

2022WIDE 報告書 (SINDAN)

Tomohiro Ishihara

2023 年 1 月 4 日

1 はじめに

SINDAN (Simple Integrated Network Diagnosis And Notification) ワーキンググループは、ネットワーク運用におけるネットワーク状態の把握やその評価手法の研究開発を目的として 2017 年 7 月に設立された。前身となる SINDAN プロジェクトは、2013 年の WIDE 合宿における合宿ネットワーク評価に始まっており、これまでにネットワーク障害点を検出する手法として、ユーザ側からの観測を元に状態を評価する手法を取り上げ、その評価を重ねてきた。

2 2022 年度の活動

2022 年度は前年度に引き続き無線区間のネットワーク品質調査のため、1) 多数クライアントを利用した計測しすてむの 802.11ax 方式への対応と実測結果、および 2)802.11ax 環境における無線フレームキャプチャの有効性の検証をおこなった。加えて、3)SINDAN ノードを利用していた環境で実際に発見した障害について事例を紹介する。

3 実環境における 802.11ax および 802.11ac の性能調査

新型コロナウイルスの影響により、近年では授業のオンライン化、ハイブリッド化が進められているが、一方で感染状況が一定の落ち着きを見せるなかで対面授業の再開なども併せておこなわれている。そのような状況においては、さまざまなタイプの授業がキャンパスで提供されることとなり、対面授業の次の授業がオンラインなど、学校でオンライン授業を受ける状況も増加しつつある。学生は持ち込んだ端末によって授業を受講するため、大学の無線 LAN インフラを用いて授業の配信などの通信をおこなうこととなる。そのため、学内の無線 LAN インフラによる多数ユーザに対する安定的な接続性提供は不可欠となってきた。

キャンパス内の無線 LAN 整備については、授業上での軽い調べ物などに使うことを想定し、これまでは無線 LAN サービスのカバー範囲を重視しておこなわれてきたが、しかしながら、オンライン授業などの利用形態においては同時利用および個別通信の使用帯域が増大することが予想され、単純な接続性の担保だけでは要求を満たせない状況となっている。

そのため、筆者は多数の端末が接続した際のオンライン授業を含む通信品質についての調査をおこなってきた。多数の無線 LAN 端末が教室において同時に接続した場合を想定して、実際に多数の端末を教室内に配置し無線 LAN に接続した状態で zoom によるオンライン授業を配信し、それぞれの通信品質の調査をおこない

[6], またそのような無線 LAN 環境調査の効率化のため, 多数のシングルボードコンピュータと無線 LAN インターフェースを集積させた計測システムの開発および調査をおこなった [5]. 本システムはシングルボードコンピュータの Raspberry Pi 4B+ と, 802.11ac 方式の USB 無線 LAN ドングルを組み合わせたもので, 1 台の Raspberry Pi に複数の無線 LAN ドングルを取り付けることにより多数の無線クライアントをエミュレーションしている.

本システムを設計・開発した 2020 年から 2021 年前半の時点では, 802.11ax 方式を使用可能な基地局および端末はいくつか市場に出回っていたものの, 小型のシングルボードコンピュータに搭載できる無線インターフェースについては, 最初から内蔵されているものか, M.2 バスを経由した製品しかなく, 大規模利用環境のエミュレーションのため無線 LAN デバイスを集積をさせることが困難であった. 加えて, 当時は 802.11ax 対応のクライアント端末を使用するユーザも多くなかったことから, 802.11ac 対応の USB 無線 LAN ドングルを計測システムのコンポーネントとして採用していた.

その後, 2021 年末に 802.11ax 方式に対応した USB 接続の無線 LAN ドングルが各社から発売され始め, USB3.0 インターフェースを持つシングルボードコンピュータで 802.11ax インターフェースを使用することができるようになってきた. そこで本報告では, 先に開発した無線 LAN 計測システムの 802.11ax 方式への対応と, その計測システムを用いて実際の無線 LAN 環境である教室において 802.11ax 方式を旧来の 802.11ac 方式と比較した場合, および両者の方式が混在した場合について測定した結果について述べる.

3.1 計測システム

本研究では, 過去に開発をおこなった複数のシングルボードコンピュータおよび無線 LAN インターフェースによる無線 LAN 環境計測システムを用い, 当該システムに改修を加えることで 802.11ax に対応した計測を実現した. 本節では計測システムの概要と, 加えた改修について述べる.

3.1.1 シングルボードコンピュータを利用した無線 LAN 環境計測システム

本システムは計測システム全体の制御をおこなうマネージャーノードと, 計測を実施する複数の計測ノード, および帯域計測の対向側となる計測ターゲットからなる (図 1). マネージャーノードと計測ノードの間は管理用の有線プライベートネットワークで接続され, 計測ノードの設定, ノードへの計測命令の送信, および計測結果の受信はこの管理ネットワークを通じて行われる. 計測ターゲットは計測ノードが接続されているネットワークセグメントから双方向の通信が可能なネットワークセグメントに配置する.

本システムの計測は, シナリオ記述ファイルを元に実施する. シナリオ記述ファイルには, 計測ノードの無線設定, および個々の計測内容と実施する際のパラメータを記述し, マネージャーノードはこのシナリオ記述ファイルを読み込み, 各計測ノードのシステム設定ファイルを生成する. また, 記述ファイルで設定された計測パラメータに基づいた計測用のスクリプトを生成し, 生成したスクリプトファイルを計測ノードおよび計測ターゲットに配布し実行することで計測をおこなう.

3.2 802.11ax の概要

802.11ax 規格は 2020 年に標準化された無線 LAN 規格であるが, 標準化前のドラフト段階であった 2018 年ごろから対応機器が出荷され始めている. 以前の規格である 802.11ac からの主な変更点として, 下記が挙げられる.

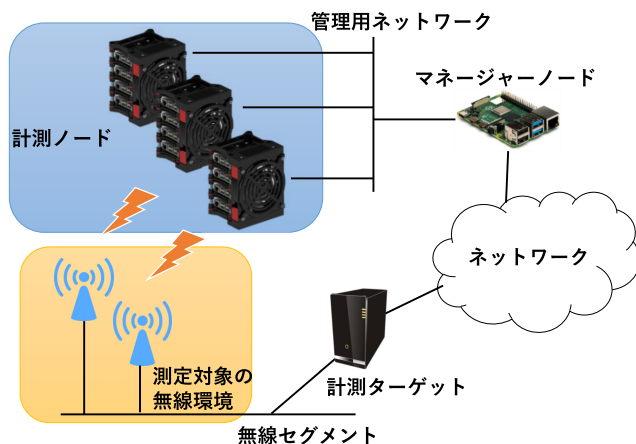


図1 システム概要図

- 上下トラフィックの MU-MIMO 対応
- OFDMA の採用

以下の節で下記の概要について述べる。

3.2.1 上下トラフィックの MU-MIMO 対応

802.11n 規格より、複数の送受信機およびアンテナにより、マルチパスによる空間多重技術を用いて、より多くの通信を行う MIMO(Multiple Input Multiple Output) 技術が導入されている。802.11n においては Single-User MIMO(SU-MIMO) と呼ばれる 1 つのステーションのみを対応にした MIMO 通信のみサポートされていたが、802.11ac より Multi-User MIMO という 1 台の基地局から複数のステーションに対して多重に送信する技術が導入されている。802.11ac で対応している MU-MIMO は基地局から下り方向のトラフィックに限定されていたが、802.11ax では上り方向、すなわち端末から基地局への通信についても MU-MIMO を使うことができ、より効率的な通信がおこなえる。

3.2.2 OFDMA の採用

802.11a 規格より、OFDM 方式が採用されており、直交した周波数を効率的に利用することで、より高密度に周波数多重がおこなうことができ、それにより通信速度の向上を実現している。OFDMA はこの直交したサブキャリアの管理をより細分化し、さらに高効率・高密度で通信を行うことができる。

これらの新たに採用された技術により、無線通信において空間と周波数帯をより効率的に使用することができるため、802.11ax 方式への移行により無線 LAN 環境のさらなる高速化・快適化が期待されている。

3.2.3 計測システムの 802.11ax 方式への対応

従来の計測システムは 802.11a/b/g/n/ac 方式にのみ対応していた。これは先述したように、開発をおこなった 2021 年前半の時点では USB 接続に対応した 802.11ax の無線 LAN 製品がなく、対応端末としては出荷時より内蔵されているタイプがほとんどであり、無線 LAN インターフェースを集積したシステムを構築することが困難であったためである。

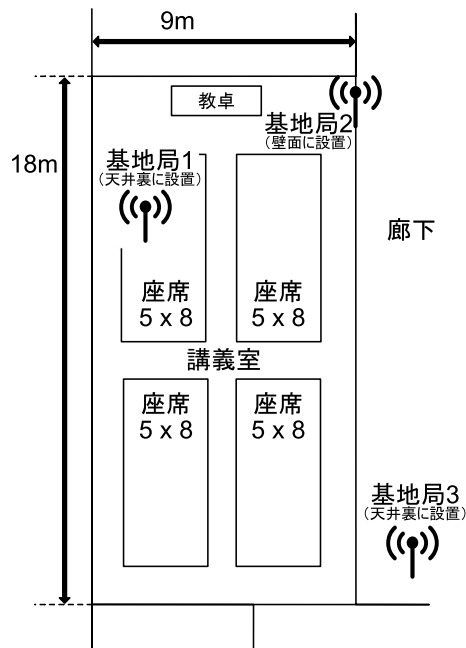


図2 計測に使用した教室

2021 年末に各社から USB3.0 接続による 802.11ax 規格対応の無線 LAN ドングルが発売された。Buffalo 社から発売された WI-U3-1200AX2 は無線 LAN チップとして Realtek 社の RTL8852au を採用しており、かつ当該チップは Linux 用ドライバが公開されていたため、こちらの製品を採用した。

また、Raspberry Pi 4B+ は USB3.0 と USB2.0 のポートをそれぞれ 2 個ずつ搭載しているが、従来のシステムで採用した無線 LAN ドングルは最大データ転送速度が 433Mbps であったため、バスの最大転送速度が 480Mbps である USB2.0 でも速度上は問題ないと判断し、USB2.0 ポートに dongle を接続する形としていた。しかしながら、WI-U3-1200AX2 の最大転送速度は 1201Mbps であるため、USB3.0 ポートに接続する必要がある。そのため、新たにセルフパワー対応の USB3.0 ハブを導入し、そちらを経由する形で無線 LAN ドングルを接続した。

3.3 実証実験・評価

本研究で提案した測定手法の評価と、802.11ax 方式によるパフォーマンス変化の評価のため、実際の無線 LAN 環境において測定実験をおこなった。

3.3.1 実験環境

大学のオンライン配信受講のために学生に開放されている部屋において、本研究で提案した測定方法を実装したシステムを用いて計測をおこなった。

部屋の概形は図 2 の通りである。当該部屋は室内に Aruba 製の AP-515 無線基地局と AP-514 無線基地局が 1 台ずつ設置されており、また廊下に AP-515 がもう一台設置されている。基地局は 802.11ax/ac に対応しており、チャンネルボンディングの帯域は 40MHz に設定されている。

表1 計測ノードのハードウェア構成

本体	Raspberry Pi 4B 8GB
OS	Ubuntu 20.04.3 LTS arm64/AArch64
無線 LAN	Buffalo 社製 WI-U3-1200AX2 * 5 802.11a/b/g/n/ac/ax 2.4GHz/5GHz 両対応 2x2 空間ストリーム対応 HT 160MHz 対応 最大速度 1201Mbps USB 3.0 接続対応
USB3.0 ハブ	Buffalo 社製 BSH4A110U3BK

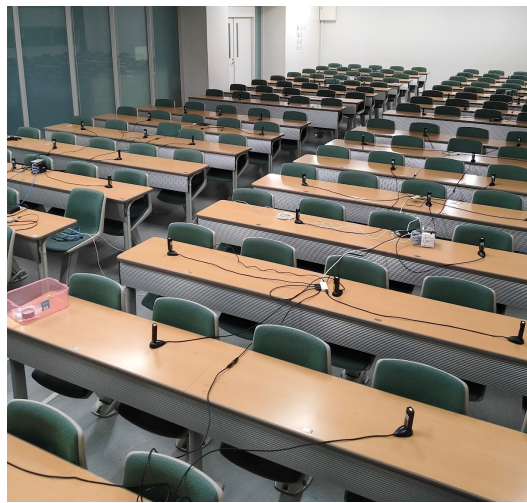


図3 教室での計測の様子

3.3.2 試験実装

実験に利用した Raspberry Pi および USB 無線 LAN インターフェースは表 2 の通りである。Raspberry Pi 1 台につき 5 個の無線 LAN インターフェースをもち、その Raspberry Pi を 16 台集積させてシステムを構成している。よって、無線 LAN インターフェースの数は合計で 80 個となる。

3.3.3 測定方法・測定パラメータ

測定にあたっては、教室に無線 LAN ドングルをそれぞれの着席位置にあたる机の上に配置した。無線 LAN ドングル同士が一様に分布するように、座席は 1 つずつ市松模様を描くように離して設置した。教室での設置状況の様子を図 3 に示す。

図 2 に示す通り、測定をおこなった教室は 3 つの基地局が存在しているため、設置した無線 LAN ドングルはこれらの基地局に分散して接続される。それぞれの端末の接続先 AP を無線 LAN コントローラ上の記録から割り出したものを図 4 に示す。無線 LAN コントローラの記録上の問題により、一部端末については接続先が不明となっているが、実験に利用した SSID はこれら 3 台の基地局からのみ出力しているため、3 台いずれ

1		2		2		2		1	
	1		2			2	2		2
		1		2			2		2
		2		2		1	2		2
		1		1			1	2	
	1		1			1		2	1
1		2		1			1		2
	1		1			1		1	1
1		1		1			1		1
	3		1			1		2	1
3		1		3					1
	3		1			1	1		1
3		3		1			1	1	1
						1		3	3
3		3		3			3		1
			1			3		3	3

図4 各端末の接続先 AP(最頻値)

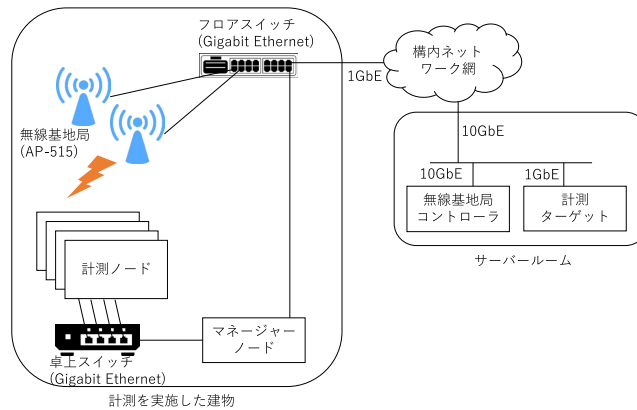


図5 計測時のネットワーク環境

かの基地局に接続されていたことは確認できている。また、多数のクライアントが1つの基地局に接続された場合の検証のため、接続先の基地局を1台に限定した場合でも実験をおこなった。このとき、図2の基地局2のみ実験用 SSID を有効にし、80 台すべての無線 LAN インターフェースを一台の基地局に接続した。基地局および無線 LAN コントローラ、計測ターゲットのネットワーク環境は図5の通りである。各無線基地局は無線 LAN コントローラを介して接続されており、基地局から無線 LAN コントローラ、および帯域測定をおこなう計測ターゲットまでは 1Gbps 以上の帯域が確保されている。

通信試験は iperf を利用しておこない、各無線 LAN インターフェースからそれぞれ iperf の測定クライアントから計測ターゲットまでの帯域を 80 台のインターフェースで同時に 30 秒間の帯域測定をおこなった。

また、802.11ac/802.11ax 方式の違いによる影響を調査するため、802.11ax 用および 802.11ac 用の接続先 SSID を別途用意し、それぞれの無線 LAN インターフェースが接続する先について、80:0, 64:16, 48:32, 32:48, 16:64, 0:80 とその比率を変化させて測定した。また無線方式による違いに加えて、MU-MIMO を無効化した場合についても併せて測定をおこなった。

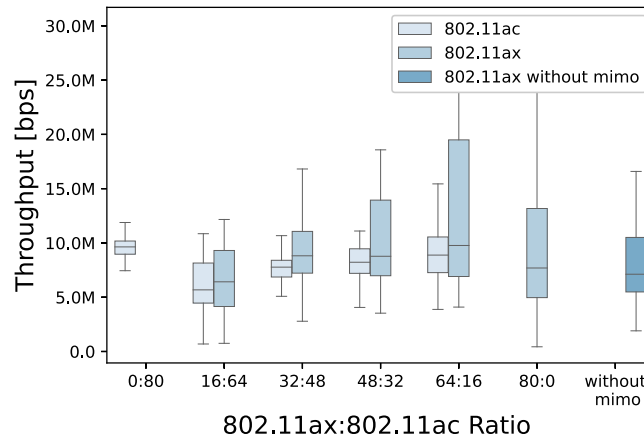


図6 基地局 3 台での通信試験

3.4 測定結果

測定結果を図 6, 図 7 に示す. 図 6 は 3 台の基地局に分散した状態での通信試験である. 802.11ax の端末を 80 台接続した場合においては, 802.11ac の端末を 80 台接続した場合に比べ, 一部の端末では 30Mbps に近い速度が出ているものの, 速度のばらつきが大きいことが観測されている. 一方で 802.11ac は速度のばらつきが少なく, ほとんどの端末が安定して 10Mbps 程度の帯域を確保できている. この状態に 802.11ax が加わった場合については, 802.11ax 端末の方が平均的には高い速度で通信し, 802.11ac 端末については 802.11ac 端末のみが存在する状態に比べて全体的に通信速度が減少する傾向がみられた. また, 802.11ax 接続において MIMO を無効化した場合には, 瞬間的な高い通信速度は出にくくなっているものの, 平均的な速度にはほとんど変化がなかった.

図 6 は 1 台の基地局に集中した状態での通信試験である. このような混雑した状況下においては, 802.11ax 端末の中に高いスループットが出ている端末があるものの, 全体的に 802.11ac 端末の方が速度が安定している傾向がみられ, また混在環境においては平均スループットも 802.11ac の方が良いという結果が見られた. 加えてこの状態では, MIMO を無効化したほうがかえってスループットが改善するという結果も得られた.

3.5 おわりに

本報告では, 従来のシングルボードコンピュータを用いた無線 LAN 環境測定システムの 802.11ax への対応と, 当該測定システムを用いて 802.11ac/802.11ax 方式の違いによる実無線 LAN 環境の影響について調査をおこなった. 本調査の結果では, 802.11ax 方式は最高速度については確かに向上するものの, 多人数環境における全体的な通信速度向上については限定的な効果しか見られなかった. 特に 1 台の基地局に対して 80 台の端末が接続されるような環境においては, 802.11ax を使うことの優位性は確認できなかった.

本計測はキャンパスに設置済みの特定の基地局についてのみおこなったものであるため, 基地局の種類によっては異なる結果が出る可能性もある. 今後は本計測システムを用いてさまざまな基地局および無線 LAN 環境の調査を継続して行っていく予定である.

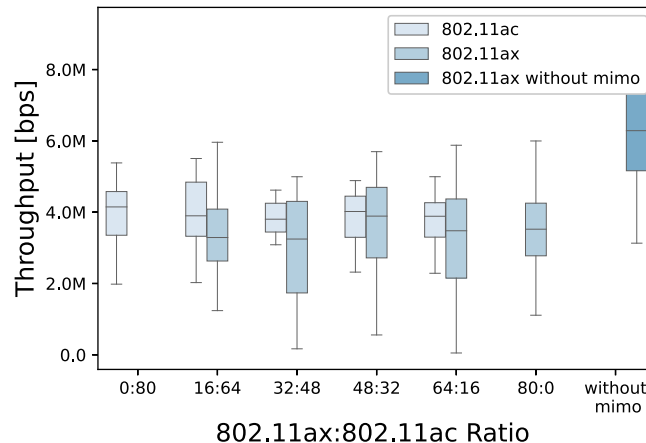


図7 基地局 1 台での通信試験

4 802.11ax 環境下における無線フレームキャプチャの検討

安定した無線 LAN 環境を提供するため、既存の無線 LAN 環境を測定する方法がいくつか提案されている。その一つに無線フレームキャプチャを使用した無線 LAN 環境の測定手法がある。いくつかの無線 LAN デバイスには無線フレームをその宛先に関わらず取得する無線 LAN モニター機能が備わっており、本機構を用いて空間上で通信されている無線フレームを取得・解析することで無線 LAN の混在度合いなどを推定することができる。

無線フレームキャプチャを用いた手法は過去にいくつか研究がおこなわれており、また、それを利用した製品も存在する。例えば、metageek 社が開発している Eye P.A. *1という無線フレーム解析ソフトは、キャプチャした無線フレームを解析し、その情報を元に空間上に占める無線フレームの割合などを算出することで空間上の無線 LAN の混雑度や問題を発見することができる。

以上のように、無線フレームキャプチャは無線 LAN 環境の調査をおこなう上で強力なツールとして利用されている。しかしながら、近年の無線 LAN 規格では通信の高速化を目的として Multiple Input Multiple Output (MIMO) をはじめとした、空間上を多重に分割して利用する方式が導入されており、「2.6 無線フレームキャプチャに与える影響」で説明するように、無線通信が空間上で測定可能状態でおこなわれることを前提としている無線フレームキャプチャが困難になっていることが予想される。

そこで本研究では、現時点での最新の Wi-Fi 規格である 802.11ax において MIMO を用いた通信を行った際の無線フレームキャプチャについて、実験計測を実施してその評価および考察をおこなった。

4.1 802.11 規格の変遷と既存研究

最初の 802.11 無線 LAN 規格は 1997 年に策定され、当時の通信速度は最大で 2Mbps であった。その後 OFDM の採用、チャンネルボンディング、MIMO の利用などを経て最大速度は飛躍的に増加し、現在の仕様上の最高速度は 9.63Gbps となっている。下記にそれぞれの採用技術について概要を示す。

*1 <https://www.metageek.com/eye-pa/>

4.1.1 Multiple Input Multiple Output(MIMO)

802.11n 規格より，複数の送受信機およびアンテナを用いて，マルチパスによる空間多重技術を用いて，より多くの通信を行う Multiple Input Multiple Output(MIMO) 技術が導入されている。

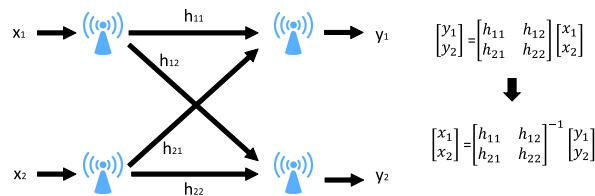


図8 MIMO の動作原理

MIMO の動作原理について図 8 に示す。左側の 2 台の送信機よりそれぞれ送出する信号を x_1, x_2 ，右側の 2 台の受信機で受け取った信号を y_1, y_2 とする。このとき，受信する信号はそれぞれ送信機 2 台より送出した信号の合成となる。個々のアンテナ間における伝送路の伝送チャネル係数をそれぞれ $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ とすると，受信側で観測される信号は

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となり，伝送チャネル係数の逆行列を取ることで，受信側の信号 y_1, y_2 をもとに元の信号 x_1, x_2 を導出することができる。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

すなわち，既知のパイロット信号を用いた計測により伝送チャネル行列を導出することで，多重に送られた信号 x_1, x_2 を受信側で分離することができ，空間上に信号を多重に送ることが可能となる。

4.1.2 MU-MIMO

802.11n においては，Single-User MIMO(SU-MIMO) と呼ばれる 1 つの無線クライアントのみを対応にした MIMO 通信のみサポートされていたが，802.11ac より Multi-User MIMO(MU-MIMO) という 1 台の基地局から複数のステーションに対して多重に送信する技術が導入されている。これは，基地局が持つ複数の受信機・送信機およびアンテナについて，個々の無線クライアントの受信機・アンテナに別々に割り当て同時に通信を行う方式である。さらに，802.11ac で対応している MU-MIMO は基地局から下り方向のトラフィックに限定されていたが，802.11ax では上り方向，すなわち端末から基地局への通信についても MU-MIMO を使うことができ，より効率的な通信がおこなえる。

4.1.3 ビームフォーミング

MU-MIMO で通信を行う場合，各無線クライアントは自分が通信に使用している無線ストリームの伝送チャネル係数についての情報しか持っていないため，複数クライアントで空間に多重に通信を行った際に，自分以外の無線クライアントに向けて行われた通信の信号は干渉波となってしまう，自身への通信に影響を及ぼす。そのため，通信が他の無線クライアントに与える影響を軽減するため，ビームフォーミングが行われる。

ビームフォーミングは複数の送信機から信号を送出する際に、それぞれの出力にウエイトをかけることで、ターゲットとなる無線クライアント以外のクライアントに対して干渉波が打ち消しあわせることで特定の信号について電波の指向性を作り出す方式である。適切なビームフォーミングをおこなうことで、MU-MIMO で通信を行う際他クライアントに対する無線ストリームによる干渉をなくすことが可能となる。MU-MIMO およびビームフォーミングを実施する場合には、送信側がクライアントの受信機・アンテナに対する伝送チャネル係数を知る必要がある。そのため、送信側からのパイロット信号の計測結果について、受信側から送信側にフィードバックを行い、送信側は個々の無線クライアントに対する伝送チャネル係数の情報を個別に管理し、それに基づき適切なウエイトをかけて送信することが求められる。

4.1.4 OFDM/OFDMA

802.11a 規格より、OFDM 方式が採用されている。OFDM は使用する帯域内に複数の直交したサブキャリアを隣接させ配置し、周波数を効率的に利用することで、より高密度に周波数多重がおこなうことができ、それにより通信速度の向上を実現している。各サブキャリアの 1 次変調には直交振幅変調 (QAM) が利用されている。最新の 802.11ax 規格において最も高効率な方式としては 1024QAM が利用でき、1 シンボルごとに送信することができる情報の増加をおこなっている。また、OFDMA では同一信号内のサブキャリアについて、無線クライアントをまたぐ形で利用することができるように管理を細分化し、さらに高効率・高密度な通信を実現している。

4.1.5 チャンネルボンディング

OFDM を利用する無線方式は 1 チャンネルごとに 20MHz の帯域を利用しているが、チャンネルボンディングはこのチャンネル帯域を複数同時に使うことにより通信速度の向上をおこなっている。現在の 802.11ax 規格では、20,40,80,160MHz の帯域と、不連続の 80MHz の帯域を 2 つ使用する 80+80MHz のチャンネルボンディングをおこなうことができる。

4.1.6 先行研究

無線 LAN 環境の計測はさまざまなアプローチでの先行研究があり、一般的な手法としては測定対象の無線 LAN 環境で通信スループットを計測することが挙げられ、無線 LAN 環境の評価を、特に新しい 802.11ax および MU-MIMO を採用した環境において計測する試みが多く行われている [3][2][4]。

スループット計測以外のアプローチとしては、無線フレームキャプチャを用いた無線 LAN の環境調査についていくつかの提案がおこなわれている。[7] および [8] では、端末が定期的送信する NFDF フレームをキャプチャし、その再送率に着目することで無線 LAN 環境の混雑度合いの推定をおこなっている。また、商用製品としては、metageek 社の Eye P.A.[1] がある。Eye P.A. は無線フレームキャプチャをおこない、各フレームに記載されている占有時間などから全体に対するそれぞれの通信フレームが占める割合を算出し、混雑度の推定をおこなっている。

いずれの方式も空間上を流れる無線フレームが確実に取得できることを前提としており、MU-MIMO などの影響によりキャプチャできる無線フレームに制限が出ていた場合、その推定結果に大きな誤差が発生しうることが予測される。

4.1.7 無線フレームキャプチャに与える影響

前述のように、近年の無線 LAN 規格は下記の要素により大幅な速度向上を実現している。

1. OFDM/OFDMA による周波数帯域の高効率利用
2. チャンネルボンディングによる広帯域の周波数利用
3. MIMO による空間多重化

そのため、無線フレームキャプチャを行う場合にも、これらの高速化に対応した形で実施する必要がある。1, 2 については、同一の無線 LAN 規格に対応したチップセットを使用することで、広帯域・高効率の信号のキャプチャを実現している。しかしながら、3 の MIMO、特に MU-MIMO の場合には、特定の無線 LAN 環境の無線フレームキャプチャをするためには原理的に最低でも送信側が対応する空間ストリーム数と同数の受信機・アンテナが必要となる。現在の多くの無線キャプチャが可能な無線 LAN デバイスは 2x2 MIMO までの対応となり、それ以上の空間ストリームに対応した基地局が存在する場合は無線デバイス 2 台以上でキャプチャする必要がある。しかしながら、MU-MIMO では複数の無線クライアントごとに伝送チャンネル係数を管理し、動的にウエイトを変更させながら送信する。そのため、無線クライアントがもつ受信機・アンテナの総数が送信側よりも多い場合、例えば、4x4 MIMO 対応の基地局が存在する際に、2x2 MIMO の無線クライアントが 3 台以上接続されている場合などでは、それぞれの無線クライアントごとに排他的に送信機・アンテナを割り当てることができず、基地局側でスケジューリングを行い動的に送信機・アンテナを割り当てることとなる。そのため、複数の無線デバイスによりフレームキャプチャした場合でも、空間多重に送信された信号をお互いに重ならない形で分担して取得することは困難となる。また、MU-MIMO においてはビームフォーミングが行われ、送信対象の無線クライアントに対して指向性のある信号で送信されるため、実空間上で離れた場所にある無線 LAN キャプチャデバイス上では対象となる信号が観測できない可能性がある。

以上のことから、従来の無線フレームキャプチャを利用した無線 LAN 混雑度の推定をする場合に、最新の MU-MIMO を利用した環境においては、実空間上に（多重に）送信されている無線フレームの一部しかキャプチャすることができず、混雑度について誤った推定をする可能性がある。そこで本報告では、実際に 802.11ax の MU-MIMO を利用している環境において複数キャプチャデバイスにより無線 LAN フレームキャプチャを実施し、当該環境下で実際に行った通信内容と比較することで、全体に対してどの程度のフレーム取得が可能であるか測定をおこなった結果について示す。

4.2 無線フレームキャプチャ実験

実無線環境での無線フレームキャプチャの効果を調査するため、図 9 で示す環境でキャプチャ試験をおこなった。802.11ax の無線基地局を配置し、そこから各 30° の角度を空けて離れた場所に 802.11ax 無線 LAN クライアントを 3 台配置した (1,2,3)。また、無線 LAN クライアント 1 および 3 の延長線上に 802.11ax 無線モニターノード A および B を配置した。各 802.11ax 無線 LAN クライアントは無線基地局と無線経由で接続をし、無線基地局の先に接続している計測ノードと通信をおこなう。また同時に、802.11ax 無線モニターノードは基地局が提供しているチャンネルに対して無線フレームキャプチャをおこなう。

無線 LAN クライアントの同時通信台数、および利用帯域を変えつつ接続し、iperf3 を用いて計測ノードから各無線 LAN クライアントへ、すなわち基地局から見て下り方向へトラフィックを TCP を用いて 10 秒間印加し、印加した。その環境において、無線モニターノードでフレームキャプチャを実施し、印加した通信のうちどの程度の通信が無線フレームキャプチャで取得可能であったか記録をおこなった。

通信量については、アプリケーションレイヤの通信量は iperf3 の計測結果から算出している。また、無線フレームキャプチャでの通信量は無線クライアントのインターフェースにおいて MTU 最大でパケットを送

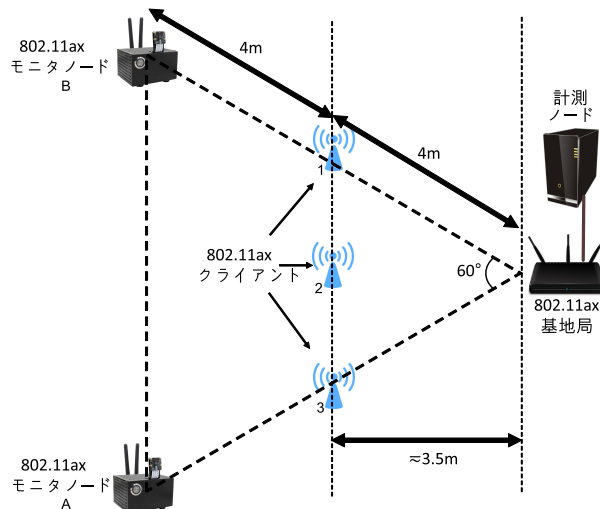


図9 実験環境

信したときの TCP ペイロードのサイズで算出した。通信の大部分は IP レイヤで観測した場合には Ether ヘッダ含めて 1518 バイト、無線フレームキャプチャでは 3164 バイトのフレームから構成されており、これは A-MPDU を利用して 2 個の 1518 バイトのイーサネットフレームを合成して無線レイヤで送信する場合のサイズとなる。その前提のもとに、無線フレームキャプチャでの TCP ペイロードのサイズを算出している。

802.11 の通信においては、各無線フレームの到達確認をおこなっており、受信側からの ack が無い場合には無線レイヤでの再送をおこなう。そのため、無線レイヤ上でキャプチャできる通信は TCP レイヤで観測される実際におこなわれた通信より多くのフレームをキャプチャできる可能性がある。その影響を除去するため、取得したフレームのうち、再送フラグが立っているフレームを除いたものだけ集計をおこなった。

4.2.1 計測に利用した機器の構成

実験に利用した機器と、無線接続の設定は表 2 のとおりである。

4.3 測定結果

図 10, 11, 12 に、それぞれ 802.11ax 無線 LAN クライアントを 1 台、2 台、3 台同時に通信させた場合の実際の通信量とキャプチャできた通信量の bps 換算での比較を示す。

図 10 は、1 台の無線 LAN クライアント (2) のみでの通信をそれぞれ使用帯域 20MHz, 80MHz で接続した場合についての結果である。802.11ax の規格では、20MHz の帯域で通信を行った場合、MCS (Modulation and coding scheme) インデックス 11 では 1 空間ストリームで最大約 143Mbps, 2 空間ストリームで最大約 287Mbps の通信が可能となる。計測された実際の通信量は 200Mbps を上回っているため、少なくとも 20MHz での通信は 2 空間ストリームの MIMO を利用しておこなっていると推定できる。無線 LAN クライアントが 1 台だけであった場合には、使用帯域が 20MHz, 80MHz にかかわらず、A, B それぞれのモニタノードではほぼすべての通信をキャプチャできている。

図 11 は、2 台の無線 LAN クライアント (1, 3) で同時に通信を行った場合の結果である。実際の通信量に比

表2 計測ノードのハードウェア構成

無線 LAN クライアント	Raspberry Pi 4B 8GB Ubuntu 20.04.3 LTS arm64/AArch64
無線インターフェース	Buffalo WI-U3-1200AX2 802.11a/b/g/n/ac/ax 2.4GHz/5GHz 2x2 MIMO 対応 HT 160MHz 対応 公称最大速度 1201Mbps USB 3.0 接続対応
モニタノード	Jetson Nano 2GB Ubuntu 20.04.3 LTS arm64/AArch64
キャプチャデバイス	Intel AX200 802.11a/b/g/n/ac/ax 2.4GHz/5GHz 2x2 MIMO 対応 HT 160MHz 対応 公称最大速度 1201Mbps m.2 バス接続
無線基地局	TP-Link AX73 802.11a/b/g/n/ac/ax 2.4GHz/5GHz 4x4 MIMO 対応 OFDMA 対応 ビームフォーミング対応 HT 160MHz 対応 公称最大速度 4803Mbps

べて、無線フレームキャプチャで取得できた通信量が著しく低くなっている。また、クライアント 1, 3 のそれぞれの通信について、常にモニタノード B の方が取得量が少なくなっている。加えて、2 台の実際の通信量の合計は 1 台のみで通信した場合と大きく違いはない。

図 12 は、3 台の無線 LAN クライアント (1,2,3) で同時に通信を行った場合の結果である。2 台の無線 LAN クライアントで通信した場合よりさらに取得率は悪化しており、また、無線フレームキャプチャの取得率について、モニタノードの位置による大きな違いは見られなかった。また、3 台の実際の通信量の合計は 1 台のみで通信した場合と大きく違いはない。

4.4 考察

本実験より、以下のことがわかった。

1. 1 台の無線クライアントのみで通信を行う場合には、そのクライアントが SU-MIMO をしていたとしても、ほぼ落とさずに無線フレームキャプチャをおこなうことができる。また、チャンネルボンディング

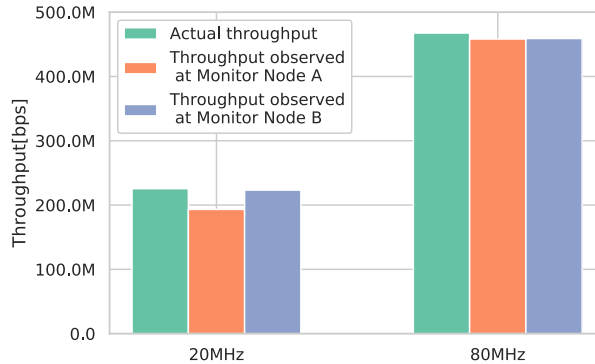


図10 無線クライアント1台(2)での計測(20/80MHz)

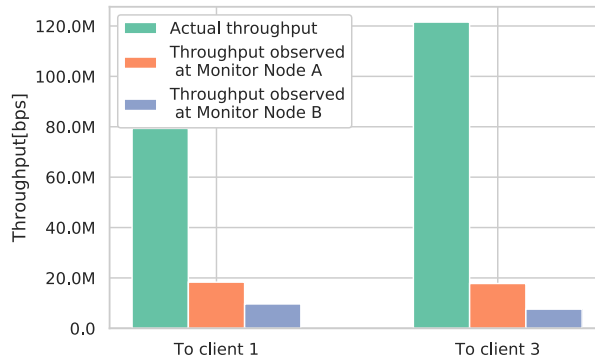


図11 無線クライアント2台(1,3)での計測(20MHz)

- をおこない使用帯域を増加させた場合でも、少なくとも 80MHz までは問題なく取得できる。
- 2台のクライアントで同時に通信を行った場合、実際の通信量が1台のクライアントでの通信量と大差ない場合でも無線フレームキャプチャができる通信量は大きく低下する。また、クライアントを3台に増やした場合にはフレームキャプチャ取得率がさらに低下した。
 - MU-MIMO 環境においては、同時に利用される空間ストリームは個々のモニタノードが受信可能な空間ストリームを上回る場合があるため、全てのフレームを取得することは原理的に不可能である。しかしながら、本計測結果は各モニタノードが持つ受信機・アンテナの数と利用される空間ストリームとの比（例えば、4x4MIMO が使われている場合に、2x2MIMO 対応のモニタノードでキャプチャした場合には 1/2）よりさらに少ない量しか取得できない。
 - 複数クライアントで通信していた場合、キャプチャできる通信についてモニタノードと通信している対象との物理的な位置関係、例えば実際の通信を受けているノードに近接していること、およびビームフォーミングをした際の指向性の延長線上にあることによる顕著な違いは見られなかった。

以上のことから、802.11ac/802.11ax における MU-MIMO を利用する無線 LAN 環境においては、複数クライアントが同時に通信をした場合に、実際の通信量に比べて、無線フレームキャプチャで取得できるフレーム数は大きく低くなることがわかった。キャプチャした無線フレームの情報を元に個々のフレームの周波数帯および時間の占有度の情報から無線 LAN 環境の混雑度を推定した場合には、実際の混雑度より低い値が算出



図12 無線クライアント3台(1,2,3)での計測(20MHz)

されることとなる。加えて、モニタノードのキャプチャ量の位置依存性がほとんど見られず、かつ受信機およびアンテナの数による取得限界を大きく下回る量しか取得できないため、複数のモニタノードの設置により取得量をカバーすることも困難である。

4.5 まとめ

本研究では、現在の 802.11ax を用いた無線 LAN 環境における、無線フレームキャプチャの有効性を調べるため、MIMO を利用した通信のフレームキャプチャを行い実際の通信量の比較をおこなった。その結果、802.11ax の MU-MIMO 環境における無線フレームキャプチャは、本来の通信量よりかなり少ない量しか取得することができないことがわかった。そのため、従来の Single Out Single Input(SISO)、ないし SU-MIMO の通信を前提とした無線フレームキャプチャによる無線 LAN 環境の測定は、現在の MU-MIMO の環境にそのまま適用することは難しいと予測される。

今後、無線 LAN フレームキャプチャを用いた無線 LAN 環境推定を行う場合には、

- MU-MIMO に適応した無線フレームキャプチャ手法
- 取得量が実際より低いことを前提としたサンプリングによる計測結果の重みづけ

などの方法により適応することが可能であると考えている。今後はこれらの解決法について継続して検討および開発をおこなっていく。

5 東工大 IPv6 トラブル時の解析

東京工業大学（以下、東工大）において、2022 年 10 月頃、IPv6 通信ができない場合があるとの報告を利用者から受けた。東工大では、IPv6 PI アドレス (2403:4440::/32) を運用しており、SINET および WIDE プロジェクト等と BGP によるマルチホーム接続形態を取っている。今回は、Google への接続において IPv4 へのフォールバック現象が発生し、利用に際して接続に時間がかかるとの指摘であったが、この現象は常に発生するものではなく、時々といった原因特定が困難なものであった。

東工大 NOC において経路設定等を調査したが、Google へのは SINET を経由しての到達性があり、ping による疎通もパケットロスが発生する状況ではないことが確認できた。ただ、この状況においても、Web 接続

時などでセッション開始に時間がかかる場合が時々発生しており、トラブル解決に至っていない状態が継続した。

そこで、SINDAN ノードを東工大内に有線で設置し、対外接続環境のモニタリングを開始した。SINDAN ノードで計測した時系列データグラフを図 13と図 14にそれぞれ示す。グラフは上から「iNonius speedtest によるスループット (Mbps)」「inonius.net に対するポートスキャン (1: 成功, 0: 失敗)」「Google パブリック DNS サーバへの通信遅延 (msec)」「Google パブリック DNS を用いた名前解決時間 (msec)」となっている。Google パブリック DNS サーバへ通信遅延や名前解決時間、iNonius speedtest によるスループット計測では問題が見受けられなかったが、inonius.net に対するポートスキャンにおいてタイムアウトが発生するケースが観測できた (図 14二段目のグラフ前半を参照)。他にもパブリック DNS サーバへの名前引きが失敗するケースも確認されたが、規則性が見出せず、経路のどの部分での問題なのか特定することが困難なままであった。

問題の切り分けを実施するために、Google との通信を SINET 経由から ISP 経由に切り替えて比較評価することを計画し、その接続作業を進めていた。ところが、比較評価を実施する前に、今回のトラブルが解消することとなった。SINDAN による計測データを確認すると、2022 年 11 月 20 日の午前 0 時を境にポートスキャンのエラーが発生していないことが分かり (図 14二段目のグラフ中程を参照)、利用者からもストレスなく Google を利用できるようになったとの報告も受けている。

原因を特定するために、SINET に対して当該日時におけるネットワーク作業を確認したところ、東京 DC における対外接続点 (東京ゲートウェイ) の定期メンテナンスが実施され、機器の再起動があったことが分かった。トラブルが発生していた際に機器の状態を確認できれば、さらに詳しい原因を特定できた可能性があるが、今回はメンテナンスにより問題解決となったため、根本原因を特定するには至らなかった。

今回の事案では、SINDAN による定常的なモニタリングにより、問題が発生していることを定量的に示すことができたが、発生箇所の特定制および原因を推定することに至らず、今後の研究課題として扱う必要があると考えられる。的確な障害点推定を可能とするため、多くの拠点において、このような障害時の計測データを収集・解析することを継続したいと考えている。



図13 IPv4 の計測データ (2022.11.19 19:00 - 11.20 05:00)

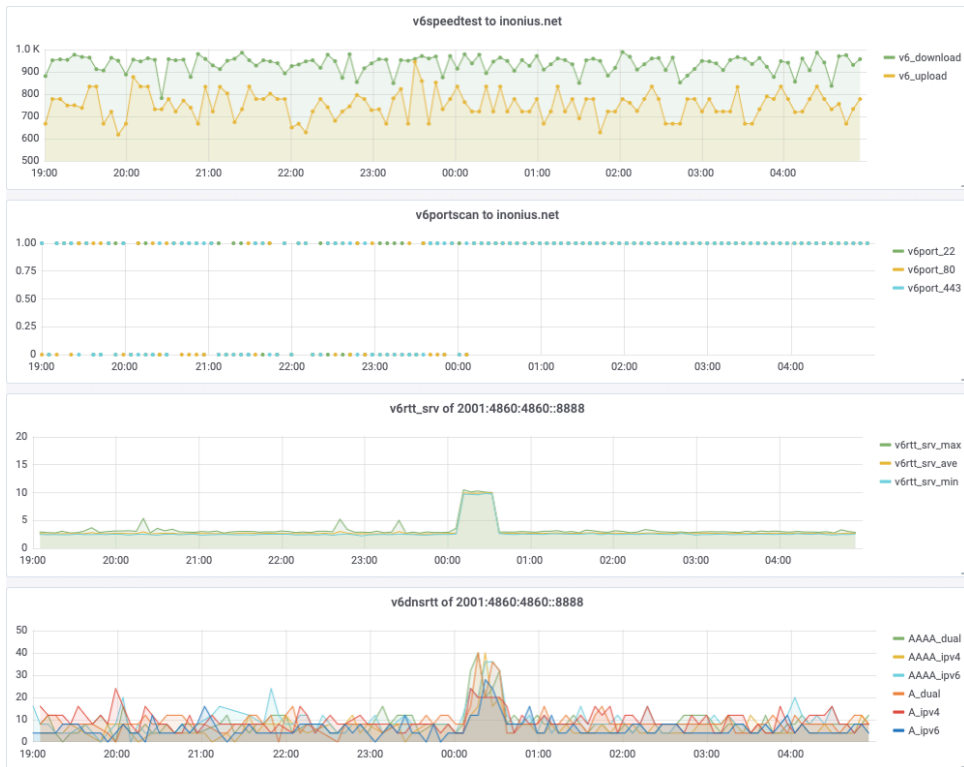


図14 IPv6 の計測データ (2022.11.19 19:00 - 11.20 05:00)

6 参考文献

参考文献

- [1] Eye p.a. <https://www.metageek.com/eye-pa/>. (Accessed on 09/07/2022).
- [2] Fabián Frommel, Germán Capdehourat, and Benigno Rodríguez. Performance analysis of wi-fi networks based on ieee 802.11ax and the coexistence with legacy ieee 802.11n standard. In *2021 IEEE URUCON*, pages 492–495, 2021.
- [3] Yutaka Fukuda, Takuji Hatase, Akihiro Satoh, Yutaka Nakamura, and Sujiro Wada. Characterizing the basic performance of ieee 802.11ax using actual hardware measurements. In *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, pages 1–4, 2022.
- [4] Yein Heo, Jonggyu Jang, Yeongjun Kim, and Hyun Jong Yang. Performance comparison of su- and mu-mimo in 802.11ax: Delay and throughput. In *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pages 879–882, 2020.
- [5] 石原知洋, 北口善明, 阿部博, and 金子直矢. Iot コンピューティングデバイスを用いた低コストな無線 lan 環境計測システム. 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (*TDP*), 2(3):1–10, jul 2021.
- [6] 石原知洋, 四本裕子, 角野浩史, 玉造潤史, 中村遼, 小川剛史, 相田仁, and 工藤知宏. 教室におけるオンライン講義受講のための無線接続環境評価. 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (*TDP*), 3(3):66–76, jul 2022.
- [7] 小清水郁 and 上岡英史. 無線 lan の mac 層情報を用いたスループット推定方式 (モバイル/放送融合アプリケーション, モバイルコンテンツ, モバイル映像配信, 一般). 映像情報メディア学会技術報告, 33.36:27–32, 2009.
- [8] 新谷隆文 and 前田香織. 無線 lan の通信品質推定における mac 層情報の有効性調査. 情報処理学会論文誌, 58(3):664–671, 03 2017.