

福岡工業大学 学術機関リポジトリ

IEEE802.11ax

無線LANにおけるダウンリンク通信の性能評価
—実機を用いた実験結果とシミュレーション結果の
比較—

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 福岡工業大学総合研究機構 公開日: 2024-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): IEEE802.11ax, Channel Bonding, OFDM, OFDMA 作成者: 田村 瞳, 望月 蓮 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/11478/0002000161

IEEE802.11ax 無線 LAN におけるダウンリンク通信の性能評価 — 実機を用いた実験結果とシミュレーション結果の比較 —

田村 瞳 (工学部電子情報工学科)

望月 蓮 (工学研究科電子情報工学専攻)

Performance Evaluation of Downlink Communication in IEEE 802.11ax Wireless LAN — Comparison between Experimental and Simulation Results —

TAMURA Hitomi (Department of Information Electronics, Faculty of Engineering)

MOCHIZUKI Ren (Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering)

Abstract

We have evaluated the performance of down-link communication in IEEE802.11ax wireless LAN through experiments using commercially available devices. The experimental results showed the effectiveness of bandwidth control depending on the number of STAs and traffic characteristics. However, we could not implement a new control method for commercially available WLAN devices. In this paper, in order to implement a new bandwidth control method by adaptive control of the number of RU tones in IEEE802.11ax wireless LAN, we will clarify the differences between simulation results using network simulator version 3 (NS-3) and experimental results, and we will discuss the validity of evaluation using NS-3.

Keywords : IEEE802.11ax, Channel Bonding, OFDM, OFDMA

1. 序論

スマートフォンやPCだけでなく、家電などのモノをインターネットに接続し、活用する Internet of Things (IoT) デバイスの急速な普及⁽¹⁾によって、無線 LAN に接続するデバイス数が増加し、トラフィック特性の多様化が進んでいる。これまでの無線 LAN では、1 台の端末 (Station, STA) から生成される大量のトラフィックを、1 台の無線 LAN Access Point (AP) に接続された STA 分だけ収容するための広帯域化が進められてきたが、今後は広帯域化だけでなく、多数の STA の効率的な収容と多数な特性を有するトラフィックに対する通信品質の提供も必要になる。

これまで、無線 LAN における広帯域化技術として、1 次/2 次変調方式の改良、Aggregate MAC Protocol Data Unit (A-MPDU) や Aggregate MAC Service Data Unit (A-MSDU) 等によるフレーム集約、使用可能なチャネル幅の拡大 (Channel Bonding, CB) が進められてきたが接続デバイス数の増加が予想される今後は、複数ユーザの効率的な収容が重要となるため最新の無線通信規格である IEEE 802.11ax (以降、11ax と表記する)⁽²⁾ では、Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) が導入され、従来の Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) による通信待機時間が低減されている。

これまでの先行研究において、11ax 準拠の市販の無線 LAN AP から複数台の STA 宛でのダウンリンク通信時の通信手順

の確認や通信性能の評価が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの成果より、STA 数やトラフィック特性に応じて OFDM もしくは OFDMA を適用することの有効性が示唆された。ここで、STA 数や無線 LAN 上のトラフィック特性を含めた無線通信環境に適した Resource Unit (RU) 割当制御のためには、無線 LAN AP 実機や STA のファームウェアやドライバを改良し、RU 制御プログラムを実装しなければならないが、市販の製品に実装することは不可能である。過去の研究では Linux を用いて新たな制御を実装するケースもあるが、Linux OS における IEEE802.11ax への対応状況が良好ではなく、RU 制御プログラムの実装は難しい。そこで、ネットワーク研究で頻繁に利用されている NS-3 シミュレータを用いて新たな RU 制御アルゴリズムを実装し、性能評価を実施する予定にしている。

NS-3 シミュレータでは、2023 年に IEEE802.11ax OFDMA が実装され、OFDMA のシミュレーションが可能となった。シミュレータによる性能評価を行う前に、実機による通信性能とシミュレータによって得られる通信性能やシミュレータ内部での通信制御、RU 割当制御に関して、実機とシミュレータでの実装の相違点について明らかにする必要がある。そこで本研究では、市販の 11ax 準拠 AP に接続する複数 STA のダウンリンク通信の実験とシミュレーションを通して、それぞれの実験によって得られた通信性能の相違点や制御の違いについて明らかにする。

以降、2 節で 11ax のチャネルボンディング機能と OFDMA の詳細について述べ、3 節で実験、シミュレーション環境と

評価指標について説明する。4 節で実験とシミュレーション結果の比較, 考察を述べ, 最後に 5 節でまとめる。

2. IEEE802.11ax 無線 LAN における高速化技術

11ax は 2021 年 2 月に標準化され, 新たに複数ユーザに対して同時通信を行う OFDMA が採用されている。本章では, 実験において利用したチャンネルボンディング機能, OFDMA について説明し, これらの技術を適用した時の通信手順について説明する。

2.1 チャンネルボンディング チャンネルボンディングは, 隣接する複数のチャンネルをまとめて通信帯域として使用する技術(図 1⁽⁵⁾)であり, その通信帯域は 1 つのプライマリチャンネル(20MHz)と 1 つ以上のセカンダリチャンネルで構成される。図 2 に示すように, プライマリチャンネルにおいて DCF Inter Frame Space (DIFS)時間と Contention Window (CW)時間, チャンネルセンシングを実施する。セカンダリチャンネルでは, PCF Inter Frame Space (PIFS)時間のみチャンネルセンシングを実施し, プライマリチャンネル, セカンダリチャンネルの全チャンネルがクリアである場合に, あらかじめ設定された全チャンネルを利用してデータフレームを送信する。一方, チャンネルセンシングの期間中に, プライマリチャンネルやセカンダリチャンネルにおいて他の信号が検知され, ビジーと判定された場合, 全チャンネルがクリアとなるまでデータフレームの送信ができない。これがスタティックチャンネルボンディングの動作である。本研究における実験で使用した AP はチャンネルアクセスとして, CSMA/CA with RTS/CTS を利用したスタティックチャンネルボンディングで動作しており⁽³⁾, 全チャンネルの空きを確認時のみに通信を行う。

2.2 OFDMA 図 2 中のデータフレーム送信時は, 2 次変調方式として 11ac 以前の通信規格では OFDM, 11ax では OFDMA が適用される。OFDM では, 通信帯域内の電波を複数の低帯域, 低レートの搬送波 (サブキャリア) に分割し, これらを直交させることにより, データを並列に送信する(図 3(a))。OFDM では, 1 STA 毎に AP と STA 間で使用する帯域内の全サブキャリアを使用して通信を行うため, 送信権を得た STA 以外の STA は CSMA/CA によって送信権を得るまで送信待ち状態となる。よって, STA 数が増加するほど, CSMA/CA による通信待機時間が増大する。特に, 昨今の IoT 機器の普及により, 1 台の無線 LAN AP に接続する機器台数が増加しており, CSMA/CA によるオーバーヘッドが増加し, 通信性能に影響する可能性がある。

そこで, 11ax から導入された OFDMA では, OFDM における全サブキャリアのうちの一部を集約して Resource Unit (RU) にし, 各 RU を STA に割り当てることで 1 台の AP と複数台の STA との同時通信が可能となる⁽²⁾。図 3(b) に OFDMA 適用時の RU 割当の一例を示す。OFDMA を使用することで各 STA は, CSMA/CA による通信待機時間を減少できる一方, 1 STA が使用可能な帯域幅が分割によって減少する。

OFDMA では各 STA に割り当てられる RU の最小単位はトー

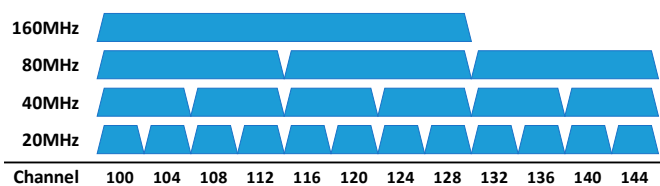


図 1 IEEE 802.11ax チャンネルボンディング時のボンディングパターン

Fig. 1. Combination pattern of bonding-channel in IEEE 802.11ax.

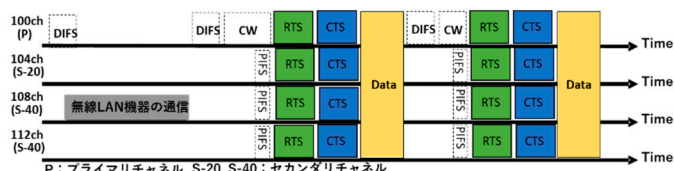


図 2 CSMA/CA with RTS/CTS によるスタティックチャンネルボンディング (80MHz の場合)

Fig. 2. Static channel bonding (SCB, 80MHz) using CSMA/CA with RTS/CTS.

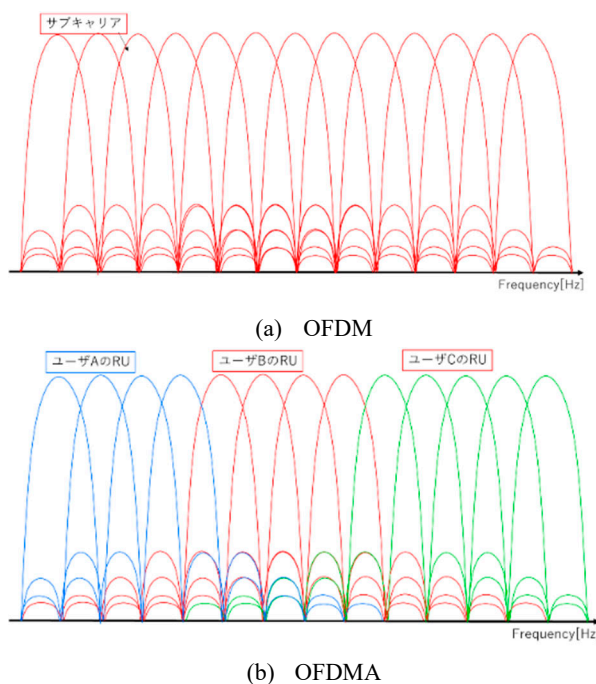


図 3 OFDM と OFDMA における周波数の利用の例

Fig. 3. Comparison of frequency utilization between OFDM and OFDMA.

ン (サブキャリア) 数を 26 本束ねた RU-26 である。RU の割当方式は 20MHz チャンネル幅の場合, RU-26 (9 つの RU に分割), RU-52 (4 つの RU に分割), RU-106 (2 つの RU に分割), RU-242 (全サブキャリアを 1 STA が使用) である。さらにチャンネルボンディングを適用することにより, 40MHz の場合は RU-484, 80MHz では RU-996 を利用可能である⁽²⁾。このように, OFDMA では帯域幅内の全サブキャリアを複数の RU に分割し, 複数台の STA に割り当てて同時通信が可能に

なる一方、OFDM 適用時よりも 1STA あたりが利用可能な帯域幅が最大 1/9 まで減少する。よって、STA 数によって、OFDM と OFDMA の有効性が異なっており、これまで OFDM, OFDMA の適用環境について、実機を用いた実験を通して明らかにされている⁽⁴⁾。しかし、実験を通して、各 STA への RU トーン割当数や STA への割当タイミングについては、明らかにすることができなかった。これらは IEEE802.11ax 規格で明示されておらず、ベンダーによる実装に依存している。

3. 実験, および, シミュレーション

3.1 実機を用いた実験環境 本研究では、IEEE802.11ax 準拠の無線 LAN AP に接続する IEEE802.11ax 準拠のインターフェースを持つ STA 数を変化させ (STA 台数 $n = 1 \sim 5$ とする), トラフィック生成のために AP に有線接続した PC (n 台, 1Gb/s Ethernet を使用) から各 STA に同時に Constant Bit Rate (CBR)/ User Datagram Protocol (UDP) 通信を行う場合の OFDM, OFDMA のいずれかを適用した時の通信性能を評価する。実験環境を図 4 に示す。使用した AP のアンテナ数は 4 本, 各 STA のアンテナ数は 2 本であり, AP と各 STA の通信は空間ストリーム数 2x2 で通信を行う。また, AP において, Multi User-Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO) を OFF とした。実験は, 福岡工業大学 総合研究機構の電波遮断室, C 棟地下ホールにて実施し, 他の無線通信機器による電波の影響がない環境で実験を行った。

3.2 実験手順 実験手順として, AP に 1Gb/s Ethernet で有線接続された送信側 PC から 11ax 無線 LAN に接続している受信側 PC (STA) へダウンリンク方向に, iPerf3⁽⁶⁾ を使用して 30 秒間, 全 STA 向けに同一のトラフィックを生成した。本研究では, リッチコンテンツによる通信を行う高負荷のトラフィックを想定して, チャンネルボンディングによる最大物理伝送レートに合わせてパケット発生レートを設定した (表 1)。同一環境・トラフィック生成における試行回数を 5 回とし, 無線通信区間のトラフィック分析のために Tamosoft 社 CommView for Wi-Fi⁽⁷⁾ を使用した。

3.3 シミュレーション シミュレーションでは, ネットワークに関する研究において広く利用されている network simulator version 3 (NS-3)⁽⁸⁾ を用いて, 図 4 の実験環境と同じ無線通信環境を構築した。生成したトラフィックについても 3.2 節で述べた実験と同様とし, 送信側 PC から受信側 PC (STA) へのダウンリンク方向に, 表 1 のトラフィック生成パラメータを適用して CBR/UDP トラフィックを生成した。シミュレーション時間は 30 秒間とした。なお, シミュレーションにおいては IEEE802.11ax 無線 LAN において OFDM を指定することができなかったため, OFDMA における全トーンを指定して使用する場合のシミュレーション結果を OFDM 適用時とみなした。

なお, 実験では, STA 数に合わせた RU トーン割当が行われており, 各 STA への割当 RU トーン数やトーン割当

表 1 iPerf3 による生成トラフィック

Table 1. Parameter settings of traffic generation by iPerf3.

ボンディング幅 [MHz]	PHYレート [Mb/s]	iPerf3の生成トラフィック	
		パケットサイズ [Byte]	生成レート [Mb/s]
20	286.8	1470	300
40	573.5		610
80	1201		1210

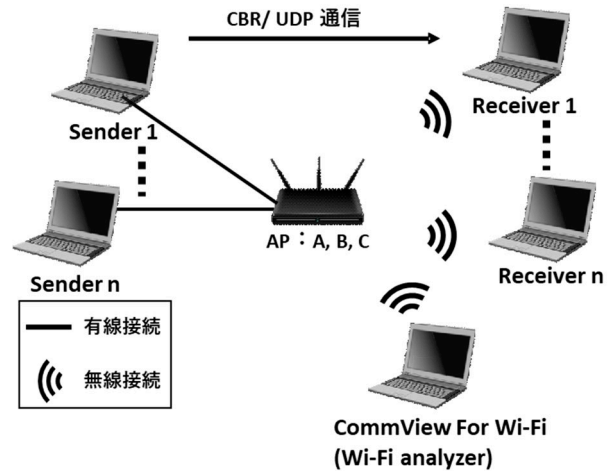


図 4 実験環境

Fig. 4. Experimental Environment.

制御については標準化されておらず, ベンダーによる実装依存で, 機器によって異なる挙動をする可能性がある。シミュレーションでは, 我々では実機に実装できない制御を実装することが可能であるが, NS-3 における RU トーン数制御に関するカスタマイズの可能性について検討するため, RU トーン数を指定したシミュレーションが可能であるかについても検証を行った。

3.4 性能指標 本研究では, i 回目の実験における各 STA x ($x = 1 \sim n$) での iPerf3 の実行結果であるスループットを $Th(x)_i$ を定義し, 性能指標として n 台の STA で得られたスループットの合計値に対して, 1 回の試行あたりの平均値を示す Th_{ave_n} を導出した。

$$Th_{ave_n} = \left(\frac{1}{5}\right) \sum_{i=1}^5 \sum_{x=1}^n Th(x)_i \quad (1)$$

この評価指標を用いて, STA 数, チャンネルボンディングのボンディング幅, OFDM/OFDMA 適用によるスループットへの影響を調査する。

4. 実験結果

4.1 実験結果とシミュレーション結果の比較～STA 数の影響 (ボンディング幅 20MHz の場合) AP がチャンネルボンディングを行わない場合における STA 数 n の平均合計スループットへの影響を図 5 に示す. 図 5 より, 実験では STA 台数が 3 台の場合に OFDMA, STA 台数が 1, 2, 4, 5 台では OFDM で合計スループットが高くなっていった. このように, STA 台数によって, STA1 台あたりの可用帯域や CSMA/CA のオーバーヘッドが変化することから, OFDM, OFDMA の有効性が異なっていた. 一方, シミュレーション結果では STA 台数が 5 台以下では常に OFDM が有効であった.

これは, シミュレーションでは無線環境がクリアであることからパケットロスや伝送レート制御が動作しないため常に良好な環境で通信でき, 理想的なスループットが得られる一方, 実機による実験環境では, 無線環境が良好であっても偶発的な電波の乱れや受信器における受信電波の乱れの影響でパケットロスが生じてしまうことから, 再送時にデータフレームの伝送レートを下げる制御によってスループットが低下したと予想される.

しかし, 実験結果とシミュレーション結果間のスループット値に大きな差はみられず, 今後 RU 割当の適用を考えている OFDMA に注目すると, 最も大きい場合で実験結果とシミュレーション結果の差は 24.2 [Mb/s] 程度であった.

4.2 実験結果とシミュレーション結果の比較～ボンディング幅の影響～ 図 6, 7 に, チャンネルボンディングのボンディング幅を 40MHz, 80MHz とした場合の実験結果, および, シミュレーション結果を示す. 図 6, 7 より, ボンディング幅の増加と STA 数の増加に伴って, 実験結果とシミュレーション結果の差が大きくなっている. これは 4.1 節で述べた理由と同様に, シミュレーションでは理想的な通信環境でありパケットロスがなく, 実験環境ではパケットロスが生じることが要因であるが, ボンディング幅が 80MHz の場合に特にパケットロスが多く発生することから, 実験結果とシミュレーション結果に大きな差が生まれる. これは, 帯域を拡大したチャンネルボンディングにおいて, 現状のハードウェアが高速通信に対応しきれていないことに加えて, 新しく追加された OFDMA 適用時は特に, 帯域幅の拡大によって動作が不安定になり, パケットロスが多く生じ, 再送フレームが多くなることが原因である. 本実験では, CommView For WiFi によって無線区間のフレームキャプチャを実施したが, チャンネルボンディングを 40MHz, 80MHz で行った場合, 高い伝送レートで送信されるデータフレームがほとんどキャプチャできていなかった. そこで, 低レートで送信される制御フレームについて, キャプチャできていたフレームから実験結果について考察を行う.

表 2 に実験から得られた CTS-to-self と呼ばれる制御フレームの発生数を示す(STA 数 $n = 5$ の場合). CTS-to-self は,

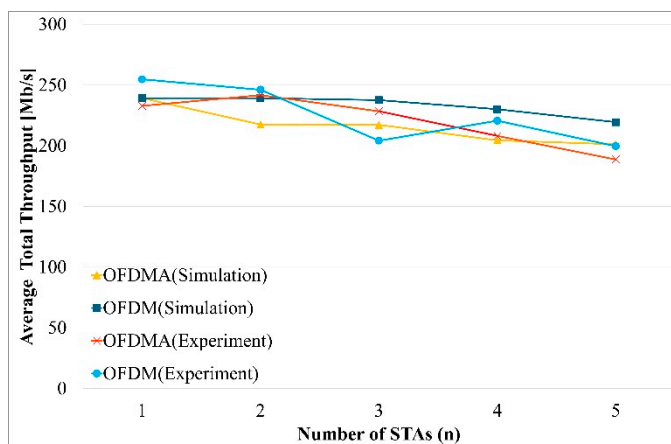


図 5 全 STA の合計スループットの平均値(20MHz の場合)

Fig. 5. Total throughput of STAs in 5-time experiments on average (Bonding width: 20MHz)

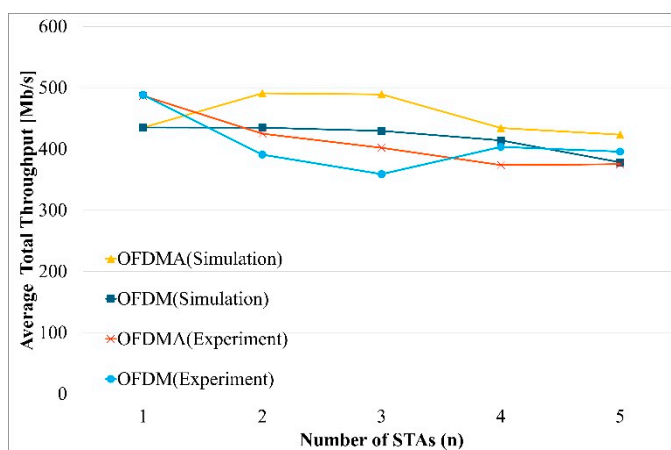


図 6 全 STA の合計スループットの平均値(40MHz の場合)

Fig. 6. Total throughput of STAs in 5-time experiments on average (Bonding width: 40MHz)

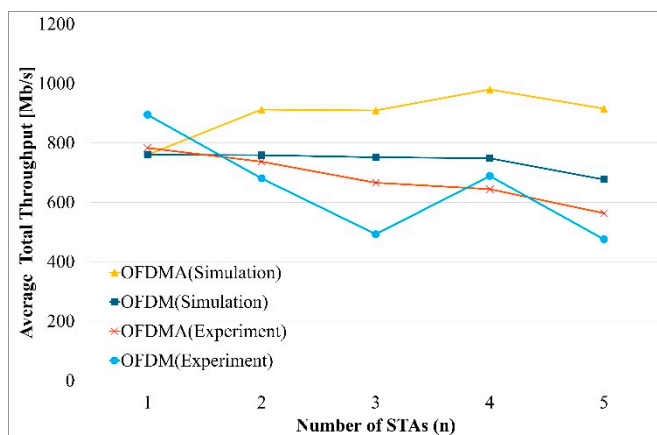


図 7 全 STA の合計スループットの平均値(80MHz の場合)

Fig. 7. Total throughput of STAs in 5-time experiments on average (Bonding width: 80MHz)

表 2 CTS-to-self 発生数 (n=5 の場合)

Table2. Impact of channel bonding width on the number of CTS-to-self frames (n=5)

2次変調方式	ボンディング幅		
	20MHz	40MHz	80MHz
OFDM	77.4	510.4	958.2
OFDMA	73.4	4175.2	3285.2

パケットロスが発生し、再送処理を行う場合に発生する。表 2 より、ボンディング幅の増加と OFDMA の適用によって CTS-to-self 数が増加している様子がわかる。このように、パケットロスが生じることで、再送のための制御フレームが発生するが、再送を行うことによるオーバーヘッドに加え、CTS-to-self を送信するためのオーバーヘッドも増えることから、データフレームを送信するためのエアタイムが減少することで、さらにスループットが劣化する。シミュレーションではこの影響がなく、理想的なスループットが得られているため、実験結果とシミュレーション結果に大きな差が生じた。しかし、20, 40, 80MHz それぞれの帯域幅と STA 数において、シミュレーションと実験による結果の間で、OFDM と OFDMA によるスループットの大小関係に大きな違いがなく、シミュレーション結果を用いた評価は妥当であると考えられる。

4.3 RU トーン数を指定したシミュレーション結果 NS-3 によるシミュレーションにおいて、OFDMA 適用時に 1STA への RU トーン数を固定してシミュレーションを実行することが可能であった。本節では、STA 数を最大 10 台まで増加し、1STA への RU 割当トーンを固定にし、RU トーン数と全 STA の合計スループットへの影響について議論する。

チャンネルボンディングを行わず、20MHz 帯域幅を使用する場合、20MHz 帯域内のトーン数は 242 トーンである。OFDMA におけるトーン割当数と同時に通信可能な STA 数については、RU-242 で 1, RU-106 では 2, RU-52 で 4, RU-26 で 9 となる。これらのトーン数を 1STA が固定で使用するよう指定してシミュレーションを行った場合の全 STA の合計スループットを図 8 に示す。図 8 より、STA 数が 6 以下では、RU-242 適用時のスループットが最大である。STA 数が 7, 8 では RU-106, STA 数が 9, 10 では RU-26 適用時のスループットが最大となった。STA 数が 6 以下の場合、RU 割当トーン数が少なく狭帯域になるよりも、CSMA/CA のオーバーヘッドがあったとしても 1STA が可能な限り広帯域である方が効果的であることがわかる。一方、STA 数が 7 以上となると、CSMA/CA によって通信待機を行うオーバーヘッドが大きいため、RU トーン数が少ない場合でも複数 STA が同時通信するほうが効果的となった。

以上のように、シミュレーション内のように電波環境やハードウェアの不備が反映されない理想的な通信環境で

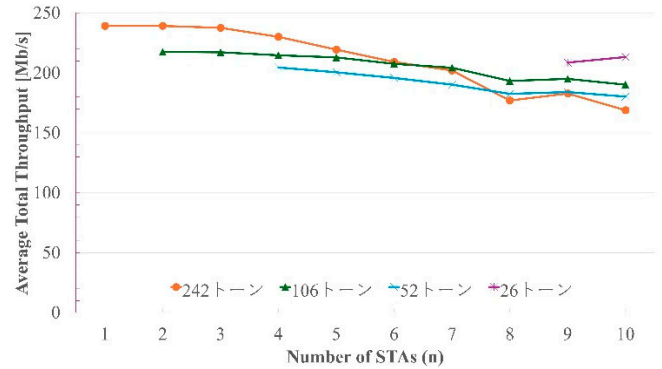


図 8 RU トーン数指定時のシミュレーション結果 (20MHz)

Fig. 8. Impact of allocated RU-tones to 1 STA on total throughput of STAs in 5 times experiments on average (Bonding width: 20MHz)

は、STA 数に対して適切な RU トーン数が存在することを明らかにした。しかし、NS-3 内でのトーン割当については、帯域幅 20, 40, 80MHz に対して各 STA に対して同じトーン数 (20MHz の場合、RU-242, 106, 52, 26) しか適用できない。例えば、STA 数が 3 である場合に、RU-106 を 1STA に割当、RU-52 を 2STA に割り当てるのが不可能である。そこで、今後は、このように STA 毎に不均一な RU トーン数割当を実現するために NS-3 を改良し、通信環境に適した RU 割当制御のシミュレーション評価を行うことを目標としている。

5. まとめ

本研究では、IEEE802.11ax 準拠無線 LAN における RU トーン数制御による帯域制御方式を実装するための事前検討として、実機を用いた実験と NS-3 シミュレータによるシミュレーション結果を比較した。実験結果とシミュレーション結果の差を確認し、今後はシミュレーションによる評価を行っていくことの妥当性について確認した。さらに、NS-3 における RU トーン数割当について、その動作確認を行った。

文 献

- (1) Cisco Systems, "Cisco Annual Internet Report (2018~2023) White Paper," <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>. (accessed Nov. 2023)
- (2) Aruba Networks, "802.11AX White paper," https://www.arubanetworks.com/assets/_ja/wp/WP_802.11AX_ja-JP.pdf. (accessed Nov. 2023)
- (3) 中島 千晴, 田村 瞳, 野林 大起, 塚本 和也, 「IEEE802.11ax 無線 LANAP の通信手順と通信性能に関する性能評価」, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-6-31, p.31 (2022 年 9 月).
- (4) T. Oogami, H. Tamura, D. Nobayashi, K. Tsukamoto, "Experimental Evaluation of Downlink Communication Performance of IEEE 802.11ax Wireless LAN : OFDM vs. OFDMA," International Journal of Grid and Utility Computing (in press), (2024).

- (5) 田村 瞳, 藤井 一樹, 野林 大起, 塚本 和也, 「IEEE802.11ac 準拠の機器におけるチャネルボンディング機能の性能評価」, IPSJ 論文誌デジタルプラクティス, Vol.2(2), pp. 99-113 (2021年4月).
- (6) “Iperf - Download iPerf3 and original iPerf pre-complied binaries,” <https://iperf.fr/iperf-download.php>
- (7) “TamoSoft CommView for WiFi,” <https://www.tamos.com/products/commwifi/>
- (8) “Network Simulator Version 3,” <https://www.nsnam.org/>