

次世代無線LANの標準化活動及び ドラフト規格に準拠した無線通信用LSIの開発

Standardization Activities for Next-Generation Wireless LAN and Development of Wireless Communication LSI Compliant with Draft Specifications

鍋谷 寿久 NABETANI Toshihisa 三友 敏也 MITOMO Toshiya 関谷 昌弘 SEKIYA Masahiro

近年、1 Gビット/sを超える通信速度を実現したIEEE 802.11ac（電気電子技術者協会規格 802.11ac）に準拠した高速無線LAN機器も登場し、無線LANが様々な用途に広く普及している。一方で、普及が進むにつれて、多数の無線LAN機器同士が干渉し合い、通信速度が低下する問題が生じている。この状況を打破するために、高効率化と高信頼化の実現を目指した次世代無線LAN規格IEEE 802.11axの標準化が、2013年5月から進められている。

東芝は、IEEE 802.11axの標準化に関して、多数の無線LAN端末が存在する環境下でも高効率な無線通信が可能な技術提案を行い、標準化に積極的に貢献している。また、IEEE 802.11axのドラフト規格に準拠した無線通信用LSIを開発し、スループット向上効果など稠密（ちゅうみつ）環境下でのIEEE 802.11axの有効性を確認した。

With the advent of high-speed wireless LAN (WLAN) devices compliant with the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11ac standard offering a higher communication speed of 1 Gbit/s, WLAN has become widely disseminated in a variety of fields in recent years. However, the expansion of WLAN devices has resulted in a reduction in communication speeds due to interference between multiple WLAN devices, particularly in areas of dense deployment. To address this issue, active efforts have been made since May 2013 toward realization of the IEEE 802.11ax next-generation WLAN standard.

Toshiba Corporation is contributing to the standardization of IEEE 802.11ax by making proposals on technologies for highly efficient wireless communication even in areas with dense deployment of WLAN devices. At the same time, we have been working to ensure the effectiveness of the IEEE 802.11ax standard, including improvement of the throughput when there are many WLAN devices, through the development of a wireless communication large-scale integration (LSI) complying with the draft specifications of IEEE 802.11ax.

1. まえがき

近年、日常生活における様々なシーンはもちろんのこと、IoT（Internet of Things）などの分野においても、IEEE 802.11（電気電子技術者協会規格802.11）に準拠した無線LAN機器が急激に増加している。現在では、1 Gビット/sを超えるIEEE 802.11acに準拠した高速無線LANの製品も登場しているが、普及に伴って生じる稠密環境での無線LANの利用は、端末同士の干渉を引き起こすことにつながり、通信速度を大幅に低下させることが問題となっている。

これを解決するため、2013年5月から無線LAN機器が多数存在する環境下で通信速度の向上を目指した次世代無線LAN規格（IEEE 802.11ax）の標準化が進められている。IEEE 802.11axの利用により、図1に示すような利用シーンで、より多くのユーザーが高速で高信頼かつ快適な無線LANサービスを受けることが期待できる。

東芝は、この標準化に積極的に貢献するとともに、IEEE

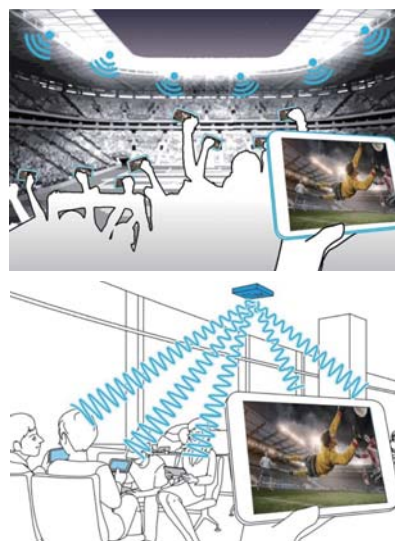


図1. IEEE 802.11axに準拠した無線LANの利用シーン

スタジアムや空港など多数のユーザーが利用する稠密環境でも、スループットを低下させることなく高速な無線LANの利用が期待できる。

Scenes of usage of WLAN devices compliant with IEEE 802.11ax

802.11axのドラフト規格に準拠した無線通信用LSIを開発した。ここでは、IEEE 802.11axの技術概要と当社の取り組みについて述べる。

2. IEEE 802.11axの標準化の概要

2.1 IEEE 802.11axの標準化動向

IEEE 802.11axは、無線LAN機器が多数存在しているような、稠密環境でのスループット向上を目的とした規格である。具体的には、従来の無線LANと比較して、稠密環境下でのユーザー当たりの平均スループットを、少なくとも4倍以上改善することを目標としている。2013年から検討が開始され、2016年11月にドラフト規格の1.0版(規格草稿の初版)が発行された⁽¹⁾。2019年12月の最終的な規格成立を目指し、現在も技術的な議論が進められている。

混雑した環境でスループットを向上させるには、周波数利用効率を改善した高効率な無線伝送が必要となる。そのため、ドラフト規格1.0版では複数ユーザーが同時に通信可能なマルチユーザーMIMO (Multiple Input Multiple Output) やOFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)などのマルチユーザー多重伝送技術が主に採用された。

マルチユーザーMIMOは、複数のアンテナを用いることでユーザーを空間的に分割多重し、複数ユーザーの無線信号を同時に伝送する技術である。従来の802.11ac規格では、アクセスポイント(AP)からの下り送信(ダウンリンク)にだけ導入されていたが、802.11axでは、端末(ユーザー)からの上り送信(アップリンク)にも適用される。OFDMAは、ユーザーを周波数軸で分割多重して同時伝送を可能とする技術である。OFDMAは、802.11axで初めて採用される技術であり、ダウンリンク/アップリンクともに導入を予定している。規格上は、帯域幅が20MHzの場合、最大で9ユーザーの多重が可能になる。

従来の無線LANでは、一度に1ユーザーずつしか伝送できなかったため、ユーザー数が増加するにつれて各ユーザーのスループット低下を招いていたが、マルチユーザー多重伝送技術により、ユーザー数が増加してもスループットを低下させることなく高速な無線通信が可能となる。また、APの集中制御によってマルチユーザー多重伝送技術をアップリンクに適用することで、無線LAN特有の課題でもあった、複数ユーザー間での無線フレーム衝突の問題も解消でき、高信頼化も期待できる。

このほか、802.11ax標準化では、フレーム送信時に必要となるチャンネル状態を判定するCCA (Clear Channel Assess-

ment) しきい値を制御して、空間的利用効率の向上を図るSpatial Reuse技術や、一度により多くの情報伝送が可能な変調方式である1024-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)などの採用が決まっている。

2.2 東芝の取り組み

当社は、IEEE 802.11axの標準化に、立ち上げ当初から参画している。マルチユーザーMIMOは、送信ビームフォーミング技術を利用し、複数のユーザーに対して互いに干渉しない指向性ビームを送信することで同時伝送を可能とする。その際、APは、各ユーザーから伝搬路行列を事前にフィードバックしてもらい、得られた伝搬路情報を利用するが、当社は、この伝搬路行列のフィードバックを効率化する手法について技術提案し、最新ドラフト規格として採用された⁽²⁾。また、技術提案だけでなく、802.11axの有効性を示すシミュレーション評価なども積極的に行い、標準化に貢献している。

図2に802.11ax標準化で採用された、当社提案の伝搬路行列フィードバックプロトコルを示す。各ユーザーは、推定した伝搬路行列をCB (Compressed Beamforming) フレームに含めて、APにフィードバックすることになるが、従来規格では、各ユーザーから順次CBフレームがフィードバックされていた。そのため、ユーザー数が増加するにつれてフィードバックに要する時間も増加し、プロトコル上の

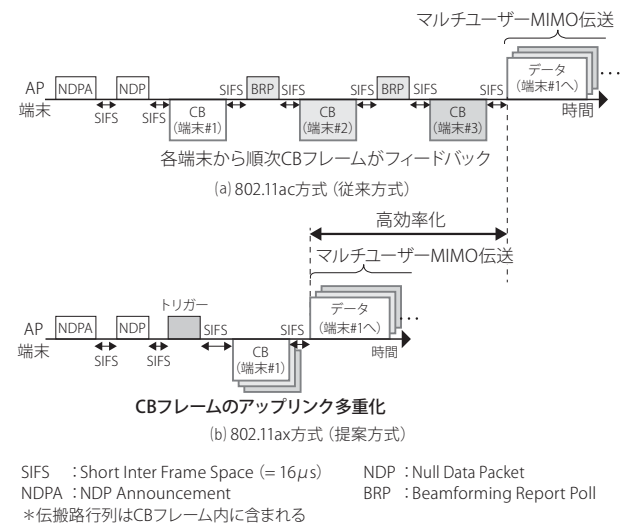


図2. 提案の伝搬路フィードバックプロトコル

提案方式では、アップリンクマルチユーザー多重伝送技術を適用することにより、オーバーヘッドが小さい高効率な伝搬路行列フィードバックを実現する。

Toshiba's proposed propagation channel feedback protocol

オーバーヘッドの増大につながっていた。一方、提案方式では、各ユーザーからのCBフレームのフィードバックにアップリンクマルチユーザー多重伝送技術を適用する。これにより、ユーザー数によらずフィードバック時間を一定の所要時間で実現できる。そのため、提案方式は、ユーザー数が多くなるほど、従来方式に比べて高効率化できる。ここで、トリガーフレームは、直交した同時送信を可能とするために必要となる、各ユーザーへの情報通知や送信タイミング制御に用いられるフレームである。

3. IEEE 802.11axドラフト規格に準拠した無線通信用LSI開発

3.1 機能・構成

表1に開発した無線通信用LSIの機能・仕様一覧を示す。802.11ax規格への対応及び当社独自の機能を搭載している。無線規格に関しては新規格となる802.11axに加え、従来の全ての無線LAN規格(802.11a/b/g/n/ac)に対応している。複数ユーザー同時通信が可能なマルチユーザー多重伝送機能に加え、更にリンクスループットを向上させるため、四つの送受信システムを利用する4x4 MIMO、一度に10ビット(2¹⁰=1,024)の情報を送信する変調方式(1024-QAM)、並びに2倍の周波数帯域を利用することで高速化を実現するキャリアアグリゲーションに対応し、最大2 Gビット/sを超えるスループットを実現している。また、当社独自機能として、電子レンジやほかの無線システムが発する干渉信号でスループットが低下するのを防止するため、干渉信号の検出機能を搭載している。

図3にLSIの構成を示す。デジタル信号処理回路で用いられるデジタル信号と、アンテナから入出力される電波信号と

表1. 開発した無線通信用LSIの対応機能及び仕様

Supported functions and specifications of wireless communication LSI

項目	仕様・機能	
無線LANプロトコル	802.11a/b/g/n/ac/ax	
無線通信	最大スループット	2.165 Gビット/s
	周波数帯	2.4 GHz帯 / 5 GHz帯
	最大帯域幅	80 + 80 MHz
	MIMOストリーム数	4
	最大変調多値(QAM)数	1,024
	マルチユーザー多重伝送機能	マルチユーザー MIMO / OFDMA
LSI	干渉検出機能	無線LAN, 電子レンジなどの13種類に対応
	プロセスノード	28 nm CMOS
	チップサイズ	7.02 × 6.35 mm

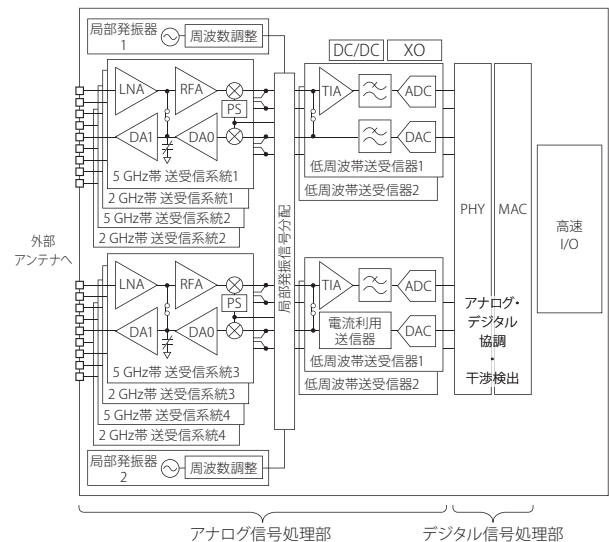
を相互に変換するためのアナログ送受信回路が、送信・受信・周波数帯に応じ16系統搭載されている。

前述した1024-QAMは、信号の振幅と位相の組み合わせを1,024種類生成することで一度に10ビットの情報を扱う変復調方式であり、高精度な信号処理を伴う。そのためには、アナログ送受信回路で発生する誤差や雑音のレベルを、設計限界ぎりぎりの信号レベルである1/250以下に低減する必要がある。当社が開発した、内部アナログ回路の誤差フィードバック及びデジタル信号処理を活用した高精度誤差検出・誤差補正を備えたアナログ・デジタル協調処理により、所望の誤差レベルを達成した³⁾。

干渉検出機能は、干渉電波信号の特徴を抽出可能なアルゴリズムにより、従来では検出・分離が困難であったスイッチング方式電子レンジに対応したほか、無線LANやBluetoothなど13種類の無線信号の検出を可能とした³⁾。

3.2 LSI測定結果

無線通信用LSIは28 nm CMOS(相補型金属酸化膜半導体)プロセスにより開発した。チップ及び評価ボードの写真を図4に示す。



- DC/DC : 直流直流変換器
- LNA : 低雑音増幅器
- TIA : トランスインピーダンスアンプ
- PS : 位相器
- DAC : デジタルアナログ変換器
- MAC : メディアアクセス制御層
- XO : 水晶発振器
- RFA : 無線周波数増幅器
- ADC : アナログデジタル変換器
- DA : ドライバアンプ
- PHY : 物理層
- I/O : Input/Output

図3. 無線通信用LSIのブロック図

802.11axに対応した高周波アナログ回路・高速デジタル処理回路が、全て一つのICチップ内に集積されている。両回路の協調により世界最高レベルの無線性能を実現した。

Block diagram of wireless communication LSI

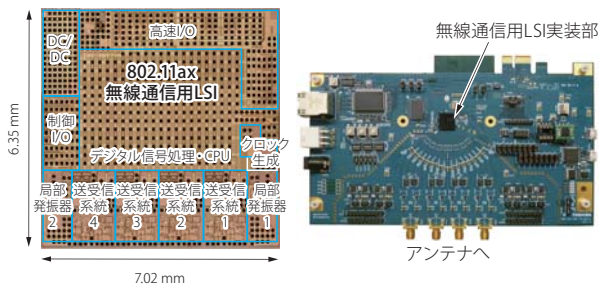


図4. 無線通信用LSIチップと評価ボード

28 nm CMOSプロセスを利用して、7.02 × 6.35 mm角のチップサイズを実現した。

LSI chip and evaluation board

図5に1024-QAM測定結果を示す。アナログ・デジタル協調補正処理を実施することにより、青色で示される1,024点の位相・振幅情報が信号空間ダイアグラム上で正しく分離できていることが分かる。補正により、誤差レベルは信号レベルの1/300未満となっており、世界最高レベル^(注1)の信号誤差精度を得た。加えて、図5に干渉検出機能の測定結果も示す。電子レンジやほかの無線LAN信号を入力した際の検出出力となっており、従来構成では検出困難であったスイッチング方式電子レンジの検出、及び電子レンジとほかの無線LAN信号との識別・分離に成功した。この機能により、干渉信号が存在する場合でも、干渉が影響しない周波数帯を探すなど、スループット低下を防止するための制御が可能となる。

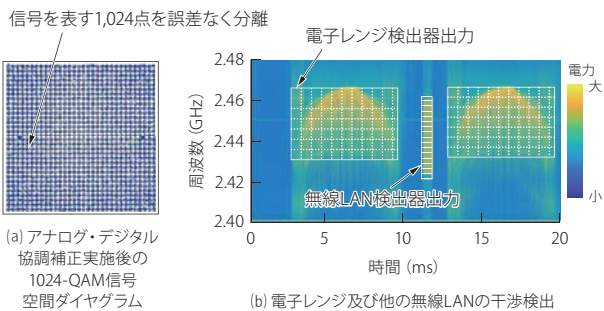


図5. 1024-QAM信号及び干渉検出機能の測定結果

世界最高レベルの信号誤差精度を達成し、1024-QAMの信号送受信を実現するとともに、従来では検出困難であった干渉信号の検出にも成功した。

Results of measurement of 1024-QAM (quadrature amplitude modulation) signal and interference detection function

(注1) 2018年2月現在、無線LAN通信用LSIにおいて、当社調べ。

4. アップリンクOFDMA性能評価

802.11axドラフト規格に採用されるアップリンクOFDMAの有効性を示すために、開発した無線LSIを評価ボードに実装して評価環境を構築した。1台をAP、9台を端末として動作させ、無線通信として従来の802.11acを用いた場合と802.11axアップリンクOFDMAを用いた場合のUDP (User Datagram Protocol) スループットを比較評価した⁽⁴⁾。

図6にAPに接続する端末数を変えた場合の、20 MHz帯域幅利用時の平均システムスループット及び端末ごとの平均スループットの評価結果を示す。端末ごとの平均スループットは、802.11acでは端末数が増加するにつれて減少する傾向にあるが、802.11axではスループットの低下は見られない。端末数が9台の場合、802.11axでは平均5.8 Mビット/s、802.11acでは平均2.8 Mビット/sであり、約2.1倍の改善効果が得られた。その結果、802.11acでは、端末数が増加するにつれて平均システムスループットが低下する傾向となるが、802.11axでは、逆に向上していく様子が確認できる。ここで、図6では接続端末数が少ない場合に802.11axのスループットが低く見えるが、これは評価上アップリンクOFDMAにおける各端末への割り当て周波数帯域を端末数に関係なく最小単位に固定したためである。実際には、端末数に応じて割り当て帯域幅を柔軟に変化させるので802.11acより低くなることはない。

これら802.11axのスループット改善効果は、アップリンクOFDMAによるプロトコルオーバーヘッド削減に伴う高効率化や、無線フレーム衝突回避による高信頼化などによるものと考えられる。端末数が更に多い場合には、より大きな改善

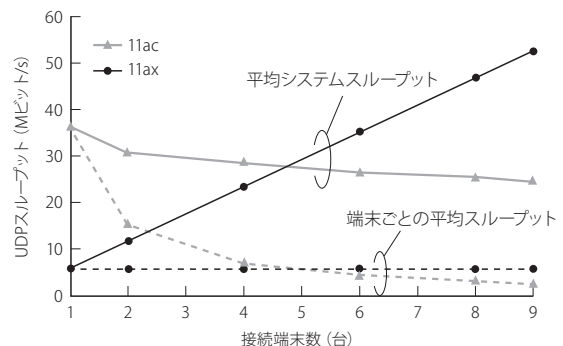


図6. 802.11axと802.11acでのスループット特性比較

アップリンクOFDMAを用いることで、9台の端末と通信した場合には、従来と比較して、約2.1倍スループットが改善される。

Comparison of throughput performance of 802.11ax and 802.11ac

効果が期待できる。

5. あとがき

IEEE 802.11axは、複数のユーザーが同時に通信可能なマルチユーザー多重伝送技術などにより、従来の無線LAN規格では実現できない高効率化と高信頼化を可能とした次世代無線LAN規格である。2013年5月に標準化が開始され、2019年12月に規格が成立する見込みである。

当社は、マルチユーザー多重伝送技術の一つであるマルチユーザー MIMO 技術において、高効率化を実現する伝搬路行列フィードバック手法などを提案し、最新のドラフト規格に採用されるなど、積極的に標準化に貢献している。また、ドラフト規格に準拠した、世界最高レベルの信号誤差精度の無線通信用LSIを開発し、スループット向上効果など稠密環境下での802.11axの有効性を確認した。

802.11ax技術の実現により、スポーツなどの各種イベントにおいて、スタジアムなどでの高速無線LANサービスの提供が期待できる。加えて、スマート工場など多数の無線センサーを収容する用途での利用や、ロボット・ドローン無線制御など高信頼化が求められる産業用途での利用など、実用化への貢献が期待できる。今後も、802.11axの優位性を活用した無線システム応用に向けた研究を継続していく。

文 献

- (1) IEEE P802.11ax, Draft1.0 : 2016. 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 Enhancements for High Efficiency WLAN. IEEE.

- (2) Nabetani, T. et al. A Novel Low-Overhead Channel Sounding Protocol for Downlink Multi-User MIMO in IEEE 802.11ax WLAN. IEICE Trans. Commun. 2018, E101-B, 3, p.924-932.
- (3) Kawai, S. et al. "An 802.11ax 4x4 spectrum-efficient WLAN AP transceiver SoC supporting 1024QAM with frequency-dependent IQ calibration and integrated interference analyzer". IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, CA, USA, 2018-02, IEEE. 2018, p.442-444.
- (4) 関谷昌弘, 鍋谷寿久. "802.11ax対応LSIによるUL OFDMAスループット改善効果". 2018年総合大会講演論文集. 東京, 2018-03, 電子情報通信学会. B-5-137.



鍋谷 寿久 NABETANI Toshihisa

研究開発本部 研究開発センター
ワイヤレスシステムラボラトリー
電子情報通信学会会員
Wireless System Lab.



三友 敏也 MITOMO Toshiya, Ph.D.

研究開発本部 研究開発センター
ワイヤレスシステムラボラトリー
博士(工学) 電子情報通信学会・IEEE会員
Wireless System Lab.



関谷 昌弘 SEKIYA Masahiro

研究開発本部 研究開発センター
ワイヤレスシステムラボラトリー
Wireless System Lab.