

屋内事務所環境における IEEE802.11ac 規約の下り回線 マルチユーザ MIMO のスループット測定実験

松戸 孝[†] 山下 聖太郎^{††} 丸田 竜一^{†††} 宇都宮 光之^{†‡}
田中 政満[‡] 大石 太郎^{‡‡} 力石 靖^{‡‡‡} 植谷 昌博^{†††}

† ネットワンシステムズ株式会社 ビジネス推進本部 第 1 応用技術部 第 1 チーム
†† 第 2 応用技術部 サービス共通基盤チーム, ††† 第 3 応用技術部 第 4 チーム
‡ 第 2 応用技術部 ソフトウェア開発チーム, ‡‡ 第 3 応用技術部 第 1 チーム
‡‡‡ 第 3 応用技術部 第 2 チーム
‡‡‡‡ カスタマーサービス本部 エキスパートオペレーション部 第 2 チーム
†, †††, ‡, ‡‡, ‡‡‡ 〒140-8621 東京都品川区東品川 2-2-4 天王洲ファーストタワー
††, †‡ 〒100-7024 東京都千代田区丸の内 2-7-2 JP タワー

あらまし 屋内事務所環境において無線 LAN アクセスポイント(AP)1 台と無線端末 2 台を用いて IEEE802.11ac 規約の下り回線(DL)マルチユーザ(MU)MIMO のスループット測定実験を実施した。無線端末 2 台は AP のアンテナに対して同じ方向に存在する場合と 90 度離れた方向にある場合の各配置で測定した。また AP の 4 つの外付けアンテナは水平面内で、四角形の頂点に配置した場合と直線一列に配置した場合の各配置で測定した。MU 伝送を可能とするために AP の MU 設定を ON した場合であっても、MU 伝送とシングルユーザ伝送の各状況が混在することが通常であると判明した。MU 伝送の時間長 (Airtime) の平均値が大きくても、大きい MCSIndex の出現頻度が少ない場合には、MU 伝送のシステムスループットは大きくはならない状況があることも判明した。

キーワード IEEE802.11ac, 下り回線, マルチユーザ MIMO, スループット, Airtime, MCSIndex, アンテナ配置

Throughput Measurement to Evaluate Performance of Downlink Multi-User MIMO in IEEE 802.11ac Wireless LAN in an Indoor Office Environment

Takashi MATSUDO[†] Seitaro YAMASHITA^{††} Ryuichi MARUTA[‡] Mitsuyuki UTSUNOMIYA^{††}
Masamitsu TANAKA[‡] Taro OISHI[‡] Yasushi CHIKARAISHI^{‡‡} and Masahiro UETANI[‡]

† Applied Technology Engineering Department 1, Business Development Division,
NetOneSystems Co., Ltd.

†† Applied Technology Engineering Department 2, Business Development Division

‡ Applied Technology Engineering Department 3, Business Development Division

‡‡ Expert Operation Department, Customer Service Division

†, ‡, ‡‡ Tennoz First Tower, 2-2-4 Higashi Shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-8621 Japan

†† JP TOWER, 2-7-2 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-7024 Japan

Abstract We measured throughput to evaluate performance of downlink multi-user MIMO(DL-MU-MIMO) in IEEE 802.11ac wireless LAN in an indoor office environment. We had two scenarios to locate two mobile devices and a wireless LAN access point(AP) in a horizontal plane. In the first scenario, the devices were the same direction seen from the AP's position. In the second scenario, the devices had an angular distance of 90 degrees seen from the AP's position. We had also two scenarios for an array antenna with the AP comprised of 4 elements. The scenarios are 4-square arrays and linear arrays. We confirmed that transmission time for both MU and single-user was mixing in the operation of DL-MU-MIMO.

Keyword IEEE802.11ac, Downlink, Multi-user MIMO, Throughput, Airtime, MCSIndex, Antenna array

1. はじめに

2013 年末に策定が完了した IEEE802.11ac 規約(以下 11ac と記載する)[1],[2]に対応する 5GHz 帯の無線 LAN アクセスポイント(以下 AP と記載する)の導入が企業向けの屋内事務所環境に進んでいる。11ac では(11ac の完成版, 11ac Wave2 と呼称される場合もあり),新たに,5GHz 帯において下り回線マルチユーザ MIMO(以下 DL-MU-MIMO と記載する)という高度な技術がオプションとして採用された。DL-MU-MIMO とは,親局である 1 つの AP から子局である無線端末への下り回線において,同じ周波数チャネルを使っても同時に複数の無線端末(マルチユーザ(以下 MU と記載する))への伝送を可能とする技術である。当然に,AP と無線端末の両方において 11ac の DL-MU-MIMO に対応する必要がある。

一方,11ac より古い規約(IEEE802.11n, 11a, 11g, 11b, 11, 及び 11ac 草案(11ac Wave1 と呼称される場合もあり)の各規約)における通信は,シングルユーザ(以下 SU と記載する)の通信である。つまり,1 つの AP から無線端末への下り回線において複数の無線端末と通信する場合には,1 つの周波数チャネルのある瞬間においては,1 つの無線端末への伝送だけであり,同時に複数の無線端末への伝送は不可能である。

従って,SU の通信に比べて,DL-MU-MIMO の通信は,1 つの AP におけるシステムスループット(複数の無線端末への伝送の合計のスループット)の増大を期待できる。

本稿では,屋内事務所環境において,11ac の DL-MU-MIMO に対応した市販製品(1 台の親局(AP):シスコシステムズ社製 AP2802E,及び 2 台の子局(無線端末):Google と LG エレクトロニクスの両社による共同開発の Nexus5X)を使用することによって,SU の通信に比べて,DL-MU-MIMO の通信では,1 つの AP におけるシステムスループット(2 台の無線端末への伝送の合計のスループット)の増大がどの程度であるかを,実験的に検証した。その際,無線端末 2 台は水平面内で,AP のアンテナに対して同じ方向に存在する場合と 90 度離れた方向にある場合の各配置で測定した。また,実験時には AP2802E の 4 つのアンテナの配置は,水平面内で四角形の頂点に配置した場合(AP2802E における一般的な利用方法)と,水平面内で直線一列に配置した場合の 2 種類を採用して,1 つの AP におけるシステムスループットに違いがどうかとも実験的に検証した。第 2 章では,実験の内容(実験方法等)を示す。第 3 章では,MU 伝送の下り回線のシステムスループットの実験結果を,MU と SU の各伝送を比較した場合,また,AP 側のアンテナ配置を変えた場合について示す。第 4 章では,実験結果について考察する。

下り回線のシステムスループットの視点に加えて,MU と SU の各伝送時間(Airtime)の視点にも着目して考察する。

2. 実験の内容

2.1. 実験目的

(1)屋内事務所環境において,11ac の DL-MU-MIMO に対応した市販製品(親局(AP):シスコシステムズ社製 AP2802E,及び,子局(無線端末):Google と LG エレクトロニクスの両社による共同開発の Nexus5X)を使用することによって,SU の通信に比べて,DL-MU-MIMO の通信では,1 つの AP におけるシステムスループット(2 台の無線端末への伝送の合計のスループット)の増大がどの程度であるかを,実験的に検証する。

(2)実験時には AP2802E の 4 つのアンテナの配置は,水平面内で四角形の頂点に配置した場合(AP2802E における一般的な利用方法)と,水平面内で直線一列に配置した場合の 2 種類を採用して,1 つの AP におけるシステムスループットに違いがどうかとも実験的に検証する。

(3)実験時には無線端末の 2 台の配置は,水平面内で AP のアンテナに対して同じ方向に存在する場合と 90 度離れた方向にある場合の 2 種類を採用して,1 つの AP におけるシステムスループットに違いがどうかとも実験的に検証する。

2.2. 実験方法

(1) 実験システムの構成

図 1 に実験システムの構成を,表 1 に実験での測定諸元を示す。4 本の外付けアンテナ(利得 4dBi のダイポールアンテナ)を接続した AP2802E は,無線 LAN コントローラ(CT2504)によって,DL-MU-MIMO の設定が ON になっている(なお,同設定を OFF に変更すると SU 伝送だけになる)。この状況において,AP2802E から 2 台の無線端末 Nexus5X への下り回線において iperf(スループット測定ソフトウェア)を利用して TCP での 1 秒間毎のスループット測定を連続に実施した。2 台の無線端末が iperf のサーバ側になり,1 台の設定・情報表示用 PC が iperf のクライアント側になる。2 台の無線端末(iperf のサーバ側)では異なるポート番号を設定することによって,1 台の設定・情報表示用 PC(iperf のクライアント側)からスループット測定を実施した。

本実験は,屋内事務所環境において実施した。約 13m × 約 25m の広さのフロアに机,座席,及び什器等が配置されている一般的な事務所環境である。事務所内の天井と床面との距離は 2.51m であり,天井の材質は石膏ボードである。床面にはカーペットが敷かれてい

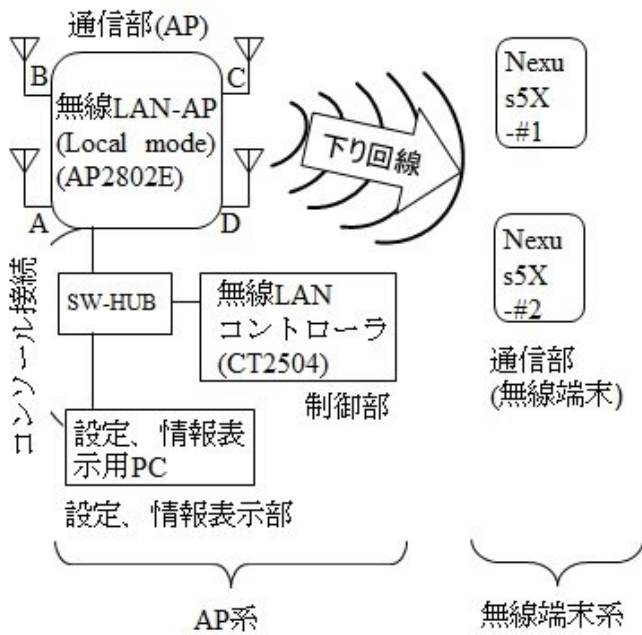


図 1 実験システムの構成

る。本実験は休日に実施しているが、休日出社の方が最大で2名、着席状態で存在する場合もあった。

実験で使用した 5GHz 帯無線 LAN のチャンネル番号 120 (中心周波数 5600MHz) には干渉波は存在していない。

(2) 実験における AP (4本の外付けアンテナ) と 2 台の無線端末の位置

実験では、AP の 4 つの外付けアンテナの配置は、水平面内で四角形の頂点に配置した場合 (AP 本体に実装された外付けアンテナ用コネクタに基づく AP メーカーが推奨する一般的な利用方法) と、水平面内で直線一列に配置した場合の 2 種類を採用した。さらに、無線端末の 2 台の配置は、水平面内で AP となす角度が 0 度の場合と、90 度の場合の 2 種類を採用した。

図 2 は、AP の 4 つの外付けアンテナ (A,B,C,及び D)

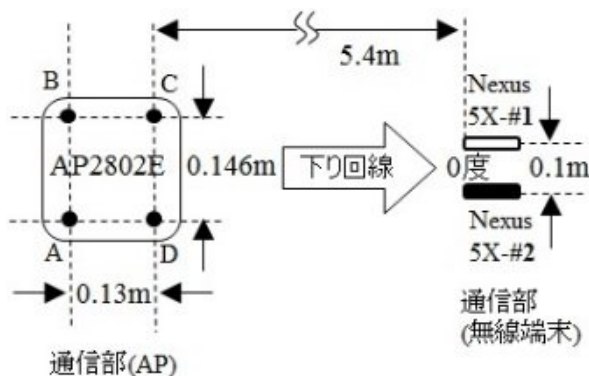


図 2 AP (アンテナの四角形の頂点配置) と 2 台の無線端末の位置 (0 度)

●AP系、無線端末系共通	
送受信中心周波数	5600MHz
チャンネル番号	120
伝送帯域幅	20MHz
IEEE規約	IEEE802.11ac
●通信部 (AP) (Cisco AP2802E)	
AP mode	Local mode(通信モード)
送信電力	4dBm
アンテナ数	4
空間多重数(最大)	3
下り回線マルチユーザMMO	親局として動作
アンテナ間隔(コネクタAとBの中心間、及びコネクタCとDの中心間)	約2.73波長(=14.6cm)
アンテナ間隔(コネクタBとCの中心間、及びコネクタAとDの中心間)	約2.43波長(=13.0cm)
アンテナ	Cisco ANT2524DW-R Dual-band ダイポール
アンテナ利得	4dBi
アンテナ水平面内指向性	無指向性
アンテナ垂直面内半値角	39度
偏波(床面に対して)	垂直
●通信部(無線端末)	
型番名	Nexus5X
OS	Android Ver.7.1.1
空間多重数(最大)	2
下り回線マルチユーザMMO	子局として動作
●制御部(Cisco CT2504)	
機能mode	Local mode(通信モード)
ソフトウェアversion	8.3.133.0
●設定、情報表示部(有線端末)	
ノート型PC型番名	NEC, PC-HZ550AAB
ノート型PCのOS	Windows8.1
CPU、RAM	2.2GHz, 4GByte
●SW-HUB(スイッチングHUB)	
型番名	Buffalo LSW5-GT-8EPL/WH
伝送速度	1000Mbps (1000BASE-T)
●通信部(TCPスループット測定ソフトウェア iperf)	
ソフトウェアVersion	2.0.6
サーバー側(無線端末#1)設定コマンド	iperf -s -w 512K -i 1 -t 75 -p 5001
サーバー側(無線端末#2)設定コマンド	iperf -s -w 512K -i 1 -t 72 -p 5002
クライアント側(有線端末)設定コマンド to サーバー側(無線端末#1)	iperf -c <IP address of #1> -w 512K -i 1 -t 75 -p 5001
クライアント側(有線端末)設定コマンド to サーバー側(無線端末#2)	iperf -c <IP address of #2> -w 512K -i 1 -t 72 -p 5002

表 1 実験での測定諸元

を水平面内で四角形の頂点に配置した場合に、AP に対して 2 台の無線端末が同じ方向 (0 度) に存在する場合の平面図である。図 3 は、図 2 の状況の立面図である。

図 4 は、AP の 4 つの外付けアンテナ (A,B,C,及び D) を水平面内で四角形の頂点に配置した場合に、AP 対

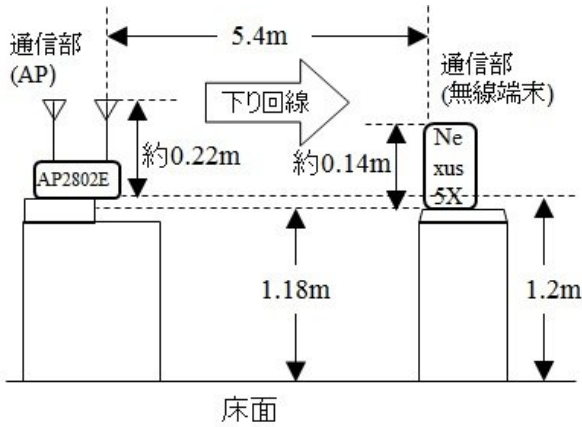


図3 図2の状況の立面図

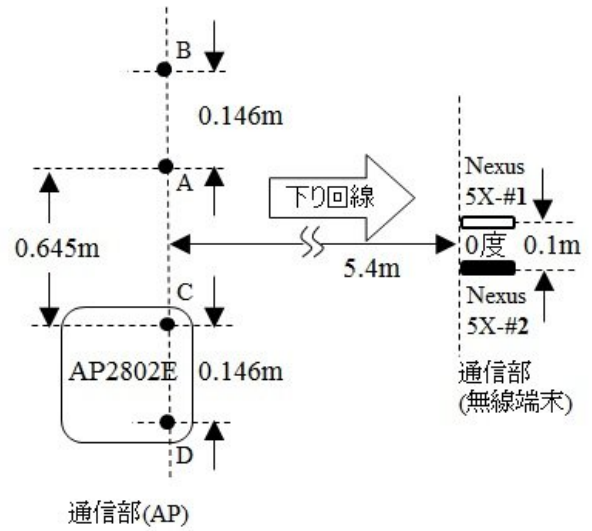


図5 AP (アンテナの直線一列の配置) と2台の無線端末の位置 (0度)

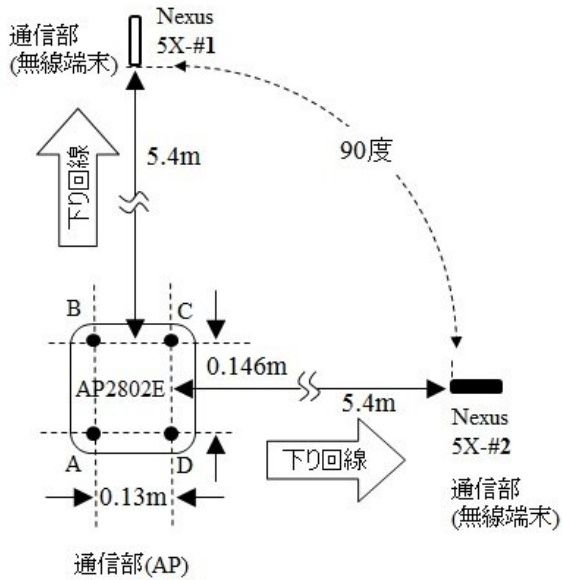


図4 AP (アンテナの四角形の頂点配置) と2台の無線端末の位置 (90度)

して2台の無線端末が90度離れた方向に存在する場合の平面図である。

図5は、APの4つの外付けアンテナ(A,B,C,及びD)を水平面内で直線一列に配置した場合に、同アンテナに対して2台の無線端末が同じ方向(0度)に存在する場合の平面図である。この直線一列の配置の場合、4本の外付けアンテナの間隔は様々な状況を想定できるが、今回の図5の配置は、次の考え方に基づいている。

外付けアンテナAとBの間隔は、外付けアンテナCとDの間隔(AP本体の外付けアンテナ用コネクタの間隔)と同じにする。

外付けアンテナAとCの間隔は、外付けアンテナ用延長同軸ケーブルの長さ(1.5m長、5GHz帯での損失0.8dB)とその硬さに依存した取り回しの容易さを考慮

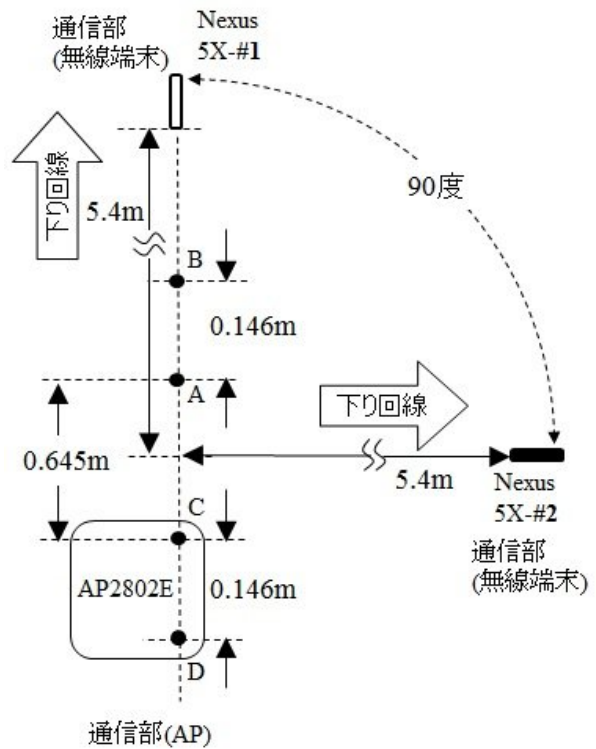


図6 AP (アンテナの直線一列の配置) と2台の無線端末の位置 (90度)

する。

図6は、APの4つの外付けアンテナ(A,B,C,及びD)を水平面内で直線一列に配置した場合に、同アンテナに対して2台の無線端末が90度離れた方向に存在する場合の平面図である。4本の外付けアンテナの間隔は、図5の配置の場合の考え方と同じである。

なお、APと2台の無線端末における各角度の配置では、端末#1と端末#2の位置を入れ替えた状況でもスループットを測定した(端末#1と端末#2の配置を公平にするため)。

(3) 測定手順

上記項目 2.2.(2)で述べた AP の 4 つの外付けアンテナの 2 種類の配置の場合について、次に示す手順でスループットの測定を実施した。

(Step0) DL-MU-MIMO の伝送の状況を測定するために、MU 設定を ON する。具体的には、無線 LAN コントローラ(CT2504)の GUI(Graphical User Interface)で、WLANs> 対象の WLAN ID > Advanced の中で、11ac MU-MIMO にチェックを入れる。

(Step1) AP から見て無線端末#1 を左側に、無線端末#2 を右側に配置する。

(Step2) 設定・情報表示用 PC から無線端末#1 へ iperf によるスループット測定を開始する。この状況は AP から無線端末#1 への下り回線でのスループット測定になる。スループット測定は 75 秒間継続し、1 秒間毎のスループット測定値を設定・情報表示用 PC に記録する。

(Step3) (Step2)から 3 秒後に、設定・情報表示用 PC から無線端末#2 へ iperf によるスループット測定を開始する。この状況は AP から無線端末#2 への下り回線でのスループット測定になる。スループット測定は 72 秒間継続し、1 秒間毎のスループット測定値を設定・情報表示用 PC に記録する。

(Step4) (Step2)と(Step3)のスループット測定中に、設定・情報表示用 PC から AP へコンソール接続により DL-MU-MIMO の動作状況を把握するための CLI (Command Line Interface) コマンド (show interfaces Dot11Radio 1 mumimo 0)を 3 秒弱の間隔で送り、その応答結果を設定・情報表示用 PC に記録する。

なお、この CLI コマンドの応答結果の表示内容の意味を詳細に解説した資料はメーカーから現時点、未公開である。そこで、その表示内容について一般的に妥当と考えられる解釈を筆者らで判断して、本稿の議論に役立てている。CLI コマンドの応答結果に表示された各測定結果の値は、約 1 秒間に測定された結果であると理解できた。

(Step5) (Step2)から(Step4)を 3 回を実施する。

(Step6) 無線端末#1 と同#2 の位置を入れ替える。即ち、AP から見て無線端末#1 を右側に、無線端末#2 を左側に配置する。

(Step7) (Step2)から(Step4)を 3 回を実施する。

(Step8) シングルユーザ MIMO (SU-MIMO) だけが動作する SU 伝送の下り回線の状況を測定するために、MU 設定を OFF して、(Step1)から(Step7)を実施する。

AP の MU 設定を OFF した場合には、(Step4)の CLI コマンドは動作しないので、(Step4)は未実施である。

なお、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で直線一列に配置した図 5 と 6 の各場合においては、実験環境の制約から、今回は上記の手順(Step0)から(Step7)までを実施して DL-MU-MIMO の伝送の状況だけのスループットを測定した。

3. 実験結果

3.1. MU と SU の各伝送の下り回線のシステムスループット

図 7 は、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で四角形の頂点に配置した図 2 と 4 の各場合において、測定実験で記録された iperf によるスループット測定値の平均値(データ数 420 個の平均値)を使って表現した MU (MU 設定が ON の場合)と SU (MU 設定が OFF の場合)の各伝送の下り回線のシステムスループット(2 台の無線端末への伝送の合計のスループット)の平均値である。2 台の無線端末は AP の 4 つのアンテナに対して同じ方向に存在する場合または、90 度離れた方向に存在する場合である。

項目 2.2.(3)測定手順で述べたように iperf を使った 1 回のスループット測定は、無線端末#1 へは 75 秒間、及び、同#2 へは 72 秒間実施される。そこで、無線端末#1 と同#2 が同時に安定して動作していると理解できる重複する時間帯の 70 秒間における 1 秒間毎に測定された 70 個のスループット値を 1 回の測定における測定データとした。各角度の各無線端末において、各々合計 6 回の測定を実施したので、各無線端末での

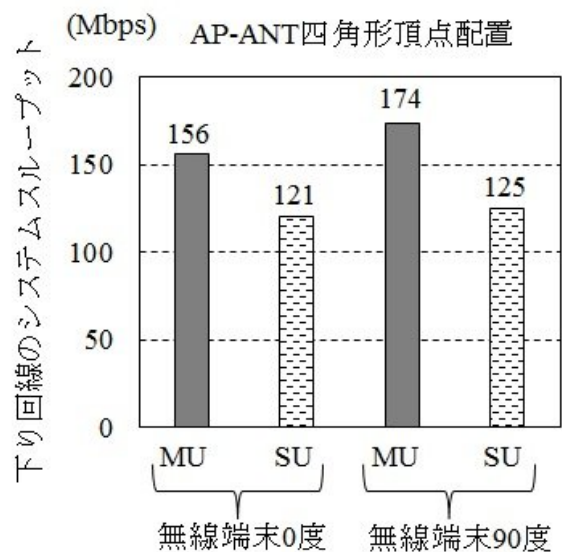


図 7 MU と SU の各伝送の下り回線のシステムスループット(2 台の無線端末への伝送の合計のスループット)測定結果の平均値

測定データ数 = $70 \times 6 = 420$ 個となり、これの平均値を使って図 7 にシステムスループットの平均値として示した。

なお、無線端末と AP における受信電力と SN 比は常に変動していたが、あるタイミングで測定表示を見ると、図 2 の場合、無線端末#1 と同#2 における AP からの到来波の受信電力は概ね -59dBm であり、一方 AP における無線端末#1 からの到来波の受信電力は概ね -49dBm、SN 比は概ね 46dB であり、同無線端末#2 からの到来波の受信電力は概ね -45dBm、SN 比は概ね 41dB であった。同様に図 4 の場合、無線端末#1 と同#2 における AP からの到来波の受信電力は概ね -55dBm であり、一方 AP における無線端末#1 からの到来波の受信電力は概ね -43dBm、SN 比は概ね 45dB であり、同無線端末#2 からの到来波の受信電力は概ね -42dBm、SN 比は概ね 46dB であった。

3.2. DL-MU-MIMO の動作状況を把握するための CLI コマンドの応答結果から判明したこと

図 7 の実験結果を得た測定の状況において、項目 2.2.(3)測定手順の(Step4)で述べた DL-MU-MIMO の動作状況を把握するための CLI コマンドの応答結果から判明したことは、次のとおりである。

(1) MU 伝送時に 1 台の無線端末が 2 ストリーム伝送の場合は、残りの 1 台の無線端末は 1 ストリーム伝送になっていることを確認できた。

(2) MU 伝送を可能とするために MU 設定を ON した場合であっても、DL-MU-MIMO が動作する (MU 伝送) 状況と、SU で下り回線シングルユーザ MIMO (以下 DL-SU-MIMO と記載する) が動作する (SU 伝送) 状況が混在していることが、通常であると判明した。なお、この混在状況での SU 伝送時は、各無線端末は 2 ストリーム伝送になっていることを確認できた。

3.3. AP 側のアンテナ配置を変えた場合の MU 伝送の下り回線のシステムスループット

図 8 には、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で直線一列に配置した図 5 と 6 の各場合と、同アンテナを水平面内で四角形の頂点に配置した図 2 と 4 の各場合において、MU 伝送の下り回線のシステムスループットの測定結果の平均値を比較して示した。2 台の無線端末は AP の 4 つのアンテナに対して同じ方向 (0 度) に存在する場合または、90 度離れた方向に存在する場合である。スループットのデータ処理方法は、項目 3.1. で述べたとおりである。

なお、無線端末と AP における受信電力と SN 比は常に変動していたが、あるタイミングで測定表示を見ると、図 5 の場合、無線端末#1 と同#2 における AP からの到来波の受信電力は概ね -58dBm であり、一方 AP における無線端末#1 からの到来波の受信電力は概

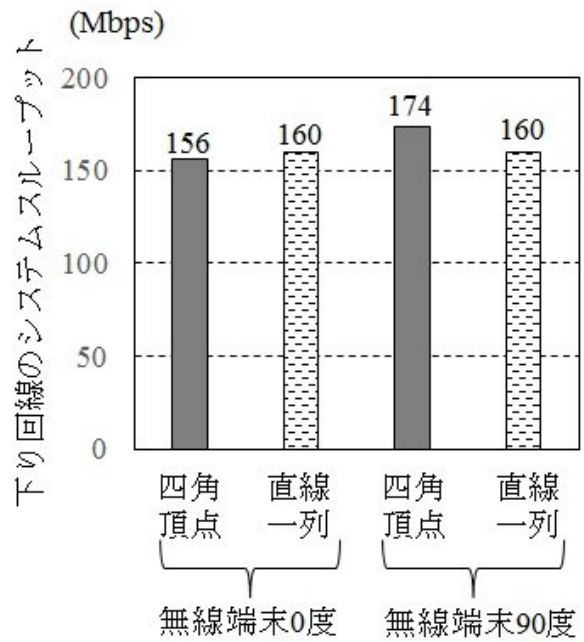


図 8 MU 伝送の下り回線のシステムスループット (2 台の無線端末への伝送の合計のスループット) 測定結果の平均値

ね -45dBm、SN 比は概ね 49dB であり、同無線端末#2 からの到来波の受信電力は概ね -42dBm、SN 比は概ね 52dB であった。図 6 の場合は、実験環境の制約により受信電力と SN 比の測定は未実施である。

4. 考察

4.1. AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で四角形の頂点に配置した場合

(1) MU と SU の各伝送におけるシステムスループットの比較

図 7 からは、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で四角形の頂点に配置した図 2 と 4 の各場合において、MU 伝送は、SU 伝送より、システムスループットを少し増加できていると理解できる。2 台の無線端末が AP のアンテナに対して同じ方向 (0 度) に存在する場合 (無線端末 0 度)、MU 伝送のシステムスループットは、SU 伝送のそれより約 1.3 倍大きい。また、2 台の無線端末が AP のアンテナに対して 90 度離れた方向に存在する場合 (無線端末 90 度)、MU 伝送のシステムスループットは、SU 伝送のそれより約 1.4 倍大きい。

(2) 無線端末の配置の位置関係から見たシステムスループット

SU 伝送のシステムスループットは、無線端末 0 度の場合と無線端末 90 度の場合で、概ね同等と理解できる。一方、MU 伝送のシステムスループットは、無線端末 90 度の場合が、無線端末 0 度の場合より、約

1.1 倍大きくなっている。DL-MU-MIMO の通信として、下り回線において、同じ周波数チャネルを使って同時に 2 台の無線端末へ通信するので、2 台の無線端末は近接するより、離れていたほうが、相互の干渉の悪影響は少なくなると推測できる[2]。従って、MU 伝送のシステムスループットは、無線端末 90 度の場合が、無線端末 0 度の場合より、少しだけ（約 1.1 倍）大きい結果が得られた可能性がある。

（3）システムスループット測定時の AP と無線端末における空間多重数

表 1 測定諸元で示したように仕様では、AP2802E の空間多重数（最大）は 3 ストリーム、無線端末 1 台のそれは 2 ストリームである。従って、MU 伝送では、無線端末の 1 台は 2 ストリームの場合は、残りの 1 台の無線端末は 1 ストリーム伝送に留まることは理解できる。また、SU 伝送では、各無線端末は異なるタイミングで伝送するので、各無線端末は 2 ストリーム伝送が可能になることも理解できる。

（4）MU 伝送と SU 伝送が混在する状況について

項目 3.2. で述べたように、MU 設定を ON した場合であっても、MU 伝送と SU 伝送の各状況が混在していることが、通常であると判明した。MU 設定を ON にしてあるコンテンツを伝送中であっても、AP と複数無線端末間の電波伝搬状況の微妙な変化に対応して、MU 伝送の条件が整わずに、SU 伝送へ切り替わってしまう状況があると考えられる。

4.2. AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で直線一列に配置した場合

（1）AP 側のアンテナ配置を変えた場合の MU 伝送におけるシステムスループットの比較

図 8 からは、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で直線一列に配置した図 5 と 6 の各場合と、同アンテナを水平面で四角形の頂点に配置した図 2 と 4 の各場合において、MU 伝送の下り回線のシステムスループットは、概ね同等であると理解できる。

文献[3]では、数値解析例として、4 つのダイポールアンテナを水平面で直線一列に配置する場合に、アンテナ間隔の極端に狭い（0.3 波長）アンテナペア 2 つに対して、アンテナ開口（＝各アンテナペアの外側のアンテナ間隔）を 6 波長で配置すると MU-MIMO のシステム容量が大きくなって最適化できることが示されている。本実験では、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で直線一列に配置した場合のアンテナ開口（＝AP の外付けアンテナ B と D 間隔）は 17.5 波長である。また、AP の外付けアンテナ A と B、及び、C と D の各アンテナペアの間隔は 2.73 波長（＝0.146m）である。この 2.73 波長は、AP 本体に実装された外付けアンテナ用コネクタに基づく AP メーカーが推奨する

間隔なので、この間隔を極端に狭くする（例えば 0.3 波長）ことは、MU 伝送以外の AP 全体として調整された様々な性能（例えば、最大比合成ダイバーシチ受信、送信ビームフォーミング、空間多重数の選択、伝送速度の選択等）が適切に発揮できない可能性が高くなると推測する。アンテナペアの間隔を極端に狭くする件は、今後の検討課題としたい。

（2）無線端末の配置の位置関係から見た MU 伝送におけるシステムスループット

図 8 からは、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で直線一列に配置した図 5 と 6 の各場合、即ち、無線端末 0 度の場合と無線端末 90 度の場合において、MU 伝送のシステムスループットは、同じ値になった。

一方、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で四角形の頂点に配置した図 2 と 4 の各場合においては、項目 4.1(2)で述べたように、MU 伝送のシステムスループットは、無線端末 90 度の場合が、無線端末 0 度の場合より、少しだけ（約 1.1 倍）大きくなっている。

従って、無線端末から見た AP の外付けアンテナは、一直線に重なる（アンテナ開口が狭くなっている）状況が存在するよりも、横方向に展開している（アンテナ開口が開いている）状況のほうが、MU 伝送には望ましいと理解できた。

屋内事務所環境に設置された AP の場合、無線端末は、一般的には、水平面で AP の周囲 360 度の任意の位置に存在すると想定できるので、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で四角形の頂点に配置することは、MU 伝送には望ましいと考えられる。

4.3. Airtime で見た MU 伝送と SU 伝送が混在する状況

項目 3.2. で述べたように、MU 設定を ON した場合であっても、DL-MU-MIMO が動作する（MU 伝送）状況と、DL-SU-MIMO が動作する（SU 伝送）状況が混在していることが、通常であると判明した。その状況は、項目 2.2.(3)(Step4)で述べた DL-MU-MIMO の動作状況を把握するための CLI コマンドの応答結果から判明したが、その応答結果からは、約 1 秒間に測定された MU 伝送している時間（MU Airtime）と、SU 伝送している時間（SU Airtime）の情報も把握できた。

（1）AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で四角形の頂点に配置した場合

図 9 は、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で四角形の頂点に配置した図 2 の場合（無線端末 0 度）に、MU 設定を ON にした測定実験において、AP が 2 台の無線端末（#1 と #2）と通信する際に、下り回線で MU または SU の各伝送に費やした Airtime（伝送時間）の測定値（：平均値と ± 標準偏差）を示している。項目 2.2.(3)(Step4)で述べたように 3 秒弱の間隔で、MU

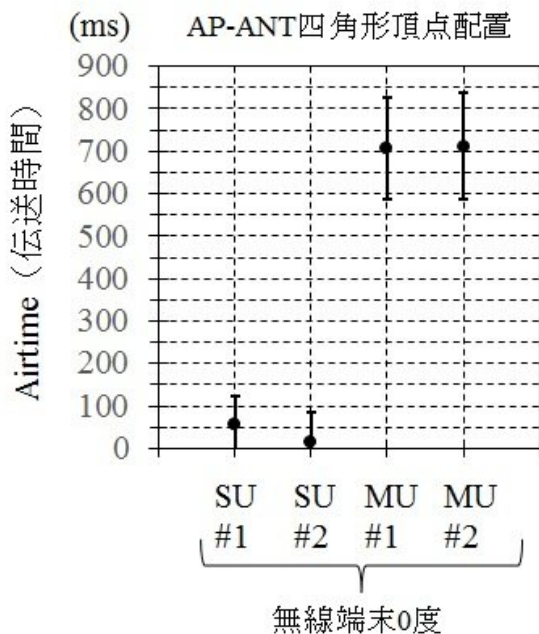


図 9 MU または SU の各伝送に費やした Airtime (伝送時間) の測定値 (: 平均値と ± 標準偏差)

伝送と SU 伝送の Airtime 情報を把握した . 各無線端末に対して各々合計 6 回の測定を実施したが , 測定された Airtime 情報のデータ数は各無線端末に対して各々合計 161 個となった . これの平均値と ± 標準偏差を図 9 に示した .

MU 伝送の Airtime の平均値は無線端末 #1 と同 #2 で概ね同じ値 (約 710ms) であった . 一方 , SU 伝送の Airtime の平均値は無線端末 #1 の値 (約 58ms) が同 #2 の値 (約 16ms) より約 3.6 倍大きい状況であった . この SU 伝送の状況の理由は不明であるが , SU 伝送における AP と無線端末の各々の制御仕様に關係していると推測する .

なお , 無線端末 #1 と同 #2 への同時の MU 伝送時間は , 完全に同じ値になっていないが , 概ね同じ値であるので , 利活用可能と判断した . リアルタイムの極めて短い時間における測定であるので , 本 CLI コマンドの応答結果は , その程度の状況であると理解した .

図 10 は , AP の 4 つの外付けアンテナを水平面で四角形の頂点に配置した図 4 の場合 (無線端末 90 度) に , MU 設定を ON にした測定実験において , AP が 2 台の無線端末 (#1 と #2) と通信する際に , 下り回線で MU または SU の各伝送に費やした Airtime (伝送時間) の測定値 (: 平均値と ± 標準偏差) を示している . 図 9 の場合と同様の測定実験により , 各無線端末に対して , 各々合計 6 回の測定を実施したが , 測定された

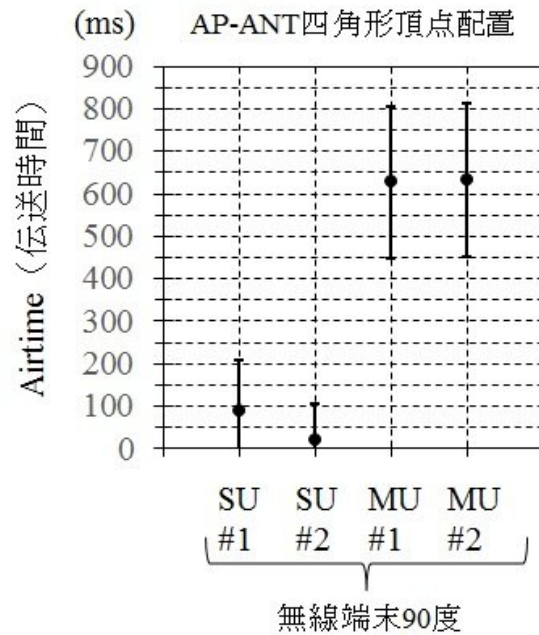


図 10 MU または SU の各伝送に費やした Airtime (伝送時間) の測定値 (: 平均値と ± 標準偏差)

Airtime 情報のデータ数は各無線端末に対して各々合計 156 個となった . これの平均値と ± 標準偏差を図 10 に示した .

MU 伝送の Airtime の平均値は無線端末 #1 と同 #2 で概ね同じ値 (約 630ms) であった . 一方 , SU 伝送の Airtime の平均値は無線端末 #1 の値 (約 90ms) が同 #2 の値 (約 22ms) より約 4.1 倍大きい状況であった . この SU 伝送の状況の理由は不明であるが , SU 伝送における AP と無線端末の各々の制御仕様に關係していると推測する .

MU 伝送の Airtime の平均値は , 図 10 の場合 (無線端末 90 度) のほうが , 図 9 の場合 (無線端末 0 度) より約 80ms 短い . 一方 , 図 7 では , MU 伝送のシステムスループットは , 無線端末 90 度の場合が , 無線端末 0 度の場合より , 少しだけ (約 1.1 倍) 大きい .

ここで , 項目 2.2.(3)(Step4)で述べた CLI コマンドの応答結果を見ると , 無線端末 0 度の場合も無線端末 90 度の場合も出現した最大の 11ac の MCSindex は 8 であった . 周波数チャネル幅が 20MHz の伝送において 11ac の MCS 8 の伝送速度は , 例えば , 空間多重数 = 1 , かつ Guard Interval (以下 GI と記載する) = 800ns の場合が 78Mbps であり , 空間多重数 = 2 , かつ GI = 800ns の場合が 156Mbps である [4] .

そこで , 図 11 に , MU 伝送の Airtime の平均値と 11ac の MCS 8 の出現頻度の關係を示した . 無線端末 0

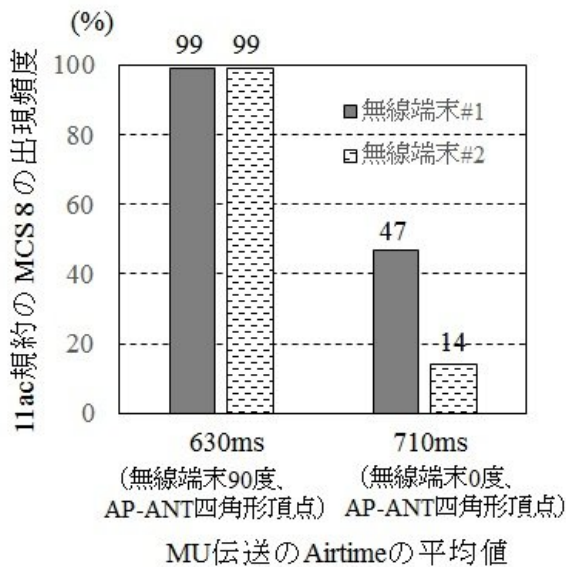


図 11 MU 伝送の Airtime の平均値と 11ac の MCS 8 の出現頻度の関係

度の場合の MCS 8 の出現頻度は合計 161 個の Airtime 情報のデータ数において、無線端末#1 への伝送時に約 47%、同#2 への伝送時に約 14%であった。一方、無線端末 90 度の場合の MCS 8 の出現頻度は合計 156 個の Airtime 情報のデータ数において、無線端末#1 への伝送時に約 99%、同#2 への伝送時にも約 99%であった。

従って、無線端末 90 度の場合のほうが MU 伝送の Airtime の平均値が無線端末 0 度の場合より短くても、無線端末 90 度の場合のほうが MCS 8 の出現頻度が無線端末 0 度の場合より、多いので、最終的に、項目 4.1(2) で述べたように、MU 伝送のシステムスループットは、無線端末 90 度の場合が、無線端末 0 度の場合より、少しだけ（約 1.1 倍）大きくなったと考えられる

(2) AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で直線一列に配置した場合

図 12 は、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で直線一列に配置した図 5 の場合（無線端末 0 度）に、MU 設定を ON にした測定実験において、AP が 2 台の無線端末（#1 と #2）と通信する際に、下り回線で MU または SU の各伝送に費やした Airtime（伝送時間）の測定値（：平均値と±標準偏差）を示している。図 9 の場合と同様の測定実験により、各無線端末において、各々合計 6 回の測定を実施したが、測定された Airtime 情報のデータ数は各無線端末に対して各々合計 161 個となった。これの平均値と±標準偏差を図 12 に示した。

MU 伝送の Airtime の平均値は無線端末#1 と同#2 で概ね同じ値（約 620ms）であった。

一方、SU 伝送の Airtime の平均値は無線端末#1 の値

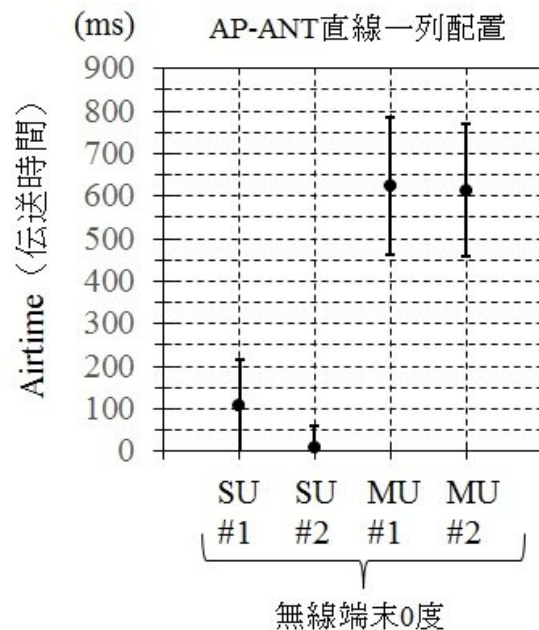


図 12 MU または SU の各伝送に費やした Airtime（伝送時間）の測定値（：平均値と±標準偏差）

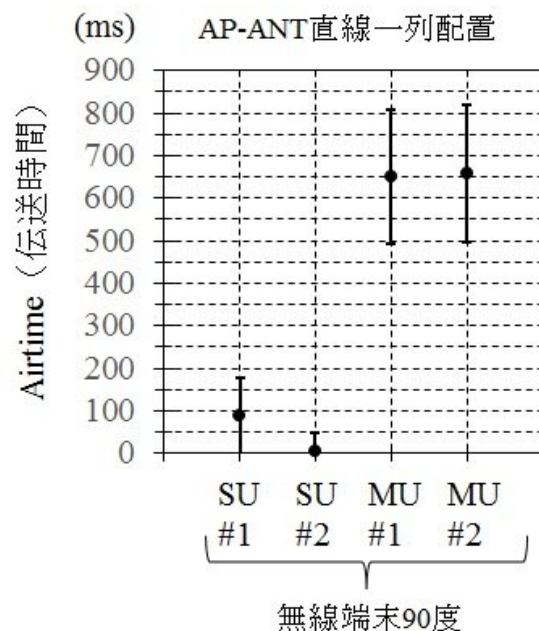


図 13 MU または SU の各伝送に費やした Airtime（伝送時間）の測定値（：平均値と±標準偏差）

（約 107ms）が同#2 の値（約 10ms）より約 10.7 倍大きい状況であった。この SU 伝送の状況の理由は不明であるが、SU 伝送における AP と無線端末の各々の制

御仕様に關係していると推測する。

図 13 は、AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で直線一列に配置した図 6 の場合（無線端末 90 度）に、MU 設定を ON にした測定実験において、AP が 2 台の無線端末（#1 と #2）と通信する際に、下り回線で MU または SU の各伝送に費やした Airtime（伝送時間）の測定値（：平均値と ± 標準偏差）を示している。図 9 の場合と同様の測定実験により、各無線端末において、各々合計 6 回の測定を実施したが、測定された Airtime 情報のデータ数は各無線端末に対して各々合計 156 個となった。これの平均値と ± 標準偏差を図 13 に示した。

MU 伝送の Airtime の平均値は無線端末 #1 と同 #2 で概ね同じ値（約 655ms）であった。

一方、SU 伝送の Airtime の平均値は無線端末 #1 の値（約 88ms）が同 #2 の値（約 6ms）より約 14.7 倍大きい状況であった。この SU 伝送の状況の理由は不明であるが、SU 伝送における AP と無線端末の各々の制御仕様に關係していると推測する。

無線端末 90 度の場合に着目すると、MU 伝送の Airtime の平均値は、図 13 の場合（AP アンテナの直線一列配置）のほうが、図 10 の場合（AP アンテナの四角形頂点配置）より約 25ms 長い。一方、図 8 では、無線端末 90 度における MU 伝送のシステムスループットは、AP アンテナの四角形頂点配置の場合が、AP アンテナの直線一列配置の場合より、少しだけ（約 1.1 倍）大きい。

ここで、項目 2.2.(3)(Step4)で述べた CLI コマンドの応答結果を見ると、AP アンテナの直線一列配置の場合も AP アンテナの四角形頂点配置の場合も出現した最大の 11ac の MCSindex は 8 であった。

そこで、図 14 に、MU 伝送の Airtime の平均値と 11ac の MCS 8 の出現頻度の關係を示した。AP アンテナの直線一列配置の場合の MCS 8 の出現頻度は合計 156 個の Airtime 情報のデータ数において、無線端末 #1 への伝送時に約 59%、同 #2 への伝送時に約 58%であった。一方、AP アンテナの四角形頂点配置の場合の MCS 8 の出現頻度は項目 4.3(1)で述べたように、合計 156 個の Airtime 情報のデータ数において、無線端末 #1 への伝送時に約 99%、同 #2 への伝送時にも約 99%であった。

従って、AP アンテナの直線一列配置の場合のほうが、MU 伝送の Airtime の平均値が AP アンテナの四角形頂点配置の場合より長くても、AP アンテナの四角形頂点配置の場合のほうが MCS 8 の出現頻度が AP アンテナの直線一列配置の場合より、多いので、最終的に、MU 伝送のシステムスループットは、AP アンテナの四角形頂点配置の場合が、AP アンテナの直線一列配

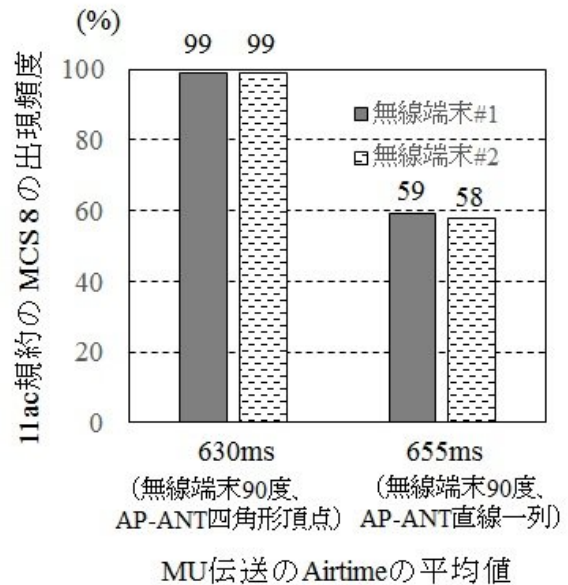


図 14 MU 伝送の Airtime の平均値と 11ac の MCS 8 の出現頻度の關係

置の場合より、少しだけ（約 1.1 倍）大きくなったと考えられる。

(3) MU 伝送のシステムスループットに影響する AP と複数無線端末における要素

上記項目(1)と(2)の考察から、MU 伝送の Airtime の平均値の長さが大きくても、大きい 11ac の MCSIndex の出現頻度が少ない場合には、MU 伝送のシステムスループットは、大きくはならないと理解できる。MU 伝送のシステムスループットは、電波伝搬状況の微妙な変化に対応して、AP と複数無線端末が次の各要素をどのように選択して制御するかに影響されると理解できる。

MU 伝送と SU 伝送の混在状況（各伝送における Airtime の長さの選択状況）

11ac の MCSIndex の混在状況（伝送速度、空間多重数、及び GI の選択状況）

上記の各要素をどのようにとらえるかは、AP と無線端末の各メーカーのノウハウに依存するところが大きいと推測するが[5]、メーカーによって総合的に調整されているだろう市販製品の無線 LAN システム、アンテナ及び電波伝搬の三位一体の検討[6]をさらに進めることにより、MU 伝送のシステムスループットをより向上させることが可能か否かは、今後の検討課題である。

5. まとめ

屋内事務所環境において、11ac の DL-MU-MIMO に対応した市販製品（1 台の親局(AP)：シスコシステムズ社製 AP2802E、及び、2 台の子局(無線端末)：Google

と LG エレクトロニクスの両社による共同開発の Nexus5X) を使用することによって、DL-MU-MIMO のスループット測定実験を実施し、以下のことが判明した。

(1) AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で四角形の頂点に配置した場合において、2 台の無線端末が AP のアンテナに対して同じ方向(0 度)に存在する(無線端末 0 度)場合、MU 伝送のシステムスループットは、SU 伝送のそれより約 1.3 倍大きい。また、2 台の無線端末が AP のアンテナに対して 90 度離れた方向に存在する(無線端末 90 度)場合、MU 伝送のシステムスループットは、SU 伝送のそれより約 1.4 倍大きい。

SU 伝送のシステムスループットは、無線端末 0 度の場合と無線端末 90 度の場合で、概ね同等と理解できる。一方、MU 伝送のシステムスループットは、無線端末 90 度の場合が、無線端末 0 度の場合より、約 1.1 倍大きくなっている。

(2) MU 伝送を可能とするために MU 設定を ON した場合であっても、MU 伝送と SU 伝送の各状況が混在していることが、通常であると判明した。

(3) AP の 4 つの外付けアンテナを水平面内で直線一列に配置した場合において、MU 伝送のシステムスループットは、同アンテナを水平面内で四角形の頂点に配置した場合と概ね同等であった。

(4) MU 伝送の Airtime の平均値の長さが大きくても、大きい 11ac の MCSIndex の出現頻度が少ない場合には、MU 伝送のシステムスループットは、大きくはならない。

DL-MU-MIMO は 11ac においてオプション扱いなので、現時点、ノート型 PC 内蔵の無線端末での DL-MU-MIMO の実装が AP に比べて消極的な印象である。また、無線端末は、私物端末の業務利用(Bring Your Own Device)を社内制度として推奨する企業が増加するに伴い、11ac より古い規約に対応した無線端末を内蔵したノート型 PC が、継続的に屋内事務所環境で多く活用される傾向にある。それゆえ、現時点、DL-MU-MIMO の恩恵を実感することが日々の無線 LAN 利活用では、少ないと思われる。

一方、2020 年 1 月に策定完了予定[7]の IEEE802.11ax 規約では、DL-MU-MIMO は、Mandatory 予定と聞いている(なお、上り回線の MU-MIMO は、オプション扱い)[8]。それゆえ、遠くない未来において、11ax 規約に対応した無線端末を内蔵したノート型 PC への更新が進展するならば、企業の屋内事務所環境の日々の無線 LAN 利活用でも、DL-MU-MIMO の恩恵を実感できることになるとと思われる。

謝 辞

無線 LAN 製品の様々なことで日頃よりお世話にな

っているシスコシステムズ合同会社の 大野奈津子様、村松杏奈様、大藤皓哉様、鈴木麻倫子様、Ajithkumar Somasundaram 様、大崎秀行様に感謝する。DL-MU-MIMO の有効性について議論を深めてくれた ネットワンシステムズ株式会社東日本第 1 事業本部第 1 営業部技術第 4 チームの中野清隆エキスパートに感謝する。本検討の機会を与えていただいた ネットワンシステムズ株式会社ビジネス推進本部の篠浦文彦本部長、同本部第 1 応用技術部の井上直也本部長、同部第 1 チームの川崎勝マネージャーに感謝する。

文 献

- [1] Cisco systems, “802.11ac: 第 5 世代の Wi-Fi 規格 テクニカル ホワイト ペーパー”, https://www.cisco.com/c/ja_jp/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html, 2014 年 4 月 29 日, 参照 Sep.10, 2018.
- [2] 浅井裕介, 石原浩一, 村上友規, 工藤理一, 市川武男, 鷹取泰司, 溝口匡人, “超高速無線 LAN 規格 IEEE802.11ac の概要とマルチユーザ MIMO の実験的検証”, 無償公開論文 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J97-B, No.1, pp.1-18, Jan. 2014, https://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=J&year=2014&fname=j97-b_1_1&abst=, 参照 Sep.10, 2018.
- [3] 阪口啓, “マルチユーザ MIMO のためのアンテナ設計法 (小特集 マルチユーザ MIMO: マルチアンテナとマルチユーザの相乗効果による通信速度向上)”, 電子情報通信学会誌, Vol.97, No.4 pp.280-284, Apr. 2014.
- [4] IEEE Std 802.11-2016, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, pp.2608-2609, Dec.7, 2016.
- [5] 守倉正博, 久保田周治, “改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書 第 4 章 アクセス制御方式「CSMA/CA」”, インプレス R&D, 2008 年 4 月 11 日.
- [6] 池上文夫, “伝搬研究の始まりと終わり”, http://www.nict.go.jp/publication/kiho/33/005/Kiho_Vol33_SI_No005_pp043-054.pdf, 電波研究所季報, vol.33, 特 5, pp.43-54, 1987 年 12 月, 参照 Sep.21, 2018.
- [7] 根本浩之, “無線 LAN の最新技術 [Part 2] 高速化次世代標準「11ax」スループットを 4 倍にする三つの技術”, 日経 NETWORK, 2018 年 11 月号.
- [8] 足立朋子, “IoT 時代の超高速&高効率無線 LAN をめざす 802.11ax 最新ドラフトの詳細と主要技術”, 第 54 回ワイヤレス技術セミナー 「次世代ワイヤレステクノロジーフォーラム, 標準化動向で読み解く無線技術の新潮流」, リックテレコム, 2017 年 10 月 5 日.