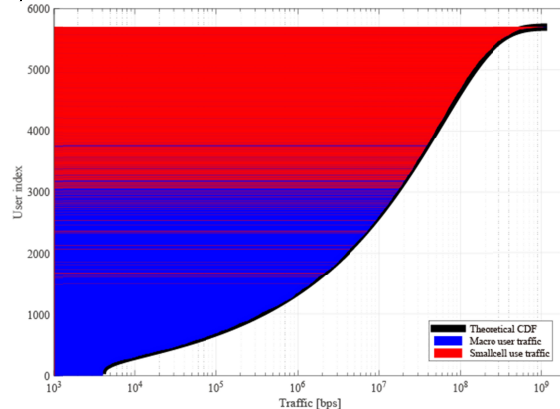


図 2 ユーザアソシエーションの最適化

表 1 シミュレーション諸元

Macro BS	Center freq. / BW	2GHz / 10MHz
	Tx power	46dBm
	Antenna gain	17dBi (3GPP model)
	ISD	500m
3.5GHz small-cell BS	Center freq. / BW	3.5GHz / 100MHz
	Tx power	30dBm
	Antenna gain	5dBi (omni in azimuth)
60GHz small-cell BS	Center freq. / BW	60GHz / 2.16GHz
	Tx power	10dBm
	Antenna gain	25dBi (WiGig model)
AMC	LTE (2, 3.5GHz), WiGig (60GHz)	Up to 8bps/Hz x BW
Traffic	Present, 5 year later, 10 year later	64kbps, 2.6Mbps, 64Mbps
	Propagation	Path loss exponent
Interference		Fluid model

図 3 にシステムレートの解析結果を示す。図の横軸は 1 つのマクロセルに導入される小セル基地局の数を表しており、一方縦軸は、マクロ基地局のみのシステム容量に対するヘテロジニアスネットワークのシステム容量の改善度を示している。図より発生するトラフィック量が増加するに連れヘテロジニアスネットワークの効果が大きくなり、60GHz 帯の小セル基地局をマクロセル当りに 30 台導入することにより 1000 倍のシステム容量の改善を達成できることを明らかとした。またこの改善量は 3.5GHz 帯よりも 60GHz 帯の方が遥かに大きいことも確認できる。現在進められている 5G の標準化では、このシステムアーキテクチャを基本構成として、各種技術およびインターフェースの規格化が行われている。

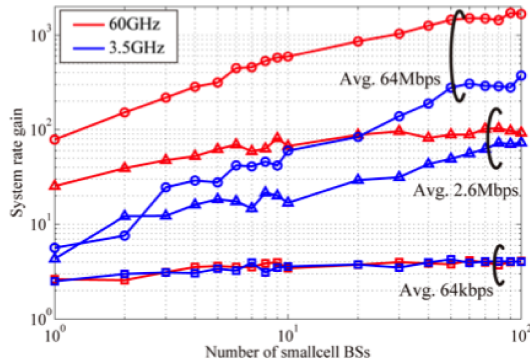


図3 システムレートの解析結果

課題4 無線リソース制御

課題4では、課題1のヘテロジニアスネットワークを効率的に運用するために、小セル基地局の ON/OFF 制御により消費電力を削減する無線リソース制御アルゴリズムを構築した[7]。図4は小セル基地局の ON/OFF 制御の例を示している。図左は午前3時のトラフィックの発生量と小セル基地局の ON/OFF 状態を、図右は午後3時の状態を示している。ヘテロジニアスネットワークでは、ミリ波小セルのカバレッジはマクロセルのカバレッジに比べて遥かに小さいため、ミリ波小セルの中に常にトラフィックを発生させるユーザが存在するとは限らない。そこで本課題では、ヘテロジニアスネットワーク全体の不要な消費電力を最小化するために、各位置で発生するユーザトラフィックの量に応じて小セル基地局の ON/OFF 状態と各ユーザの接続先を動的に制御する無線リソース制御アルゴリズムを構築した。

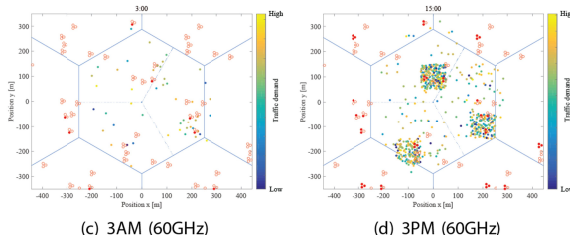


図4 小セル基地局 ON/OFF 制御の例

図5に構築したアルゴリズムによるネットワーク全体の電力効率の解析結果を示している。図中の横軸は1日の時間帯を示しており、夜中から明け方に掛けては発生するトラフィックが小さく、一方昼から夜にかけて大きなトラフィックが発生している。図の縦軸は単位電力で伝送可能なデータレート [bps/W] を示している。図より特に日中の電力効率は60GHzのミリ波帯の方が3.5GHzのマイクロ波帯よりも高いことが分かる。これはミリ波帯の大きな帯域幅と小さい干渉電力の相乗効果であることが分かった。一方トラフィック発生量の低い夜間は、3.5GHz帯の様な帯域幅はそれほど大きくなくてもカバレッジエリアの大きい小セルの方が電力効率の意味で有利になることも判明した。

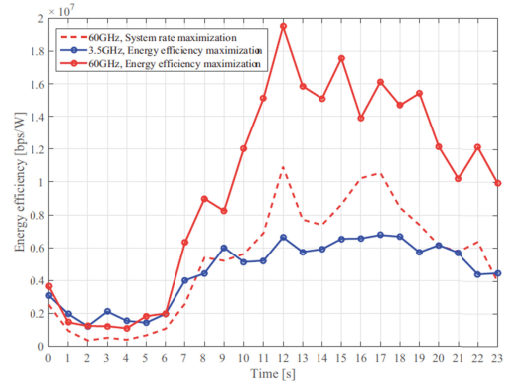


図5 電力効率の解析結果

課題5 ダイナミックセル制御

課題5では、小セル基地局間に存在するユーザに対して周辺の小セル基地局が連携したビームフォーミングを行うことでユーザ指向のセルを形成するダイナミックセル制御アルゴリズムを構築した[2]。図6にダイナミックセル制御の例を示す。ここではあるマクロセル内に37台の小セル基地局が均等に設置されており、その中に2つの移動するホットスポットが存在している。各ホットスポット(ユーザの集団)の存在範囲は必ずしも小セル基地局のエリアに含まれる訳ではなく、複数の小セルの間に位置したり、複数の小セルに跨ったりしている。またホットスポットで発生するトラフィック量は非常に大きく、単一の小セル基地局で収容できるとは限らない。そこで本課題では、ホットスポット周辺のミリ波小セル基地局のビームをホットスポットで向け、かつ複数の小セル基地局間で連携してマルチユーザ MIMO 通信を行うダイナミックセル制御アルゴリズムを構築した。図6ではホットスポットの位置に対して構築された動的なセル構成が示されている。ここではホットスポット周辺の小セル基地局の指向性がホットスポットに指向され、それらの基地局が連携して MIMO 通信を行うことによりホットスポットのトラフィックを収容していることが分かる。このダイナミックセル制御は、従来のマクロ基地局間の基地局連携技術を、ヘテロジニアスネットワークにおける小セル基地局間のダイナミックな連携に適用したものと言える。

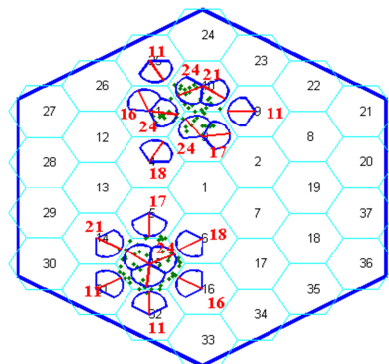


図6 ダイナミックセル制御の例

課題6 小セル基地局の試作

課題 6 では、従来の 4G (LTE) マクロ基地局を拡張する形態で、マクロ基地局と小セル基地局が連携するヘテロジニアスネットワークの試作機を行った[6]。図 6 に試作したヘテロジニアスネットワークの構成図を示す。小セル基地局には 60GHz 帯の WiGig を選定した。LTE 基地局とユーザ端末間の制御プレーンは常に LTE を介して接続されているのに対して、データプレーンは OVS (Open vSwitch) を介して LTE または WiGig を適応的に選択することが可能となっている。WiGig が選択された場合は、LTE 基地局のデータを GRE (General Routing Encapsulation) プロトコルを用いたフロントホール回線により WiGig アクセスポイント (AP) に転送し、WiGig アクセスにより超高速にデータがユーザ端末に伝送される。図 7 は試作ハードウェアの写真を示している。左下の黒いボックスが LTE 基地局のベースバンド部 (BBU)、壁に設置されている銀色のボックスが LTE 基地局の無線部 (RRH)、右下の黒い円筒状の物体が WiGig AP である。

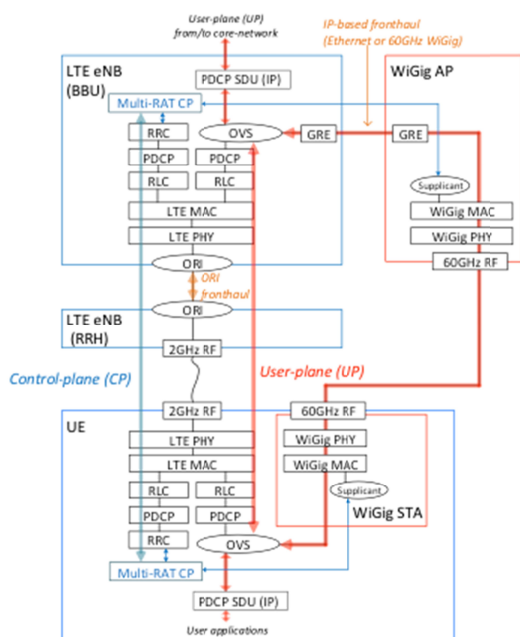


図 6 試作したヘテロジニアスネットワークネットワークの構成図



図 7 試作ハードウェアの写真

課題 7 実証実験

課題 7 では、課題 6 で構築したヘテロジニア

スネットワークの試作機を用い、簡単な環境において実証実験を行い、課題 1 で提案したシステムアーキテクチャの実用性と有効性を検証した[6]。図 8 に実証実験の写真を示す。ここでは 4G (LTE) と WiGig のアグリゲーション機能を有したユーザ端末をポジション上に設置し、WiGig エリアの外と内を移動させることで LTE と WiGig のデータ/制御分離通信を含む基地局連携の有効性を確認する。図 9 に実証実験の結果を示す。ユーザ端末が LTE に接続されている状態から、端末を WiGig エリアに移動させると、端末が WiGig の制御信号を検知し、LTE の制御プレーンを介して LTE 基地局内のデータを WiGig AP に転送することで瞬時に高速通信への切替えが実現している。

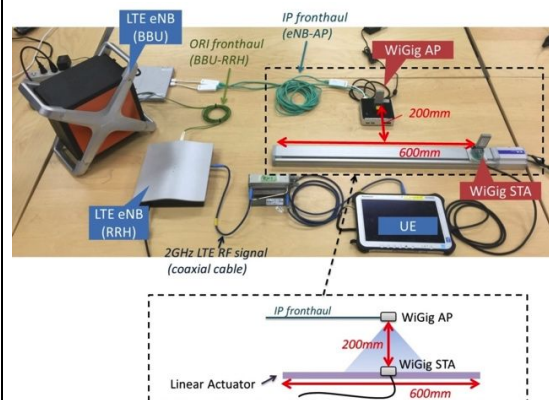


図 8 実証実験の写真

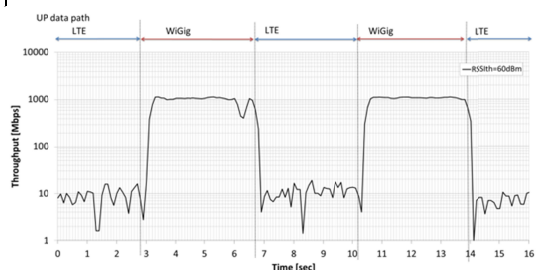


図 9 実証実験の結果

課題 8 国際標準化

課題 8 では、課題 2 から課題 7 までの研究成果を踏まえて、従来のセルラネットワークに新たに必要となるインターフェースや制御プロトコルを明らかにし、それを外部機関と連携して国際標準化機関 (3GPP) へ提案した。その結果、データ/制御分離通信プロトコルは[A]の標準仕様に、マクロ基地局と小セル基地局のインターフェースは[B]の標準仕様に、それぞれ貢献した。

[A] 3GPP TS36.331, “ Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification, ” V12.4.1, Dec. 2014.

[B] 3GPP TS36.360, “ Evolved

Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE-WLAN Aggregation Adaptation Protocol (LWAAP) specification,” V13.0.0, Arp. 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(下記を含めて計 33 件)

- [1] H. Shimodaira, G.K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, S. Kaneko, N. Miyazaki, S. Konishi, and Y. Kishi, “Optimization of picocell locations and its parameters in heterogeneous networks with hotspots,” IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.6, pp.1338-1347, June 2013. (査読有)
- [2] R.E. Rezagah, G.K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, and S. Konishi, “Large scale cooperation in cellular networks with non-uniform user distribution,” IEICE Trans. Commun., vol.E97-B, no.11, pp.2512-2523, Nov. 2014. (査読有)
- [3] K. Sakaguchi, G.K. Tran, H. Shimodaira, S. Nanba, T. Sakurai, K. Takinami, I. Siaud, E.C. Strinati, A. Capone, I. Karls, R. Arefi, and T. Haustein, “Millimeter-wave evolution for 5G cellular networks,” IEICE Trans. Commun, vol. E98-B, no. 3, pp.388-402, Mar. 2015. (査読有)
- [4] K. Sakaguchi, E.M. Mohamed, H. Kusano, M. Mizukami, S. Miyamoto, R.E. Rezagah, K. Takinami, K. Takahashi, N. Shirakata, H. Peng, T. Yamamoto, and S. Nanba, “Millimeter-Wave Wireless LAN and Its Extension toward 5G Heterogeneous Networks,” IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 10, pp. 1932-1948, Oct. 2015. (査読有)
- [5] H. Shimodaira, G.K. Tran, K. Sakaguchi, K. Araki, S. Nanba, and S. Konishi, “Diamond Cellular Network – Optimal Combination of Small Power Basestations and CoMP Cellular Networks –,” IEICE Trans. Commun, vol. E99-B, no. 4, pp. 917-927, April 2016. (査読有)
- [6] S. Okasaka, R.J. Weiler, W. Keusgen, A. Pudseyev, A. Maltsev, and K. Sakaguchi, “Proof-of-Concept of a Millimeter-Wave Integrated Heterogeneous Network for 5G Cellular,” Sensors, vol.16, no.9, Aug. 2016. (査読有)
- [7] G.K. Tran, H. Shimodaira, R.E. Rezagah, K. Sakaguchi, K. Araki, “Practical evaluation of on-demand smallcell ON/OFF based on traffic model for 5G cellular networks,” in Proc. IEEE WCNC 2016, Doha, Qatar, Apr. 2016. (査読有)

〔学会発表〕(下記を含めて計 18 件)

- [1] 阪口啓, “クラウド連携ヘテロジニアスネットワークが導くスマートな無線の世界 (Smart Radio World driven by Cloud Cooperated Heterogeneous Networks),” 信学技報, 東京都新宿区, SR2013-110, 2014年3月.
- [2] 阪口啓, “5Gのためのミリ波ヘテロジニアスネットワークの研究開発 (Research & Development of Millimeter-wave Heterogeneous Networks for 5G),” 信学技報, AP2014-150, RCS2014-219, 山形県米沢市, 2014年11月.
- [3] 阪口啓, タンザカン, 荒木純道, 安藤真, 広川二郎, 府川和彦, 張裕淵, 高田潤一, 齋藤健太郎, 松澤昭, 岡田健一, 宮原正也, “5Gに対する東京工業大学の取組み –ミリ波ヘテロジニアスネットワークを実現するために–,” 信学技報, RCS2015-172, 神奈川県横須賀市, 2015年10月.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 通信制御装置, 制御方法, 及びプログラム

発明者: 林貴弘, 難忍, 小西聡, 阪口啓, タンザカン, 下平英和,

権利者: KDDI 総合研究所, 東京工業大学

種類: 特許出願

番号: 2014-107462

出願年月日: 2014年5月23日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪口啓 (SAKAGUCHI, Kei)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号: 80323799

(4) 研究協力者

外山隆行 (SOTOYAMA, Takayuki)

(株) パナソニック

小西聡 (KONISHI, Satoshi)

(株) KDDI 総合研究所

Thomas Haustein (HAUSTEIN, Thomas)

Fraunhofer Heinrich Hertz Institute