

IEEE802.11ax 規約の OFDMA 方式の上り回線マルチユーザ (UL-MU) 伝送における送信電力制御の低減範囲を探るための実験的検討

松戸 孝[†] 山下 聖太郎^{††} 力石 靖^{††} 宇都宮 光之[‡] 植谷 昌博^{‡‡}

† ネットワンシステムズ株式会社 ビジネス開発本部 第 1 応用技術部 第 1 チーム
†† 第 2 応用技術部 サービス開発チーム, ‡ 第 2 応用技術部 DX 推進チーム
‡‡ 第 3 応用技術部 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 IEEE802.11ax 規約の OFDMA 方式の上り回線マルチユーザ (UL-MU) 伝送を確実に安定して運用するためには, Resource Unit (RU) を割り当てられた各無線端末からの受信電力を無線 LAN アクセスポイント (AP) において揃える必要があり, 各無線端末は送信電力を低減する制御を実施する. RU type 26tones (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送の同時送信を想定した場合に無線端末で送信電力を低減する範囲の目安について, AP において受信した無線端末からの受信電力スペクトラム測定データを解析し, 計算機実験 (モンテカルロ法) も併用して推定した. 例えば, 90% の確率で RU type 26tones (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送の同時送信を無線端末数が 9 台まで可能とするためには, 無線端末における送信電力制御の低減範囲が -26dB 以上の実装が必要になると推定される.

キーワード OFDMA, Resource Unit, IEEE802.11ax, 上り回線, マルチユーザ伝送, 無線端末, 送信電力制御

Experimental Study to Estimate the Reduction Range of Transmission Power Control at Client Terminals in IEEE 802.11ax Uplink Multi-User Transmission Using OFDMA

Takashi MATSUDO[†] Seitaro YAMASHITA^{††} Yasushi CHIKARAISHI^{††}
Mitsuyuki UTSUNOMIYA[‡] and Masahiro UETANI^{‡‡}

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

††, ‡ Advanced Technology Engineering Department 2, Business Development Division

‡‡ Advanced Technology Engineering Department 3, Business Development 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 To operate uplink multi-user transmission with OFDMA properly in IEEE802.11ax Wireless LAN, each signal power received from client terminals (CLs) should be equal on a wireless LAN access point. Therefore CLs execute a transmission power control (TPC), particularly decreasing the transmission power. We analyzed signal power spectrum data on the AP received from CLs and found out a statistical characteristic in the data that was useful to execute the TPC on CLs with Resource Unit type 26tones properly.

Keyword OFDMA, Resource Unit, IEEE802.11ax, Uplink, Multi-user transmission, Target RSSI

1. はじめに

本稿は、第 635 回 URSI-F 会合で発表した内容（以下前編 1 と記載する）[1]と第 640 回 URSI-F 会合で発表した内容（以下前編 2 と記載する）[2]の続編である。前編 1 と同 2 では未検討であった、IEEE802.11ax 規約（以下 11ax と記載する）の OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, 以下 OFDMA と記載する)方式の上り回線マルチユーザ伝送（以下 UL-MU 伝送と記載する）の同時送信を想定した無線端末数が 9 台以下の場合に無線端末で送信電力を低減する場合の範囲の目安について、本続編では、無線 LAN アクセス ポイント(以下 AP と記載する)において受信した無線端末からの受信電力スペクトラム（20MHz 幅）測定データを解析し、計算機実験（モンテカルロ法）も併用して検討、及び推定した結果について述べている。

UL-MU 伝送技術とは、複数の無線端末が、同一周波数チャンネルで、かつ、同一時刻に、1 台の AP へ上り回線として伝送する技術である。従って、確実に安定した UL-MU 伝送を実現するためには、AP における各無線端末の受信電力の格差を解消して揃える必要があり、それゆえ、送信電力制御の低減範囲を無線端末に適切に設定することが不可欠である[3], [4]。

前編 1 と同 2 では、屋内事務所環境で筆者らが日常的に活用している社内無線 LAN の IEEE802.11ac 規約（以下 11ac と記載する）対応 AP において受信した各無線端末の受信電力測定データを解析し、さらに計算機実験（モンテカルロ法）[5], [6], [7]も併用することによって、AP における各無線端末の受信電力の差の発生状況を把握して、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 2, 3, 4, 7, 9, 及び 18 台の各場合において、無線端末で送信電力を低減する範囲の目安を推定した。この目安は、11ax の AP と無線端末の開発や改善の検討に貢献する基礎的な有益な知見となった [1], [2], [8]。

前編 1 と同 2 における検討では、11ax の UL-MU 伝送において AP と各無線端末が同時通信する同一周波数チャンネルの周波数帯域幅は 20MHz を想定していた。これは、11ax の上り回線 MU-MIMO(Uplink Multi-User Multiple-Input Multiple-Output, 以下 UL-MU-MIMO と記載する)方式の伝送（プリアンブル部とデータ部）と、上り回線 OFDMA(Uplink-OFDMA, 以下 UL-OFDMA と記載する)方式のプリアンブル部の伝送を想定して、UL-OFDMA 方式のデータ部の場合が、未検討だった。

11ax の UL-OFDMA では、UL-MU-MIMO とは異なり、上り回線の無線端末が送信する伝送フレームのプリアンブル部とデータ部では、同一周波数チャンネルの

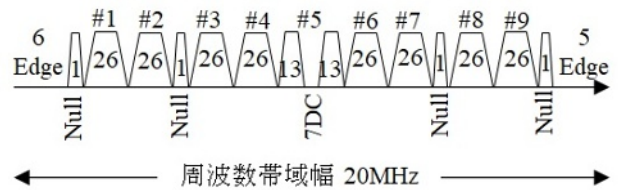


図 1 11ax の OFDMA 伝送において、周波数帯域幅が 20MHz の場合の RUtype 26tones（約 2MHz 幅）のサブキャリアの配置例。AP は、最大 9 台（#1 から 9 の RU）の無線端末と同時通信が可能

使い方が異なっている [3], [4]。即ち、複数の無線端末が送信する伝送フレームのうち、11ax の UL-OFDMA のプリアンブル部は、UL-MU-MIMO と同様に、同一周波数チャンネルの全帯域で、かつ、同一時刻に、1 台の AP で受信されることになる。一方、複数の無線端末が送信する伝送フレームのうち、11ax の UL-OFDMA のデータ部は、Resource Unit（以下 RU と記載する）と呼ばれる各無線端末に割り当てられた同一周波数チャンネル内の異なるサブキャリアグループで分離されている [9], [10], [11], かつ、同一時刻に 1 つの AP で複数の RU の信号を受信することになる。

図 1 は、11ax の OFDMA 伝送において、1 つの周波数チャンネルの帯域幅が 20MHz の場合の RUtype 26tones（1 つの無線端末あたりに割り当てたサブキャリア（tone）数が 26 波であるという意味）のサブキャリアの配置例である。AP は、最大 9 台（#1 から 9 の RU）の無線端末と同時通信が可能である。なお、11ax のサブキャリアの周波数間隔は 78.125kHz なので、RUtype 26tones の帯域幅は約 2MHz である。

11ax の UL-OFDMA のデータ部の場合も、AP における各無線端末、即ち、各 RU の信号の受信電力の格差が大きいと、上り回線の各無線端末における小さな周波数誤差でも大きなサブキャリア間干渉の原因となり、異なる RU 間であっても同一時刻に 1 台の AP で受信した際には干渉が発生して、確実に安定した通信が困難になる可能性がある [12]。その受信電力の格差は、上り回線における AP と各無線端末間の電波伝搬距離の違い（遠近問題）に起因することに加えて、マルチパス伝搬による周波数選択性フェージングの悪影響によって、受信電力の周波数特性が大きく変化する場合には、各 RU の信号の受信電力の格差はさらに大きくなる可能性がある。例えば、図 2 はマルチパス伝搬がない場合における 11ac の OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 以下 OFDM と記載する)伝送（20MHz 幅）の受信電力スペクトラム（チャンネル番号 56, 中心周波数 5280MHz）の想像例である。周波数選

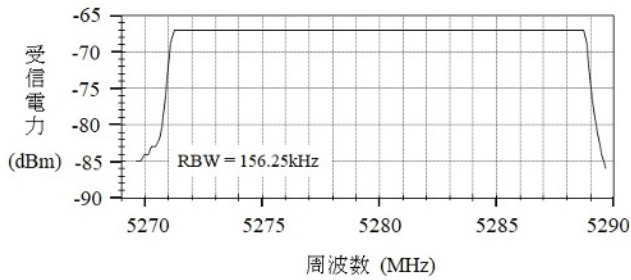


図 2 マルチパス伝搬がない場合における 11ac の OFDM 伝送 (20MHz 幅) の受信電力スペクトラム (チャンネル番号 56, 中心周波数 5280MHz) の想像例

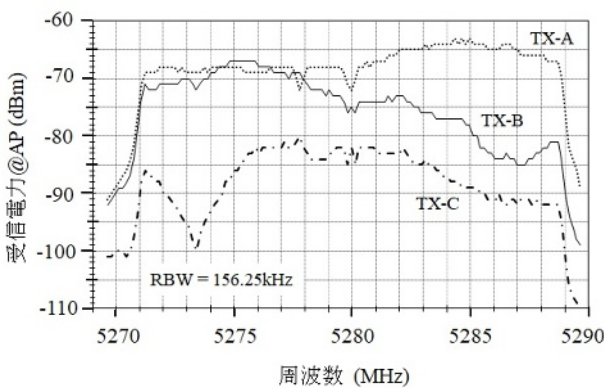


図 3 屋内事務所環境の AP で受信した 11ac の OFDM 伝送 (20MHz 幅) の受信電力スペクトラム (チャンネル番号 56, 中心周波数 5280MHz) の測定結果の例. 受信地点 (AP) と無線端末による 3 つの送信地点 (TX-A, TX-B, 及び TX-C) は、図 6 に記載のとおり

択性フェージングの悪影響はなく、受信電力の周波数特性は一定である。一方、図 3 は、屋内事務所環境の AP で受信した 11ac の OFDM 伝送 (20MHz 幅) の受信電力スペクトラム (チャンネル番号 56, 中心周波数 5280MHz) の測定結果の例である。受信地点 (AP) と無線端末による 3 つの送信地点 (TX-A, TX-B, 及び TX-C) は、後述の図 6 に記載のとおりである。受信電力の周波数特性は変化していて、例えば、TX-C から送信された電波の受信電力スペクトラムでは最大約 20dB の変化がある。

ここで、図 4 は、図 3 の受信電力スペクトラムを 11ax の OFDMA 伝送 (20MHz 幅) のデータ部で RUtype 26tones (約 2MHz 幅) の 3 台の無線端末から同時送信されたと解釈した例である。各送信地点の無線端末は、図 1 の RUtype 26tones の配置例に従い、TX-A は RU26-#7, TX-B は RU26-#3, 及び TX-C は RU26-#4 に割り当てられていると想定した。各 RU 間の信号の受信電力

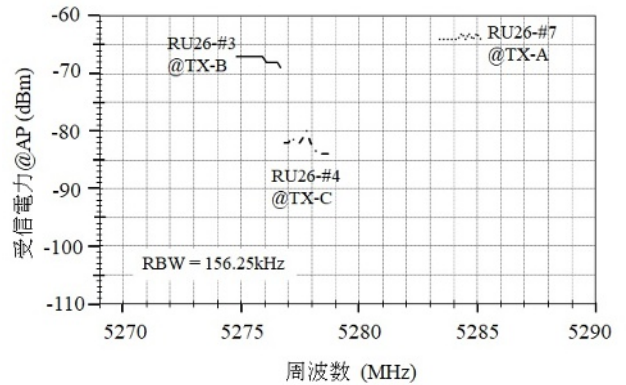


図 4 図 3 の受信電力スペクトラムを 11ax の OFDMA 伝送 (20MHz 幅) のデータ部で RUtype 26tones (約 2MHz 幅) の 3 台の無線端末から同時送信されたと解釈した例

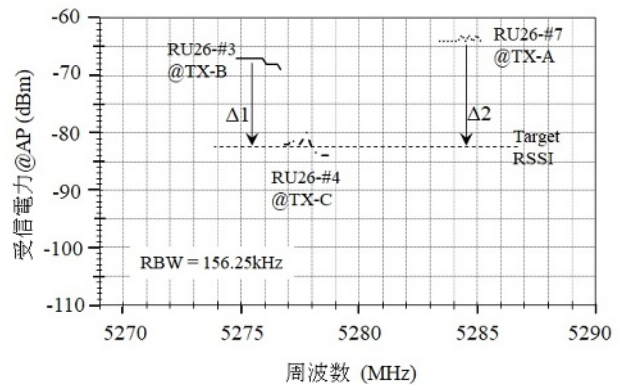


図 5 無線端末で送信電力制御を実施の場合の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送の想像例。3 台の無線端末の内、2 台の無線端末 (TX-A と TX-B の各地点から送信) で送信電力の低減 ($\Delta 1$ と $\Delta 2$) を実施して 1 台の AP での受信電力を TargetRSSI に揃える例

の格差は、15 から 20dB 程度の大きさになっている。

11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送において、確実に安定した通信を実現するためには、AP における各無線端末、即ち各 RU の受信電力をある基準値 (TargetRSSI) に揃える必要がある。そのために 11ax では、図 5 に示すように各無線端末は割り当てられた各 RU の送信電力を低減 (1 と 2 の送信電力の低減) する制御を実施する。なお、図 5 では、TargetRSSI の一案として、AP で受信した複数の無線端末のうち最低値 (RU26-#4 を割り当てられ、かつ、TX-C 地点で送信する無線端末からの受信電力値) を設定する想定であるが、11ax ドラフト 3.0 では TargetRSSI の設定方法についての規定がなく、実装依存とのことである [3], [4]。

確実に安定した 11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送を実現するためには、割り当てられた RU における送信電力制御の低減範囲を無線端末は適切に設定することが不可欠であるが、その低減範囲は、どのくらいが現実的に妥当であるかは不明である。

そこで、本続編では、屋内事務所環境で筆者らが日常的に利用している社内無線 LAN の 11ac 対応 AP において受信した無線端末からの受信電力スペクトラム (20MHz 幅) 測定データを解析することによって、11ax の OFDMA (20MHz 幅) の RUtype 26tone (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送に相当する状況を把握し、AP における複数の RU、即ち複数の無線端末からの受信電力の差の発生状況を明らかにする。これによって、無線端末が割り当てられた RU における送信電力を低減する範囲の目安を知ることができる。この目安は、確実に安定した 11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送を実現するために、11ax の AP と無線端末の開発や改善の検討に貢献する基礎的で有益な知見になる。

第 2 章では、実験の内容 (実験方法等) を示す。第 3 章では、AP において受信した無線端末からの受信電力スペクトラム (20MHz 幅) 測定データを解析して、11ax の OFDMA (20MHz 幅) の RUtype 26tone (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送の同時送信する無線端末数が 2, 3, 5, 7, 及び 9 台の場合を想定して、計算機実験 (モンテカルロ法) を用いた解析結果として、各無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) の発生状況の累積確率を無線端末数が 2, 3, 5, 7, 及び 9 台の場合について比較して示す。第 4 章では、実験結果について考察する。

2. 実験の内容

2.1. 実験目的

屋内事務所環境で筆者らが日常的に利用している社内無線 LAN の 11ac 対応 AP において受信した無線端末からの受信電力スペクトラム (20MHz 幅) 測定データを解析することによって、11ax の OFDMA (20MHz 幅) の RUtype 26tones (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送に相当する状況を把握し、AP における複数の RU、即ち複数の無線端末からの受信電力の差の発生状況を明らかにする。これによって、無線端末が割り当てられた RU における送信電力を低減する範囲の目安を知ることができる。この目安は、確実に安定した 11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送を実現するために、11ax の AP と無線端末の開発や改善の検討に貢献する基礎的で有益な知見になる。

2.2. 実験方法

(1) 実験場所の環境

本実験は、屋内事務所環境で筆者らが日常的に利活

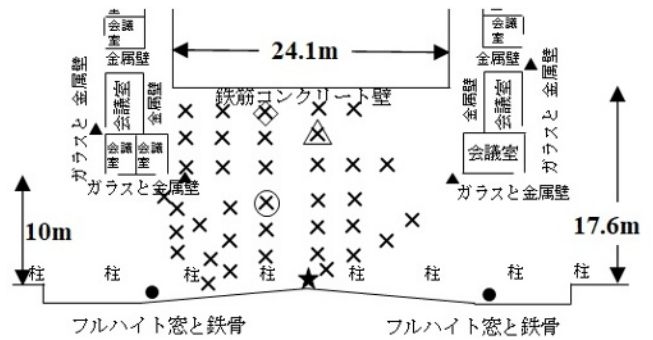


図 6 測定実験の実施エリアの平面概要図

- × : 無線端末による送信地点 (37 地点)
- &× : TX-A, &× : TX-B, &× : TX-C
- : 受信地点 (受信電力スペクトラム測定機能を動作させながら無線端末と 5GHz 帯の大セルで通信する AP)
- : Dual5GHz 帯 (小セル on 大セル) モードで運用する AP
- : 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の両方の無線 LAN を各大セルで運用する AP

用している社内無線 LAN の AP で測定されたデータを用いており、特別な実験環境を新たに構築はしていない。但し、実験は、社員がほとんど社内無線 LAN を利用していない休日に実施した。その理由は、実験で使用した無線端末が送信する電波の受信電力スペクトラムだけを AP において容易に識別して測定するためである。

本実験場所の環境のフロア全体の平面概要図は、前編 1[1]の図 3 のとおりであり、また、同フロアの立面概要図は、前編 1[1]の図 5 のとおりである。図 6 は、測定実験を実施したエリアの平面概要図である。同エリアは、フロア内では前編 1[1]の図 3 の北側に位置している。測定実験を実施したエリア内の 37 地点 (図 6 の × 印) から、1 台の同じ無線端末によって順次に電波を送信して 1 台の AP (図 6 の ○ 印) と 5GHz 帯の大セルにおいて通信し、同時にその AP において受信電力スペクトラム測定機能も動作させて、各地点から送信された電波の受信電力スペクトラムを測定した。なお、図 3 から 5 における TX-A, TX-B, 及び TX-C の各地点は、図 6 に示したとおりである。

(2) 実験システムの構成

無線端末と AP 間で通信する実験システムは、前編 1[1]の項目 2.3.(2)に記載した構成を基本として、これに表 1 に示す各装置を追加することによって [13],[14],[15],[16]、無線端末が送信する電波を AP で受信した際に同時に受信電力スペクトラムの測定も実施した。なお、無線端末と快適に通信するために AP と

表 1 実験での測定諸元

●無線端末（送信装置、5GHz帯）	
無線LANモジュール	ノート型PC内蔵、IEEE802.11ac第1世代対応のIntel Dual Band wireless-AC7265
周波数チャンネル幅の設定値	20MHz
送信電力の設定値	最高
接続先APの設定	図6の★印のAPのBSSID
●受信電力スペクトラム測定機能（受信装置、5GHz帯）	
ハードウェア	AP3802I（シスコシステムズ社製、IEEE802.11ac第2世代対応AP）に内蔵されたCisco CleanAir chipset
ソフトウェア	Cisco Spectrum Expert Software Release 4.1.11、Windows10のPC上で動作
動作概要	ハードウェアによるリアルタイムFFTの信号処理測定結果をソフトウェアで表示、記録
周波数分解能(RBW)	156.25kHz（20MHz幅の受信電波をFFTによって128binsに分割）
受信電力スペクトラム	5000回のFFTの結果の平均値を、1秒に1回、表示、記録
測定周波数	チャンネル番号56（中心周波数5280MHz）

無線 LAN コントローラが電波環境を考慮して、本実験時では自動的にチャンネル番号 56（中心周波数 5280MHz）を選択していた。

（3）APにおける受信電力スペクトラムの測定手順

(Step1) 無線端末を第 1 番目の送信地点へ設置し、通信対象の AP に接続していることを確認する。

(Step2) PC 上のソフトウェア（Cisco Spectrum Expert Software Release 4.1.11）を AP に接続させ、受信電力スペクトラム測定を開始する。

(Step3) 無線端末から AP へ約 1 分間連続して電波を送信する。この状況は、無線端末から AP と無線 LAN コントローラを経由した先に存在するサーバへファイルを連続的に転送することによって実現させた。

(Step4) 上記(Step3)の期間、受信電力スペクトラム測定が継続していることを確認し、測定結果を保存する。

(Step5) 無線端末を次の送信地点へ設置し、通信対象の AP に接続していることを確認する。そして、上記(Step2)から(Step4)を実施する。

なお、実験で使用した無線端末の送信開始と終了のタイミングや、受信電力の大きさ等の観測状況を総合的に考慮すると、今回の実験期間（休日の午後から夕刻）では、実験で使用した無線端末が送信する電波以外の他の送信源による受信電力スペクトラムは測定されていないと判断した。

（4）データ解析の手順

37 地点で測定された受信電力スペクトラムのデータから受信電力の累積確率分布を求めるために、次の手順でデータ解析を実施した。

(Step1) 1 つの地点の受信電力スペクトラム測定データに着目する。

(Step2) 約 1 分間の測定期間において、一般的には、複数の受信電力スペクトラムが測定されているが、安定して受信できている状況の受信電力スペクトラムだけを抽出して、以降のデータ解析に使用する。安定して受信できている状況の目安は、受信電力スペクトラム測定機能のソフトウェア（Cisco Spectrum Expert Software Release 4.1.11）で表示される FFT Duty Cycle が 30% 以上とした。ここで FFT Duty Cycle とは、ある測定時間内において FFT の 1 つの周波数 bin の受信電力が雑音電力フロアから 20dB よりも大きい時間の割合である。なお、今回の測定実験（測定地点の総数 37）では、1 つの地点で、安定して受信できている状況の受信電力スペクトラムの数の平均値は 5.2 となった。

(Step3) 上記(Step2)で得られた各受信電力スペクトラムについて、FFT の 1 つの周波数 bin における平均の受信電力を計算する[17]。この結果、1 つの地点で、1 つの受信電力スペクトラム測定データが得られる。

(Step4) 上記(Step3)で得られた 1 つの受信電力スペクトラムについて図 1 を参照しながら、RUtype 26tones（約 2MHz 幅）の受信電力に相当する 13 個の FFT の周波数 bin の受信電力の合計値を計算する。この結果、図 1 における RU26-#1 から 9 の UL-MU 伝送における 9 つの RUtype 26tones（約 2MHz 幅）に相当するサブキャリアグループ毎の受信電力が得られる。

(Step5) 上記(Step3)で得られた 1 つの受信電力スペクトラムについてチャンネル番号 56（中心周波数 5280MHz）の全帯域幅である約 20MHz 幅、即ち、RUtype 242tones[9]、[10]、[11]の受信電力に相当する 122 個の周波数 bin の受信電力の合計値を計算する。この結果、1 つのチャンネル（約 20MHz 幅、RUtype 242tones）の上り回線シングルユーザ伝送（以下 UL-SU 伝送と記載する）の受信電力が得られる。

(Step6) すべての地点（37 地点）の測定データについて上記(Step1)から(Step4)を実施する。この結果、図 1 における RU26-#1 から 9 の UL-MU 伝送における 9 つの RUtype 26tones（約 2MHz 幅）に相当するサブキャリアグループ毎の受信電力が 37 地点分得られる。

(Step7) すべての地点（37 地点）の測定データについて上記(Step1)から(Step3)及び(Step5)を実施する。この結果、1 つのチャンネル（約 20MHz 幅、RUtype 242tones）の UL-SU 伝送の受信電力が 37 地点分得られる。

(Step8) 上記(Step6)と(Step7)の結果から、受信電力の累積確率分布を求める。

（5）計算機実験（モンテカルロ法）によるデータ解析の手順

11ax の OFDMA（20MHz 幅）の RUtype 26tones（約

2MHz 幅)の UL-MU 伝送に相当する状況を想定した場合に、AP における複数の RU、即ち、複数の無線端末からの受信電力の差の発生状況を明らかにするために、計算機実験(モンテカルロ法)によって次の手順でデータ解析を実施した。

(Step1)上記項目(4)(Step6)と(Step8)で得られたすべての受信電力データをひとまとめの母集団として扱う。データ数は、333(=37 地点×9 つの各 RUtype 26tones(約 2MHz 幅)に相当するサブキャリアグループ)である。なお、本計算機実験では、このすべての受信電力データは、独立であり、そして同じ確率分布に従う確率変数(乱数)としてとらえることができると仮定する。

(Step2)上記(Step1)で定義された母集団の確率的な特徴をその受信電力測定データの累積確率分布として把握する。

(Step3)計算機で一様乱数を発生させる。

(Step4)上記(Step3)で発生させた一様乱数の累積確率値に等しくなる(Step2)の累積確率分布の縦軸の値、即ち、母集団の累積確率値を求め、これに対応する(Step2)の累積確率分布の横軸の値、即ち、受信電力値を求める。これにより、母集団の累積確率分布に従った乱数の値として受信電力値が求まる。

(Step5)上記(Step3)と(Step4)を、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数だけ実施する。これにより、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数分の受信電力値が得られる。

(Step6)上記(Step5)で得られた UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数分の受信電力値から、受信電力の差(最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲)を 1 つのサンプル(標本)として把握する。

(Step7)上記(Step6)で把握した UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末の受信電力の差(最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲)が、想定したサンプルサイズ(標本の大きさ)になるまで、上記(Step3)から(Step6)を繰り返す。これにより、無線端末の受信電力の差(最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲)の発生状況が計算機で再現されたことになる。なお、前編 2[2]における検討結果を尊重して、想定したサンプルサイズ(標本の大きさ)は 10 万回に設定してデータ解析を進めた。(Step8)上記(Step7)によって把握できた無線端末の受信電力の差(最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲)の発生状況の累積確率を求める。

3. 実験結果

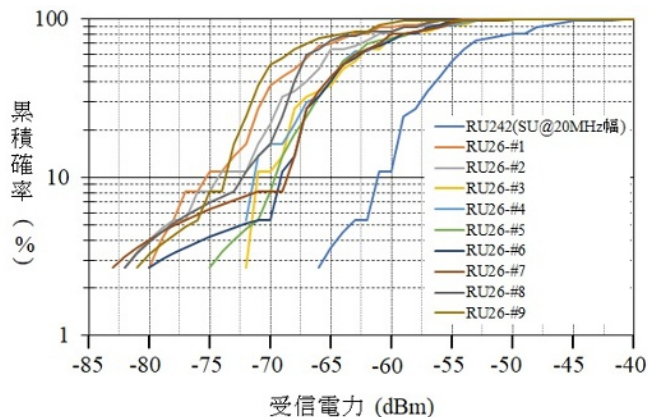


図 7 上り回線受信電力測定データの累積確率分布(各データ数は 37 個)。周波数帯域幅が 20MHz である受信電力スペクトラムの測定データから計算した 9 つの RUtype 26tones(約 2MHz 幅)に相当するサブキャリアグループ毎、及び RUtype 242tones(約 20MHz 幅、シングルユーザ伝送)に相当するサブキャリアの各場合

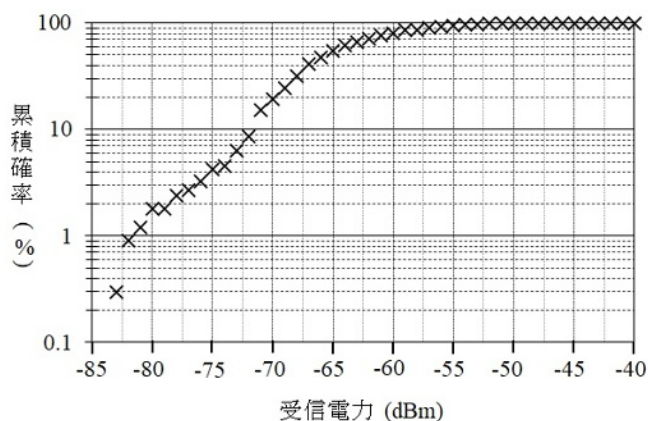


図 8 母集団(図 7 の RU26-#1 から 9 の合計の受信電力測定データ(データ数 333 個))の累積確率分布

第 2 章の実験方法によってデータ解析した実験結果を図 7 から 10 に示す。

図 7 は、第 2 章(4)(Step8)によるデータ解析結果である。この図 7 は、周波数帯域幅が 20MHz である受信電力スペクトラムの測定データから計算した 9 つの RUtype 26tones(約 2MHz 幅)に相当するサブキャリアグループ毎の上り回線受信電力測定データと、RUtype 242tones(約 20MHz 幅、シングルユーザ伝送)に相当するサブキャリアの上り回線受信電力測定データの累積確率分布である。37 地点の測定データを用いているので、各累積確率分布のデータ数は 37 である。

図 8 は、第 2 章(5)(Step2)によるデータ解析結

果である。この図 8 は、母集団（図 7 の RU26-#1 から 9 の合計の受信電力測定データ（データ数 333 個 = 37 地点 × 9 つの各 RUtype 26tones（約 2MHz 幅）に相当するサブキャリアグループ）の累積確率分布である。

図 9 は、第 2 章（5）(Step8)によるデータ解析結果である。この図 9 は、図 8 に示した母集団の累積確率分布に従う乱数発生を利用した計算機実験（モンテカルロ法）の結果（サンプルサイズ = 10 万回）である。11ax の OFDMA（20MHz 幅）の RUtype 26tones（約 2MHz 幅）の UL-MU 伝送において、同時送信する無線端末数が 2, 3, 5, 7, 及び 9 台の場合を想定して、AP（大セル）における RUtype 26tones に相当する各無線端末の受信電力の差（最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲）の累積確率を、無線端末数が 2（×印）, 3（○印）, 5（□印）, 7（+印）, 及び 9（△印）台の場合について示している。また、図 10 には、図 9 の縦軸を線形目盛に変更して示す。

4. 考察

4.1. 上り回線受信電力測定データの累積確率の特徴

（1）9 つの RUtype 26tones（約 2MHz 幅）に相当するサブキャリアグループ毎の場合

図 7 からは、概ね累積確率が 20% 以上の場合には、RU26-#3 から 7 が、概ね同じ傾向であると理解できる。また、RU26-#1, 2, 8, 及び 9 は、RU26-#3 から 7 より受信電力が数 dB から 8dB 程度小さくなる傾向があると理解できる。

ここで図 1 を参照して、9 つの RUtype 26tones（約 2MHz 幅）に相当するサブキャリアグループの配置例を再確認すると、RU26-#3 から 7 は、20MHz 幅の受信電力スペクトラムの周波数軸の中央付近に位置し、一方、RU26-#1, 2, 8, 及び 9 は、同スペクトラムの周波数軸の低い側及び高い側の端付近に位置していることがわかる。

本実験環境では、受信電力スペクトラムの周波数特性の劣化、即ち、周波数選択性フェージングによる悪影響は、20MHz 幅の受信電力スペクトラムの周波数軸の中央付近よりも、同スペクトラムの周波数軸の低い側及び高い側の端付近に現れていると理解した。従って、本実験環境では、11ax の OFDMA（20MHz 幅）の RUtype 26tones（約 2MHz 幅）の UL-MU 伝送においては、RU26-#1, 2, 8, 及び 9 よりも、RU26-#3 から 7 を無線端末に割り当てることが望ましいと理解できる。

（2）9 つの RUtype 26tones（約 2MHz 幅）に相当と RUtype 242tones（約 20MHz 幅、シングルユース送信）に相当の場合

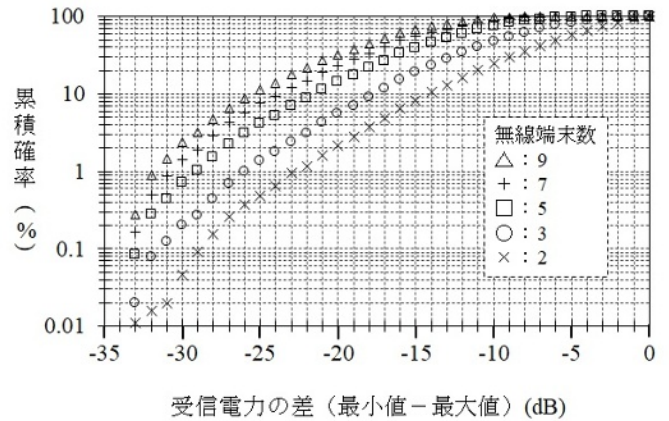


図 9 計算機実験の結果（サンプルサイズ = 10 万回）。AP（大セル）における RUtype 26tones に相当する各無線端末の受信電力の差（最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲）の累積確率

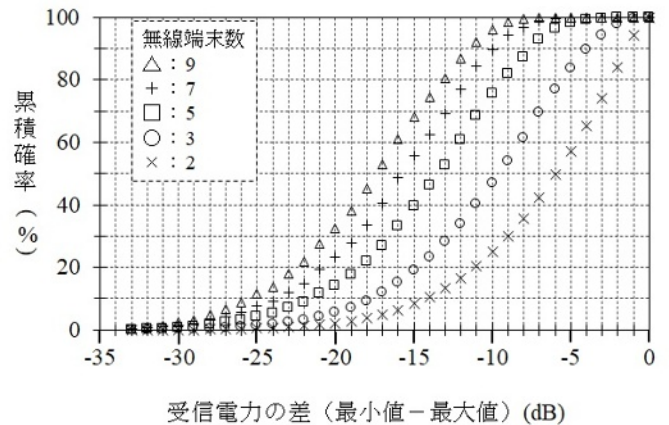


図 10 計算機実験の結果（サンプルサイズ = 10 万回）。AP（大セル）における RUtype 26tones に相当する各無線端末の受信電力の差（最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲）の累積確率（線形目盛）

RUtype 26tones の周波数帯域幅は、RUtype 242tones の周波数帯域幅より、tone 数の数値で比較するならば、約 9.3 分の 1 の狭さになる。従って、RUtype 26tones における受信電力も、RUtype 242tones の受信電力より、約 9.3 分の 1、即ち約 9.7dB の低下になると理解できる。図 7 を見ると、20MHz 幅の受信電力スペクトラムの周波数軸の中央付近に位置する RU26-#3 から 7 における受信電力は、RUtype 242tones の受信電力より、概ね 10dB の低下であり、上述の約 9.7dB の低下に一致する傾向である。

一方、図 7 からは、20MHz 幅の受信電力スペクトラムの周波数軸の低い側及び高い側の端付近に位置する

RU26-#1,2,8,及び 9 における受信電力は, RUtype 242tones の受信電力より, 10dB から 15dB 程度の低下であることもわかる. RU26-#1,2,8,及び 9 では,狭くなった周波数帯域幅における受信電力の低下よりさらに大きい低下,即ち約 9.7dB より大きい低下が発生していると理解できるが,これは,周波数選択性フェージングによる悪影響が主な原因であると推測する.

4.2. RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送の同時送信を想定した状況の特徴(無線端末数が 2, 3, 5, 7, 及び 9 台の場合)

(1) RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数と受信電力の差の関係

計算機実験の結果である図 9 と 10 からは, RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 2(×印), 3(○印), 5(□印), 7(+印), 及び 9(◇印)台と増加すると,大セルを形成する AP における無線端末の受信電力の差(最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲)も広がる傾向があることがわかる.この傾向は, 11ax の UL-MU 伝送において AP と各無線端末が同時通信する同一周波数チャネルの周波数帯域幅は 20MHz を想定した前編 1 と同 2[1],[2]における検討で見られた傾向と同様である.

計算機実験では,UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 2, 3, 5, 7, 及び 9 台の各場合で,同じサンプルサイズ 10 万回なので,上記の傾向になる理由は,累積確率が 100%の場合の総数に依存する訳ではなくて,無線端末数が 2, 3, 5, 7, 及び 9 台と増加すると,単純に,受信電力の最小値と最大値の発生状況が多様になってくるからだろうと推測した.

(2) 90%の確率において必要とされる RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の無線端末での送信電力を低減する目安

第 1 章で述べたように,確実に安定した 11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送を実現するためには,AP における複数の RU,即ち複数の無線端末からの受信電力を揃えることが必要である.それゆえ,無線端末では,送信電力を制御して低減する.例えば,無線端末で,90%の確率において送信電力を制御して低減する目安は,図 9 と 10 の各累積確率 10%の受信電力の差に着目することによって,次のように理解できる.

大セルにおいて, RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が

- 2 台の場合: -14dB
- 同 3 台の場合: -18dB
- 同 5 台の場合: -22dB

同 7 台の場合: -24dB

同 9 台の場合: -26dB

例えば,無線端末における送信電力制御の低減範囲が -14dB 以上の実装ならば,90%の確率で RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送の同時送信が可能となるのは,無線端末数が 2 台までとなり,無線端末数が 3 台以上の場合には,90%の確率で RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送することは,あきらめる必要があると推測される.

例えば,90%の確率で RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送の同時送信を無線端末数が 9 台まで可能とするためには,無線端末における送信電力制御の低減範囲が -26dB 以上の実装が必要になると推測される.

RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送をある確率で可能とするためには,UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が増加すると,AP における各無線端末の受信電力を揃えるための無線端末で送信電力を低減する範囲が広がる(深くなる)ことを,11ax の AP と無線端末の開発や改善の検討において配慮する必要がある.

5. まとめ

確実に安定した 11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送を実現するためには,割り当てられた RU における送信電力制御の低減範囲を無線端末は適切に設定することが不可欠であるが,その低減範囲は,どのくらいが現実的に妥当であるかは,これまで不明であった.

そこで,屋内事務所環境で筆者らが日常的に利用している社内無線 LAN の 11ac 対応 AP において受信した無線端末からの受信電力のスペクトラム(20MHz 幅)データを解析することによって,11ax の OFDMA(20MHz 幅)の RUtype 26tones(約 2MHz 幅)の UL-MU 伝送に相当する状況を把握した.さらに計算機実験(モンテカルロ法)も併用して,大セルを形成する AP における複数の RUtype 26tones(約 2MHz 幅),即ち複数の無線端末からの受信電力の差の発生状況を明らかにして,累積確率のグラフとして示した.

これによって,無線端末が割り当てられた RUtype 26tones(約 2MHz 幅)における送信電力を低減する範囲の目安を知ることができた.この目安は,確実に安定した 11ax の OFDMA のデータ部の UL-MU 伝送を実現するために,11ax の AP と無線端末の開発や改善の検討に貢献する基礎的で有益な知見になる.

本実験的検討で得られた主な知見は,次のとおりである.

- (1) 本実験環境では,11ax の OFDMA(20MHz 幅)

の RUtype 26tones (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送においては, 受信電力スペクトラムの周波数特性の劣化状況を考慮すると, 20MHz 幅の受信電力スペクトラムの周波数軸の低い側及び高い側の端付近の RU26-#1,2,8,及び 9 よりも, 同スペクトラムの周波数軸の中央付近の RU26-#3 から 7 を無線端末に割り当てることが望ましいと理解できる。

(2) 例えば, 90%の確率で RUtype 26tones (約 2MHz 幅) の UL-MU 伝送の同時送信を無線端末数が 9 台まで可能とするためには, 無線端末における送信電力制御の低減範囲が -26dB 以上の実装が必要になると推測される。

今後の課題は, RUtype の tone 数が他の場合の状況を確認することや, 他の屋内実験環境での状況が本検討結果と同様になるかを確認することである。また, 免許不要の無線局として手軽に導入可能な 11ax を適切に運用する知見を獲得しながら, 新たな自営の無線システムとして登場した免許あり無線局であるローカル 5G と 11ax の使い分け案についても模索していく [18],[19],[20]。

謝 辞

データ解析の方法等, 様々な知見をご助言いただきました電気通信大学の唐沢好男名誉教授 (IEEE Fellow) に感謝する。社内無線 LAN 環境を利活用する機会を与えていただいたネットワークシステムズ株式会社 管理本部 情報システム部の飯田健二部長, 古森浩一シニアマネージャー, 及び, 角田一磨社員に感謝する。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, 竹林百合香様, 大崎秀行様に感謝する。11ax の先行情報を提供してくれたネットワーク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 3 チームの中野清隆エキスパートに感謝する。11ax 対応無線 LAN 製品の最新状況を共有してくれたネットワークシステムズ株式会社 ビジネス開発本部 第 3 応用技術部 第 3 チームの丸田竜一社員, 田中政満社員に感謝する。本検討の機会を与えていただいたネットワークシステムズ株式会社の篠浦文彦取締役, ビジネス開発本部の岩本智浩本部長, 同本部 第 1 応用技術部の藤田雄介本部長, 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] 松戸孝, 丸田竜一, 植谷昌博, 田中政満, 山下聖太郎, 宇都宮光之, 力石靖, "IEEE802.11ax 規約の上り回線マルチユーザ (UL-MU) 伝送における無線端末での送信電力制御の低減範囲を探るための実験的検討", <http://ursi-f.nict.go.jp/annai635.html>, 第 635 回 URSI-F 会合, 2019 年 6 月 20 日, 参照 Dec.20, 2020。
- [2] 松戸孝, 植谷昌博, 山下聖太郎, 宇都宮光之, 力石靖, "計算機実験 (モンテカルロ法) で探る IEEE802.11ax 規約の上り回線マルチユーザ (UL-

MU) 伝送における送信電力制御の低減範囲", <http://ursi-f.nict.go.jp/annai640.html>, 第 640 回 URSI-F 会合, 2019 年 12 月 25 日, 参照 Dec.20, 2020。

- [3] 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 (第 48 回), "資料 48-2-2 委員会報告 (案)「次世代高効率無線 LAN の導入のための技術的条件」, 及び, 資料 48-2-3 委員会報告 (案)「次世代高効率無線 LAN の導入のための技術的条件」(概要)", http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/ido/02kiban12_04000249.html, 2019 年 4 月 11 日, 参照 Dec.20, 2020。
- [4] 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 5GHz 帯無線 LAN 作業班 (第 13 回), "5GHz 作 13-2 IEEE 802.11ax における上りリンクマルチユーザ伝送 (UL MU) を考慮した共用検討", http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/02kiban12_04000231.html, 2018 年 12 月 7 日, 参照 Dec.20, 2020。
- [5] 加藤潔, "Excel 環境における Visual Basic プログラミング", 共立出版社, 1999 年 8 月 10 日, ISBN 4-320-02941-0。
- [6] 石川宏, "1. モンテカルロ法とシミュレーション", ナチュラル研究所, https://www.ishikawa-lab.com/montecarlo_1.html, 参照 Dec.20, 2020。
- [7] 石川宏, "4.6 任意の分布乱数を作る", ナチュラル研究所, https://www.ishikawa-lab.com/montecarlo_4.html#4.6, 参照 Dec.20, 2020。
- [8] 松戸孝, "無線端末(PC)の送信電力の最大変化範囲を実験的に確認 ~ IEEE802.11ax の新世界を, 11ac 対応の無線端末(PC)の現世から想像してみる ~", ネットワークシステムズ, <https://www.netone.co.jp/report/column/column1/20190904.html>, 2019 年 9 月 4 日, 参照 Dec.20, 2020。
- [9] 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 5GHz 帯無線 LAN 作業班 (第 11 回), "5GHz 作 11-2 IEEE802.11ax の導入に向けた検討", https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/ido/02kiban12_04000218.html, 2018 年 7 月 27 日, 参照 Dec.20, 2020。
- [10] National Instruments, "高効率な無線 LAN 規格、IEEE 802.11ax の概要", <https://www.ni.com/ja-jp/innovations/white-papers/16/introduction-to-802-11ax-high-efficiency-wireless.html>, 2019 年 3 月 5 日, 参照 Dec.20, 2020。
- [11] 篠原笑子, 岩谷純一, 井上保彦, "次世代高効率無線 LAN 規格「IEEE 802.11ax」の標準化動向", NTT 技術ジャーナル, Vol.28, No.11, pp.52-55, Nov. 2016, <https://www.ntt.co.jp/journal/1611/files/jn20161152.pdf>, 参照 Dec.20, 2020。
- [12] 服部武, "インプレス標準教科書シリーズ OFDM/OFDMA 教科書", インプレス R&D, 2008 年 9 月 21 日。
- [13] Cisco systems, "Release Notes for Cisco Spectrum Expert, Release 4.1.11", https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/spectrum/expert/4-1/release/notes/sern_4-1.html, Mar.17, 2015, 参照 Dec.20, 2020。
- [14] Cisco systems, "Cisco Spectrum Expert User Guide Version 4.0",

https://www.cisco.com/c/dam/en/us/td/docs/wireless/spectrum/expert/users/guide/Cisco_Spectrum_Expert_User_Guide_Version_4-0.pdf, Dec, 2010, 参照 Dec.20, 2020.

- [15] Cisco systems, "Cisco Spectrum Expert-Remote Sensor on Cisco Aironet Wave 2 APs", Release Notes for Cisco Wireless Controllers and Lightweight Access Points, Cisco Wireless Release 8.5.103.0 and 8.5.105.0, <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/release/notes/crn85.html#spectrum-expert>, May16, 2019, 参照 Dec.20, 2020.
- [16] Cisco systems, "Restrictions for CleanAir", Cisco Wireless Controller Configuration Guide, Release 8.5, https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/8-5/config-guide/b_cg85/wireless_quality_of_service.html?bookSearch=true#ID78, Sep.16, 2020, 参照 Dec.20, 2020.
- [17] 松戸孝, "第4回 無線 LAN の製品や技術の理解を助けてくれる便利な単位「dB (デシベル)」 ~ 実験的検討に挑戦! どこのメーカーも具体的に示していない無線 LAN 製品におけるダイバーシティ受信の性能状況 その4 ~", ネットワンシステムズ, https://www.netone.co.jp/knowledge-center/blog-column/knowledge_takumi_064/index.html, 2016年1月12日, 参照 Dec.20, 2020.
- [18] 松戸孝, "ローカル 5G も WiFi と同じ、皆で周波数共用だよ ~ とある技術者から友人 A 君への手紙 ~", ネットワンシステムズ, <https://www.netone.co.jp/knowledge-center/netone-blog/20200710-1/>, 2020年7月10日, 参照 Dec.20, 2020.
- [19] 松戸孝, "ローカル 5G で使う 28GHz 帯は、4.7GHz 帯より見通し確保に注意が必要 ~ 第1フレネルゾーンの大きさを計算して見通し確保の目安を知る ~", <https://www.netone.co.jp/knowledge-center/blog-column/matsudo20200807/>, 2020年8月7日, 参照 Dec.20, 2020.
- [20] 松戸孝, "ローカル 5G と WiFi の使い分けの考え 方案 ~ とある技術者から友人 A 君への手紙 ~", ネットワンシステムズ, <https://www.netone.co.jp/knowledge-center/netone-blog/20201218-1/>, 2020年12月18日, 参照 Dec.20, 2020.