

5G が加速する次世代近接無線アプリケーション

5G Accelerates the High Rate Close Proximity Wireless Application

近藤啓太郎



5G 時代の到来により、従来の基幹網では処理することが困難であった大容量コンテンツを様々な拠点へ自由に配信することが可能になる。それにより、高品質な映像・音声などのデータが、ユーザの正にすぐそこにまで届けられているという社会が実現する。これらのデータを、最終的にユーザの端末に伝達するための有望な技術として、ミリ波を用いた高速近接無線技術の規格化や研究・開発が進められている。今回、2017 年に規格化が完了したミリ波高速近接無線、IEEE 802.15.3e の概要とその応用例、次世代 TransferJet, TransferJet X の実現に向けた取組みについて紹介する。

キーワード：ミリ波無線技術, P2P, IEEE 802.15.3e, TransferJet X

1. 背景

近年、ユーザがモバイル端末を通じて 4K 映像やハイレゾ音源といった、高品質なコンテンツを楽しむ機会が増加している。5G 時代の到来によりネットワークを支える基幹網が強化され、様々な拠点へ大容量のデータを届けるインフラストラクチャが実現されることで、このような高品質・大容量のデータを、ネットワークを通じてユーザの持つモバイル端末へ配信するようなサービスがますます普及していくことが想定される。

このようなサービスにおいて、最終的にユーザの持つモバイル端末へデータを配信する際に、広域なモバイルネットワークを直接利用することも考えられるが、現在広く普及している無線 LAN によるデータオフローディング^(用語)のように、無線 LAN 若しくは無線 Personal Area Network (PAN) 等の局地的な無線通信方式を相補的に用いることによって、よりユーザのニーズ、場所的な制約、実現したいサービス形態に合わせた展開が可能となる。コンテンツサイズの指数的な増加に合わせ、モバイル端末がサポートする無線通信方式においても、スループットの向上や、サービスに合わせたプロトコル

の改良に対する要求が高まっている。

これまでも、端末がサポートするモバイルネットワークや無線 LAN 等の無線通信方式においては、帯域の拡大、高い変調方式、高効率な誤り訂正方式及び MIMO などの導入によりそのスループットの増加が図られてきている。

例えば、表 1 は 2.4/5 GHz 帯の電波を用いる無線 LAN の規格におけるそれぞれの規格の帯域や変調方式等を比較したものである。最新の 802.11ac においては、帯域は当初の 8 倍となる 160 MHz に増大し、変調方式においてもシンボル当り 8 bit の伝送を行う 256 QAM など高度な変調方式が採用されるに至っている。

2.4/5 GHz の無線 LAN は、現在もスループットの増大に向けて様々な技術が検討されているが、更なる帯域の増大や変調方式の高効率化といった手法を導入することは、電波資源若しくは技術的な観点から困難になってきている。今後は、現在規格化が進められている、802.11ax で検討されているような、高密度環境での安定動作を目指した変調方式の見直しや、伝送プロトコルの効率化などが主な課題になると想定される。

このような、2.4/5 GHz 帯の無線 LAN の状況を踏まえ、注目を集めているのが 60 GHz 帯のミリ波を用いた無線通信技術である。60 GHz 帯のミリ波は、日本・米国を含め世界の広い地域で約 9 GHz 以上の帯域が割り当てられており、チャネル当り約 2 GHz という、2.4/5 GHz 帯の無線 LAN と比較して 12~50 倍にも及ぶ広

近藤啓太郎 高速近接無線技術研究組合開発二部
E-mail Keitarou.kondou@hrpc.jp
Keitarou KONDOU, Nonmember (Development Dept. 2, HRCF Research & Development Partnership, Tokyo, 110-0016 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.11 pp.1095-1100 2018 年 11 月
©電子情報通信学会 2018

表1 802.11 無線 LAN における帯域及び変調方式

| 規格 | 周波数帯 (GHz) | チャネル帯域幅 (MHz) | 変調方式 | 最大物理層速度 (Mbit/s) | MIMO |
|----------|---------------|------------------|---------------------------------------|---------------------|----------|
| 802.11b | 2.4 | 22 | DQPSK+CCK | 11 | N/A |
| 802.11a | 5 | 20 | BPSK/QPSK 16QAM 64QAM | 54 | N/A |
| 802.11g | 2.4 | 20 | BPSK/QPSK 16QAM 64QAM | 54 | N/A |
| 802.11n | 2.4/5 | 20/40 | BPSK/QPSK 16QAM 64QAM | 600 | 4 stream |
| 802.11ac | 2.4/5 | 80/160 | BPSK/QPSK 16QAM 64QAM 256QAM | 6,900 | 8 stream |

帯域チャネルを利用した Gbit/s クラスの通信が可能となっている。

GHz 帯の高周波ミリ波 RF デバイスを実現するためには、従来は GaAs 等の化合物系の半導体技術が必要であったが、近年の CMOS プロセスにおいては、微細化による高周波特性の改善が進み、65 nm プロセスでこれら 9 GHz にわたる全てのチャネルを送受信するデバイスが実現されるなど⁽¹⁾、一般的な半導体プロセスによるミリ波 RF デバイスの実現により、その実用化が加速されている。例えば、60 GHz のミリ波を用いた無線通信規格として、無線 LAN においては IEEE 802.11ad⁽²⁾、無線映像伝送においては WirelessHD といった、その広帯域性を有効に活用した数 Gbit/s のスループットを持つ通信方式が規格化され、実際の商品に搭載されている。

本稿では、この 60 GHz のミリ波を用いた、新しい高速近接通信方式である IEEE 802.15.3e 規格^{(1),(3)}の概要と、IEEE 802.15.3e をベースにした次世代 TransferJet、TransferJet X の実現に向けた取組み、5G 時代における応用例などを紹介する。

2. IEEE 802.15.3e 規格の概要

IEEE 802.15.3e は、IEEE により策定された 60 GHz 帯のミリ波を用いた高速近接ポイントツーポイント (P2P) 無線通信の規格であり、IEEE 802.15 Working

Group (WG) において規格化が行われた。IEEE 802.15 WG は、IEEE 802 Committee の一部であり、主に近距離のモバイルデバイス間の通信を目指した、Wireless Personal Area Network (WPAN) の規格化を行っており、Bluetooth の規格化もこの WG で行われた。(いわゆる無線 LAN は 802.11 WG で規格化が進められている。)

図 1 は、IEEE における 802.15.3e の規格化の際に、想定されたユースケースを示す図である。従来の TransferJet 等でもユースケースとして挙げられていた、モバイル機器間での近距離高速ファイル転送や、屋外で専用の機器からユーザの望むデータを伝送するいわゆる Kiosk Download モデルと、今回新たに導入された改札などを通る瞬間にデータの送受を行う Ticket Gate モデルのそれぞれを示している。

図 2 は IEEE におけるモデルと、OSI 参照モデルのデータリンク層及び物理層の対応を示した図である。IEEE においては、OSI 参照モデルのデータリンク層を更に Logical Link Control (LLC) 副層と Media Access Control (MAC) 副層とに分割して規格化を行っている。802.15.3e では、この MAC 副層及び物理層の二つを規格化の対象とした。

IEEE 802.15.3e では、前述したユースケース、特に Ticket Gate タイプのユースケースを実現するために、MAC 副層においては、P2P 接続を前提とした高速無線接続を担保する新たなトポロジ及びチャネルアクセス方法が、物理層においては、60 GHz ミリ波帯を用いた PAN の規格である IEEE 802.15.3c をベースに、変調及び符号化方式 (MCS) の改良と、MIMO の導入による高速化が、それぞれ導入されている。

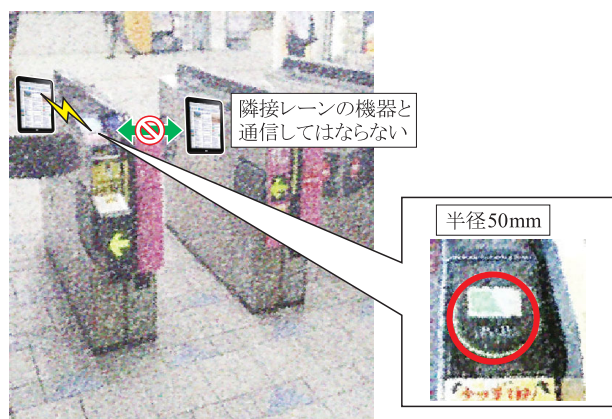
続く 2.1 では 802.15.3e の MAC 副層、2.2 では物理 (PHY) 層で新たに導入された技術について各々詳細を記す。

用語解説

データオフローディング モバイル端末における 3G/4G 等のモバイルネットワークを通じたデータ送受信を、Wi-Fi 等他の代替となる無線通信手段を用いて行うこと。モバイルデータオフローディングとも言われる。



(a) 従来の端末間のデータ転送



(b) Ticket Gate モデル

図1 IEEE 802.15.3e におけるユースケース⁽⁴⁾ 従来の端末間のデータ転送(a)に加え、Ticket Gate モデル(b)が追加された。

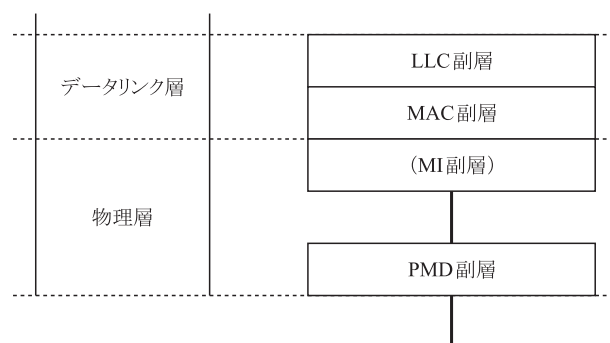


図2 Local and Metropolitan Area Network モデル IEEE 802 の規格化では、OSI 参照モデルのデータリンク層は LLC と MAC 副層に分割される。

2.1 Media Access Control (MAC) 副層

本節では 802.15.3e の MAC 層で新たに導入された、高速接続技術と、無線チャネルの高効率アクセス方式について主に紹介を行う。

まず高速接続技術については、IEEE 802.15.3e では、

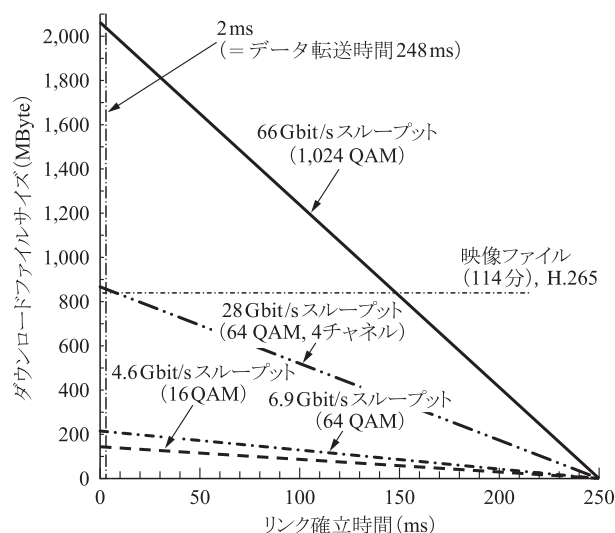


図3 リンク確立時間と最大転送ファイルサイズ 総転送時間 250 ms において、ダウンロード可能なファイルサイズを示す。総転送時間が短く制約された状態では、リンク確立時間の低減が重要。

ユーザが通信可能区域に入った状態から通信が開始されるまでの時間（リンク確立時間）について、2 ms 以下を実現するための技術開発が行われた。

図3に、総転送時間が 250 ms と制限された状況での、リンク確立時間と最大転送ファイルとの関係を表す⁽⁴⁾。時間的制約の厳しい Ticket Gate モデルにおいてミリ波の高速性を有効に活用するためには、リンク確立時間を低減することが重要となる。IEEE 802.15.3e の規格化においては、将来的に 28 Gbit/s の転送速度を実現した際に、容量 859 MByte の約 2 時間の映像ファイルをダウンロード可能とする、2 ms 以下を目標とした。

高速リンク接続を実現するために、802.15.3e においては、ネットワーク管理方式を、これまで無線 PAN において用いられていた単一のスーパフレームによる Piconet 方式から変更し、図4に示すようにリンク確立専用の Setup フェーズと、実際のデータ通信を行う Associated フェーズに分割した、P2P 伝送を前提とした Pairnet アーキテクチャを採用することで、高速なリンク確立を実現している。

図中に示すように、Pairnet においては、Pairnet Coordinator (PRC) と Pairnet Device (PRDEV) の 2 種類による通信を前提としていることは、WPAN と同様であるが、Setup フェーズにおいては、PRC が送信するビーコン間隔を短く制限することで、リンク確立時間を低減することができる。例えば、従来の 802.15.3 MAC においては、スーパフレーム時間は 1 ms 以上という規定があったが、15.3e においては、20 μ s まで短縮することができる。モバイル機器の待ち受け時には、一般的に間欠動作を行うことにより消費電力の低減を図

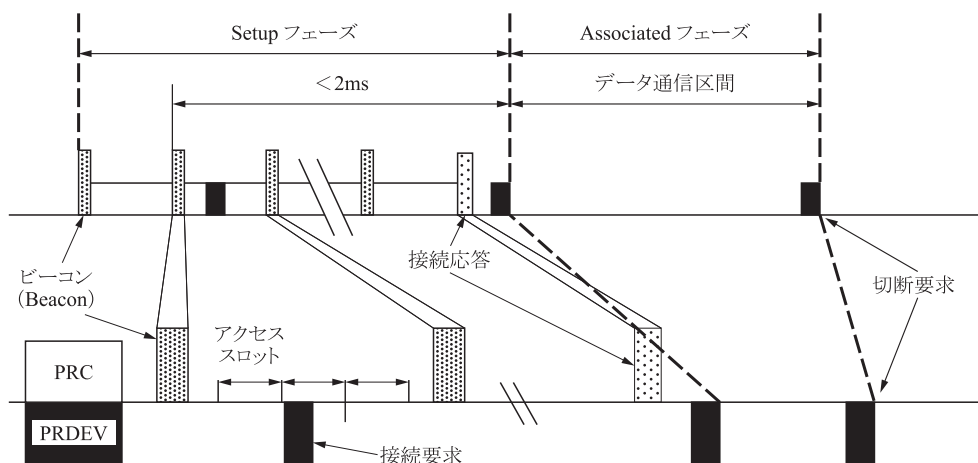


図4 802.15.3eにおけるスーパーフレーム 接続先を探索する Setup フェーズと、データ転送を行う Associated フェーズに分割。

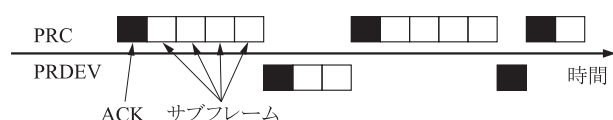


図5 Stack-ACKによるチャネルアクセス方式 PRCとPRDEVが必ず交互に送信。送信データがない場合はACKのみを送信。

ることが多い。例えば、稼働率1%でビーコンの受信を行う場合、初回ビーコン受信まで、最大でビーコン間隔の100倍の時間が掛かるが、ビーコン間隔を20 μ sまで短縮することで、2ms以内にビーコンの受信及びリンク確立が可能となる。Associatedフェーズにおいては、ビーコンを停止し、ペアとなったデバイス間でチャネルを占有し、データ通信を行う。

Associatedフェーズにおけるチャネルアクセス方式を図5に示す。

Stack-ACK方式においては、各デバイスは送信データを複数のサブフレームに、相手が送信したサブフレームの受信状況をACK領域にそれぞれ格納し、まとめて送信する。送信機会は均等に交互に割り当てられ、送信したいデータがない場合はACK情報のみを送信する。このようなチャネルアクセス方式により、アクセス効率の高い双方向通信が実現できている。

また、MAC副層においては、サブフレームは必ず番号順に送受信されることが担保されており、上位層でデータ順を並び替えるなどの追加処理が必要にならないという特長がある。更に、Stack-ACKの通信状況に基づき、短い時間間隔で効率的に省電力モードの遷移を可能とする、Low Latency Power Saving (LLPS) モードといった、モバイルデバイスに搭載する際に有用な機能も用意されている。

表2 802.15.3e チャネル割当一覧

| CHNL_ID | スタート周波数 (GHz) | 中心周波数 (GHz) | ストップ周波数 (GHz) |
|---------|---------------|-------------|---------------|
| 1 | 57.240 | 58.320 | 59.400 |
| 2 | 59.400 | 60.480 | 61.560 |
| 3 | 61.560 | 62.640 | 63.720 |
| 4 | 63.720 | 64.800 | 65.880 |
| 5 | 65.880 | 66.960 | 68.040 |
| 6 | 68.040 | 69.120 | 70.200 |

2.2 物理層

802.15.3eの物理層の特長としては、冒頭で紹介したように、60GHz帯のミリ波を搬送波とし、2.16GHz以上の広帯域な通信チャネルを用いた高速通信モードを持つことが挙げられる。表2は、2.16GHz帯域チャネルの一覧を示す。これらのチャネルのほかに、2.16GHz帯域のチャネルを二つまたは四つを組み合わせ、4.32GHz及び8.64GHz帯域のチャネルと合わせて16種類のチャネルが定義されている。CHNL_ID 1から4のチャネルは、802.15.3c及び802.11ad等他のミリ波無線規格と同一となっている。802.15.3eではCHNL_ID 2のチャネルをデフォルトのチャネルとして使用する。

変復調及び符号化方式においては、SC-PHYとOOK-PHYという二つのモードが採用されている。SC-PHYは直交変復調をベースとした、2.16GHzチャネル時に最大13Gbit/sのスループットを持つモードで、MIMOと組み合わせることで100Gbit/sを超えるスループットを実現することができる。OOK-PHYはA/D/D-A変換器等の必要のないオンオフキーイングを採用し、2.16GHzチャネル時に最大約1.6Gbit/sのスループットを持つモードである。本節では主にSC-

表3 SC-PHY MCS 一覧

| ID | 変調方式 | 誤り訂正符号 符号化率 | 物理層レート (Gbit/s) | |
|----|--------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | | パイロット ワードなし | パイロット ワードあり |
| 0 | $\pi/2$ QPSK | 11/15 | 2.5813 | 2.2587 |
| 1 | $\pi/2$ QPSK | 14/15 | 3.2853 | 2.8747 |
| 2 | 16QAM | 11/15 | 5.1627 | 4.5173 |
| 3 | 16QAM | 14/15 | 6.5707 | 5.7493 |
| 4 | 64QAM | 11/15 | 7.7440 | 6.7760 |
| 5 | 64QAM | 14/15 | 9.8560 | 8.6240 |
| 6 | 256QAM | 14/15 | 13.1413 | 11.4987 |

PHY モードの特長について説明する。

SC-PHY における変調及び符号化方式 (MCS) 一覧を表3に示す。シンボルレートは、1.76 Gsymbols/s となっており、符号化率 14/15 という、高符号化率の符号と組み合わせることで、16QAM 変調時で 802.11ad よりも 40% 余り高速な、約 6.5 Gbit/s の物理層レートを実現している。

802.15.3e に採用されている誤り訂正符号は、802.15.3c の符号化率 14/15 の誤り訂正符号⁽⁵⁾をベースに、符号化率 11/15 をサポートしたマルチレート構成の低密度パリティ検査 (LDPC) 符号を採用している。この LDPC 符号は、符号化率の高い符号で性能低下の原因となる、誤り見逃しを低減することで、60 GHz 帯のミリ波を用いた無線方式に採用されている符号の中でも、理論限界に最も近い性能を実現している。また二つの符号化率のパリティ検査行列間に、重ね合わせ構造を導入することで、復号時の処理回路の共有を可能としている。

4.32 GHz 帯域及び 8.64 帯域チャネル時には、シンボルレートはそれぞれ 3.54 Gsymbols/s、7.08 Gsymbols/s となり、同一の MCS を用いた場合の物理層レートは、シングルチャネル時のそれぞれ 2 倍、4 倍の値となる。

SC-PHY では、近接した非マルチパス環境においてもチャネル帯域の増加が可能な、Line-of-Sight (LOS) MIMO の利用を想定したモードも策定されている。MIMO モードでは、最大の 16×16 モードを用いることで、16QAM 変調時に 105 Gbit/s、256QAM 変調時に 158 Gbit/s の物理層レートがそれぞれ達成可能となる。

3. TransfeJet X 実現に向けた取組み

3.1 TransferJet X とは

TransferJet⁽⁶⁾は、数 cm の伝送距離で最大 560 Mbit/s の物理層速度を実現する、近接無線転送技術である。TransferJet はスマートフォンやデジタルカメラ等で採用され、機器同士をかざすだけで通信を行うという直

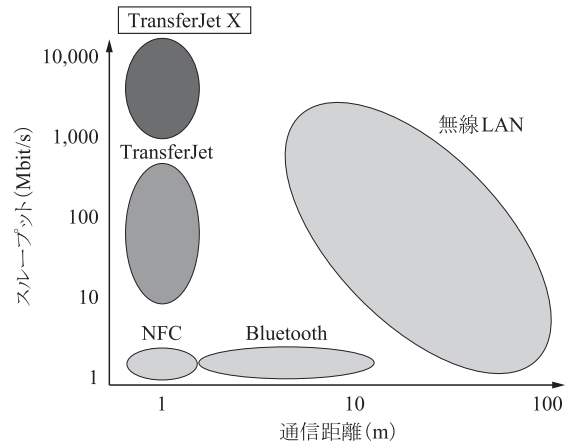


図6 無線転送技術の通信距離及びスループット TransferJet X では 10 Gbit/s 超のスループットを目指している。

感的なインタフェースによる、デバイス間の大容量データ（画像ファイル等）の送受信を実現している。

TransferJet X はこの TransferJet の次世代の規格であり、TransferJet Consortium においてその規格化が進められており、物理層及び MAC 層においては、前述した IEEE 802.15.3e をベースとし、それを拡張する形で上位アプリケーション層との間の API の策定や、相互接続性といった認証手続きに関する議論が進められていく予定である。

図6に、主な無線通信技術における、想定通信距離とスループットを示す。TransferJet X においては、TransferJet の特長である、直感的なインタフェースはそのままに、60 GHz のミリ波帯を用いることで大幅なスループットの向上を目指している。

3.2 TransferJet X が実現する次世代改札モデル

TransferJet X の実用化においては、従来の近接通信の高速化のみではなく、IEEE 802.15.3e の Ticket Gate モデルのユースケースの実用化も進められている⁽⁷⁾。

60 GHz 帯のミリ波は、5 GHz 帯に比べて、波長が 1/12 程度短いことから、様々な伝搬特性を持つアンテナを小形で実現できる。例えば文献(8)中では、25 cm 角のサイズで数 m にわたり一定の幅で均質な電波強度を実現するスロットアレーアンテナが実現されている。

同様の特性を持つアンテナを用いることで、図7のように、電波ゾーンを並列に形成することができる。これにより、これまでのように所定のターゲットに端末をタッチする代わりに、ユーザがこのゾーンを通過するだけで、従来の改札に必要なデータ送受に加えて、数 10~100 MByte 程度のコンテンツのやり取りが可能となる。

このように TransferJet X のアプリケーションにおいては、ミリ波の持つ電波伝搬特性を十分に活用すること

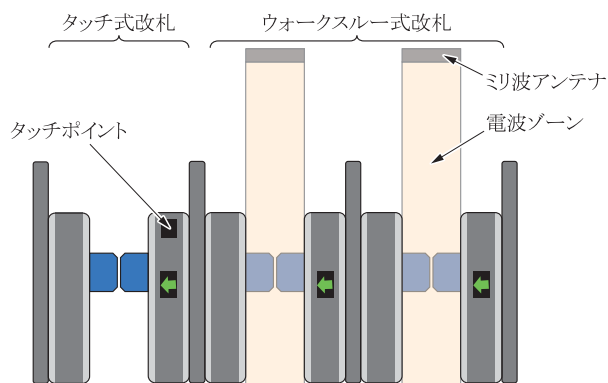


図7 TransferJet Xを用いた次世代改札モデル 通信範囲外では急しゅんに利得が落ちるミリ波用スロットアレイアンテナを採用することで、レーン間の干渉を低減した電波ゾーンを形成。更に15.3eの高速接続を活用することで、改札に求められる瞬時データ転送を実現している。

で、かざすだけで通信が可能となるという直感的なインタフェースを、従来のタッチ動作だけではなく、様々なシーンで活用することが期待される。

4. む す び

5G時代の到来により、大容量データ配信サービスは今後ますます普及していくことが想定される。本稿では、ミリ波を用いた高速近接無線であるTransferJet Xを主に紹介したが、同様に、様々な無線通信方式と5Gを組み合わせることにより、新たなアプリケーションが創出されていくものと考えられる。

本研究の一部は、総務省「戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）」（175003014）により実施された。

文 献

- (1) K. Okada, K. Kondou, M. Miyahara, M. Shinagawa, H. Asada, R. Minami, T. Yamaguchi, A. Musa, Y. Tsukui, Y. Asakura, S. Tamonoki, H. Yamagishi, Y. Hino, T. Sato, H. Sakaguchi, N. Shimasaki, T. Ito, Y. Takeuchi, N. Li, Q. Bu, R. Murakami, K. Bunsen, K. Matsushita, M. Noda, and A. Matsuzawa, "Full four-channel 6.3-Gb/s 60-GHz CMOS transceiver with low-power analog and digital baseband circuitry," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 48, no. 1, pp. 46-65, Jan. 2013.
- (2) IEEE Standard Association, 802.11ad-2012 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012 and IEEE Std 802.11aa-2012), "IEEE standard for information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 3: enhancements for very high throughput in the 60 GHz band," 2012.
- (3) IEEE Standard Association, 802.15.3e-2017 (amendment to IEEE Std 802.15.3-2016), "IEEE standard for high data rate wireless multi-media networks—amendment 1: high-rate close proximity point-to-point communications," 2017.
- (4) IEEE Doc., 802.15-15/0109r7, "Technical guidance document 3e," Sept. 2017.
- (5) H. Yamagishi and M. Noda, "High throughput hardware architecture for (1440, 1344) low-density parity-check code utilizing quasi-cyclic structure," Proc. IEEE Turbo Coding, pp. 78-83, Sept. 2008.
- (6) <http://www.transferjet.org/>
- (7) 根津 禎, "改札でタッチ、もう不要に," 日経ビジネス, 2017年11月6日号, pp. 66-68, Nov. 2017.
- (8) M. Zhang, K. Tokosaki, J. Hirokawa, M. Ando, T. Taniguchi, and M. Noda, "A 60 GHz-band compact-range gigabit wireless access system using large array antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 63, no. 8, pp. 3432-3440, Aug. 2015.

(平成30年6月25日受付 平成30年7月2日最終受付)

こんどう けいたろう
近藤 啓太郎



平7京大・理卒。平9奈良先端大情報科学研究科情報システム学専攻修士課程了。同年ソニー株式会社入社。以来、磁気記録・無線通信の誤り訂正及び信号処理の研究開発に従事。近年は、高速近接無線技術研究組合にて60GHz帯ミリ波無線通信の信号処理開発及びIEEE 802.15.3e標準化に携わる。