

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

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

† 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 3 応用技術部 第 2 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 ソフトウェア開発チーム,

‡‡ 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 4 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、無線 LAN アクセスポイント (AP) における各無線端末からの受信電力を揃える必要があり、各無線端末は送信電力を低減する制御を実施する。UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が増加した場合でも、無線端末で送信電力を低減する範囲の目安を容易に推定するためには、AP において受信した各無線端末の受信電力測定データの累積確率分布に従った乱数発生を利用した計算機実験 (モンテカルロ法) が有用であることを明らかにした。例えば、90% の確率で UL-MU 伝送の同時送信を無線端末数が 18 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 -40dB 以上の実装が必要になると推定される。

キーワード モンテカルロ法, 計算機実験, 802.11ax, 上り回線, マルチユーザ伝送, 無線端末, 送信電力制御

Experimental Study Based on Monte Carlo Method to Estimate the Reduction Range of Transmission Power Control at Client Terminals in IEEE 802.11ax Uplink Multi-User Transmission

Takashi MATSUDO[†] Masahiro UETANI^{††} Seitaro YAMASHITA[‡]

Mitsuyuki UTSUNOMIYA^{‡‡} and Yasushi CHIKARAISHI^{†‡}

† Advanced Technology Engineering Department 1, Business Development Division,

NetOneSystems Co., Ltd.

†† Advanced Technology Engineering Department 3, Business Development Division

‡, ‡‡ Advanced Technology Engineering Department 2, 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 To operate uplink multi-user transmission 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 showed that Monte Carlo method using random number generation based on the cumulative probability distribution of signal power data received from CLs was useful to estimate the reduction range of TPC at CLs. The usefulness of the Monte Carlo method became remarkable as the number of CLs increased.

Keyword Monte Carlo method, 802.11ax, Uplink, Multi-user transmission, Client terminals, Transmission power control

1. はじめに

本稿は、第 635 回 URSI-F 会合で発表した内容（以下前編と記載する）[1]の続編である。前編で今後の課題の 1 つとして認識していた、IEEE802.11ax（以下 11ax と記載する）規約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 5 台以上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、計算機実験（モンテカルロ法）を使って検討、及び推定した結果について述べている。

IEEE802.11 シリーズの無線 LAN の進化を、1 台の AP と複数の無線端末との関係から捉えると、2020 年 6 月頃に策定完了予定の無線 LAN の新しい規約の 11ax の特徴は、新たに UL-MU 伝送技術が採用されたことである[2]。IEEE802.11ac（以下 11ac と記載する）等の従来システムでは、上り回線はシングルユーザ伝送であった。しかしながら、無線端末や無線 LAN アクセスポイント（以下 AP と記載する）の数が増加した高密度・稠密な状況でも快適に無線 LAN 通信できるようにするために、11ax では新たに MU-MIMO や OFDMA における UL-MU 伝送技術が採用された。

UL-MU 伝送技術とは、複数の無線端末が、同一周波数チャネルで、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]。

前編では、屋内事務所環境で筆者らが日常的に利活用している社内無線 LAN の 11ac 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、及び 4 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明らかにした。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]、[5]。

前編で実施したデータ解析方法は、解析対象の AP（具体的には 5GHz 帯運用のサービスエリア形成が小セル、大セル、及び単一大セルの各セル）に複数の無線端末が接続している状況で、無線端末数が 2、3、及び 4 台の各場合になる組み合わせをすべて求め、AP における各無線端末の受信電力測定データからその各組合せにおける受信電力の差の発生状況を計算して、測定値として把握する方法であった。この計算は、収集した 3 か月間のすべてのデータについて実施した。このデータ解析方法は、単純な手順であり、理解しやすい。しかしながら、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 における複数の無線端末からの受信電力の差を把握するためのデータ解析の手間と演算時間も増加してきて、現実的な時間で対応できないことが顕著になった。

そこで、本続編では、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が増加した場合にも、無線端末で送信電力を低減する範囲の目安を容易に推定できることを期待して、別のデータ解析方法として、AP において受信した各無線端末の受信電力測定データの累積確率分布に従った乱数発生を利用した計算機実験（モンテカルロ法）[6]、[7]を使って検討を進めた。

第 2 章では、計算機実験の内容（実験方法等）を示す。第 3 章では、計算機実験を実施する際に課題になるサンプルサイズ（標本の大きさ）について検討する。第 4 章では、前編で実施したデータ解析方法による測定結果と、本続編で実施した計算機実験の結果を比較して示す。さらに、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が、7、9、及び 18 台の各場合の計算機実験の結果も示す。第 5 章では、計算機実験の結果について考察する。

2. 計算機実験（モンテカルロ法）の内容

2.1. 計算機実験の目的

屋内事務所環境で筆者らが日常的に利活用している社内無線 LAN の 11ac 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の累積確率分布に従った乱数発生を利用した計算機実験（モンテカルロ法）の方法が、UL-MU 伝送の同時送信を想定した複数の無線端末の AP における受信電力の差の発生状況を把握することに、有用であるか否かを見極める。

2.2. 計算機実験の方法

（1）本計算機実験における仮定とモンテカルロ法の特徴

本計算機実験では、AP において受信した各無線端末のすべての受信電力は、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。

モンテカルロ法とは、乱数を用いて、確率的に不規則な現象を計算機で再現する（シミュレーションする）実験である[6]、[7]。本検討は、確率的に不規則な現象、即ち、AP における複数の無線端末の受信電力の差の発生状況を計算機で再現する実験になるが、その際に用いる乱数は、AP において受信した各無線端末の受信電力測定データの累積確率分布に従って発生させることが特徴である[8]、[9]、[10]。

前編で実施したデータ解析方法は、解析対象の AP（具体的には 5GHz 帯運用のサービスエリア形成が小セル、大セル、及び単一大セルの各セル）に複数の無

線端末が接続している状況で、無線端末数が2, 3, 及び4台の各場合になる組み合わせをすべて求め、APにおける各無線端末の受信電力測定データからその各組合せにおける受信電力の差の発生状況を計算して、測定値として把握する方法であった。この計算は、収集した3か月間のすべてのデータについて実施した。

一方、続編の本検討で実施する計算機実験(モンテカルロ法)を使ったデータ解析方法は、3か月間に収集されたAPにおいて受信した各無線端末の受信電力測定データのすべてをひとまとめの母集団として扱い、その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ことを基礎にする。

UL-MU 伝送の同時送信を想定した複数の無線端末のAPにおける受信電力は、この母集団の累積確率分布に従う乱数として抽出した複数のサンプル(標本)である。例えば、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が x 台の場合、各無線端末の受信電力値は、母集団の累積確率分布に従う x 個の乱数の値になる。

(2) 母集団の累積確率分布

前編の図3のAP1の小セルにおいて3か月間に収集された各無線端末の受信電力のすべての測定データをひとまとめの母集団として扱った場合の無線端末の受信電力の累積確率分布を、図1に示す。母集団に含まれる受信電力の測定データ数は、676個である。

なお、この676個の受信電力の測定データ数は、小セルに接続した無線端末の延べ数が676台であるということと等価である。図2は、小セルに接続した無線端末の延べ数676台について、受信電力が測定された時に小セルに接続していた無線端末数は何台であったか、また、その発生数が何回であったかという視点で示している。同図に示された発生数の合計は前編の2.3節(4)(Step1)で述べたデータ数(測定回数)70であり、また、同図に示された小セルに接続していた無線端末数と発生数の積の合計が小セルに接続した無線端末の延べ数676台である。

(3) 計算機実験の手順

(Step1) 計算機で一様乱数を発生させる。

(Step2) 上記(Step1)で発生させた一様乱数の累積確率値に等しくなる図1の縦軸の値、即ち、母集団の累積確率値を求め、これに対応する図1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。

(Step3) 上記(Step1)と(Step2)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。

(Step4) 上記(Step3)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

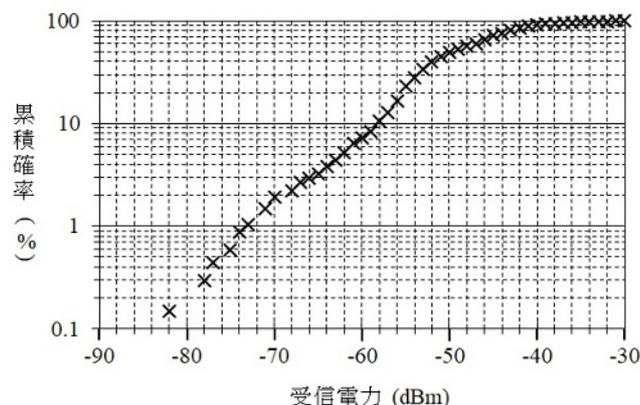


図1 母集団(前編[1]の図3のAP1の小セルにおいて3か月間に収集された各無線端末の受信電力測定データ(データ数676個))の累積確率分布

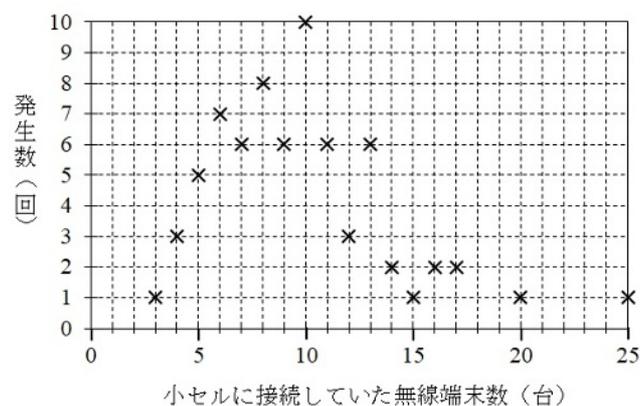


図2 母集団に含まれる受信電力データが測定された時に小セルに接続していた無線端末数の状況とその発生数

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。

(Step5) 上記(Step4)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、設定したサンプルサイズ(標本の大きさ)になるまで、上記(Step1)から(Step4)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。

(Step6) 上記(Step5)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. サンプルサイズ (標本の大きさ) の検討

計算機実験を実施する際に、2.2 節 (3) (Step5) におけるサンプルサイズ (標本の大きさ) を、いくつに設定するかが課題である。そこで第 3 章では本課題を、前編の図 6 や図 9 に示された小セルにおける測定結果と、サンプルサイズを変化させて得られた本続編における計算機実験結果を比較することで検討する。

3.1. 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

図 3 には、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) について、前編で得られた測定値と計算機実験値の比較 (= 差) を累積確率が 1, 10, 50, 90, 及び 100% の部分に着目して示す。なお、前編の第 3 章で述べたように無線端末の受信電力の差としての測定値のデータ数は、無線端末の組み合わせ総数 (= 累積確率が 100% の場合の総数) の 3477 通りである [1]。この 3477 通りは、図 2 の横軸が 2 台以上の各発生状況の場合に、2 台の無線端末を取り出す組み合わせの総数である。

一方、計算機実験におけるサンプルサイズは、500, 5000, 10000, 及び 100000 の各場合に設定した。また、各サンプルサイズにおいて 5 回の計算機実験を実施し、その平均値を図 3 における計算機実験値とした。

累積確率が 50% 以上、即ち、無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲が小さい場合には、前編で得られた測定値と計算機実験値の差は 1dB 以下になっている。一方、累積確率が 50% 未満、即ち、無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲が大きい場合には、前編で得られた測定値と計算機実験値の差はおおよそ、4dB, 及び 8dB, とその差が増加している。

サンプルサイズの違いに対して、前編で得られた測定値と計算機実験値の差には顕著な変化はない。しかしサンプルサイズが大きいほうが、その差は小さくなる傾向がやや見られるのでサンプルサイズは大きいほうが、望ましいと考えられる。

3.2. UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 4 台の場合

図 4 には、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 4 台の場合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) について、前編で得られた測定値と計算機実験値の比較 (= 差) を累積確率が 1, 10, 50, 90, 及び 100% の部分に着目して示す。なお、前編の第 3 章で述べたように無線端末の受信電力の差としての測定値のデータ数は、無線端末の組み合わせ総数 (=

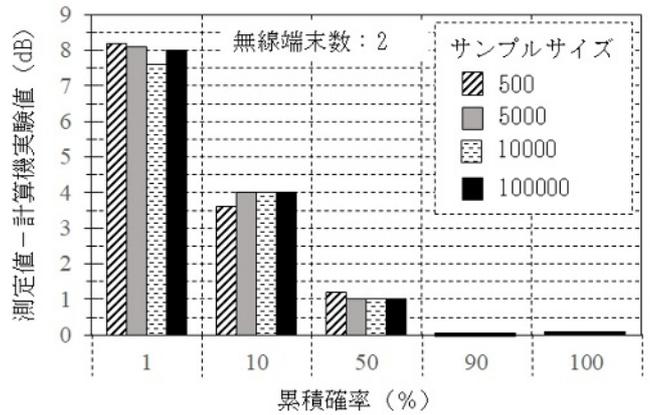


図 3 無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) について、測定値と計算機実験値の比較 (= 差)

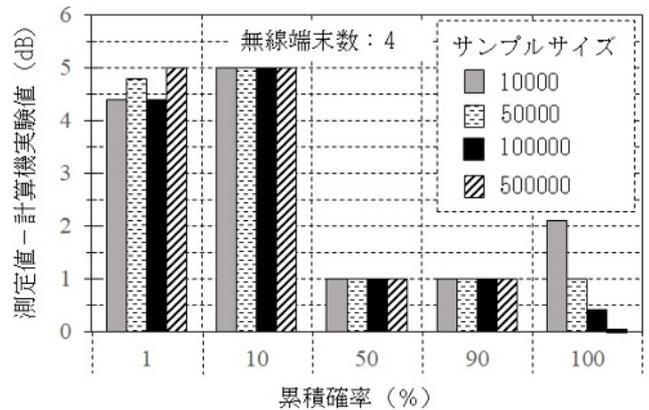


図 4 無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) について、測定値と計算機実験値の比較 (= 差)

累積確率が 100% の場合の総数) の 40776 通りである [1]。この 40776 通りは、図 2 の横軸が 4 台以上の各発生状況の場合に、4 台の無線端末を取り出す組み合わせの総数である。

一方、計算機実験におけるサンプルサイズは、10000, 50000, 100000, 及び 500000 の各場合に設定した。また、各サンプルサイズにおいて 5 回の計算機実験を実施し、その平均値を計算機実験値とした。

累積確率が 50% 以上、即ち、無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲が小さい場合には、前編で得られた測定値と計算機実験値の差はおおよそ、1dB 程度である。一方、累積確率が 50% 未満、即ち、無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲が大きい場合には、前編で得られた測定値と計算機実験値の差はおおよそ、5dB 程度に増加している。

サンプルサイズの違いに対して、前編で得られた測

定値と計算機実験値の差には顕著な変化はない。しかしサンプルサイズが大きいほうが、その差は小さくなる傾向がやや見られるのでサンプルサイズは大きいほうが、望ましいと考えられる。

3.3. 標本誤差とサンプルサイズの関係式からの考察

3.1 節と 3.2 節の結果から、計算機実験におけるサンプルサイズ、即ち、2.2 節 (3) の(Step1)から(Step4)の繰り返し回数、は、100000 = 10 万回あれば良いと割り切ってしまうことも一案であるとも考えられる。

ここで、前編と本続編では、複数の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) を累積確率として把握するが、累積確率は比率として理解できることに気づく。

そこで、本検討に対して、視聴率等の比率を標本調査したときの標本誤差とサンプルサイズの関係式 [11] を参考にして考察してみる。

標本誤差 d とサンプルサイズ n の関係式は、次の式 (1) で表される。

$$d = 2 \sqrt{\frac{(N-n)p(1-p)}{N-1} \frac{1}{n}} \quad (1)$$

ここで、

N : ある母集団に含まれるすべての調査対象数

n : 標本として母集団から抽出した調査対象数 = サンプルサイズ

p : 調査事項の比率

d : 調査事項の比率 p に付随する標本誤差。真の値が 95% の確率で存在する比率の範囲が $p \pm d$ である。なお、 d は、 $p = 0.5$ のときに最大になる。

式(1)の考え方を本検討に対応させると、式(1)の各変数は次のように解釈できる。

N : UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末の数が x 台となる組み合わせ総数。この組み合わせ総数は、前編の図 3 の AP1 の小セルにおいて 3 か月間に収集された各無線端末の受信電力の測定データ (2.2 節 (2) で述べたようにデータ数は、676) について、図 2 に示す小セルに接続していた無線端末数とその発生数の状況に対応して計算できる。例えば、 $x = 2$ のときは 3.1 節で述べたように $N = 3477$ 通り、 $x = 4$ のときは 3.2 節で述べたように $N = 40776$ 通りである。

n : UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が x 台の場合における 2.2 節 (3) の(Step1)から(Step4)の繰り返し回数、即ち、図 1 の累積確率分布に従った乱数から導かれた複数の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) の個

表 1 サンプルサイズと標本誤差

UL-MU 伝送数	組み合わせ総数	サンプルサイズ $n = 10$ 万回の計算機実験結果の累積確率 $p = 50\%$ に付随する標本誤差
x (台)	N (通り)	d (%)
7	64万9433	0.29
9	229万6830	0.31
18	48万890	0.28

数 (= サンプルサイズ)。

p : UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が x 台の場合に、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) がある値になる累積確率

d : 累積確率 p に付随する標本誤差。真の値が 95% の確率で存在する累積確率の範囲が $p \pm d$ である。なお、 d は、 $p = 0.5$ のときに最大になる。

上記の解釈に基づいた検討結果の例を表 1 に示す。UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数 x が、7、9、及び 18 台の場合に、サンプルサイズ n が 10 万回の計算機実験を実施したときの累積確率 50% に付随する標本誤差 d (%) を式(1)によって計算した結果を表 1 に示す。

ここで、無線端末数 $x = 7$ 台を想定した理由は、市販の法人向け 11ax 対応 AP で 8 つの送受信部 (アンテナも含む) を具備する製品が登場しているからである [12]。8 つの送受信部 (アンテナも含む) を具備する AP が MU-MIMO における空間多重を適切に動作させるためには、無線端末数は 7 台以下が推奨されると考えられる。また、無線端末数 $x = 9$ 台を想定した理由は、11ax 対応 AP が周波数チャネル幅 20MHz において OFDMA を動作させたときに同時伝送可能な無線端末数が 9 台以下になるからである [13]。さらに、無線端末数 $x = 18$ 台を想定した理由は、11ax 対応 AP が周波数チャネル幅 40MHz において OFDMA を動作させたときに同時伝送可能な無線端末数が 18 台以下になるからである [13]。

なお、表 1 の組み合わせ総数 N は、UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が x 台の場合に、図 2 の横軸が x 台以上の各発生状況において、 x 台の無線端末を取り出す組み合わせの総数である。

表 1 から累積確率 $p = 50\%$ 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) は、サンプルサイズ $n = 10$ 万回の計算機実験結果では、累積確率が $50 \pm 0.3\%$ (= 49.7% から 50.3%) 程度の標本誤差 (あいまいさ、幅) を有すると理解できる。

標本誤差は比率が 0.5 ,即ち ,累積確率が 50% の場合に最大になるが ,表 1 から理解できること及び ,3.1 節と 3.2 節の結果の両方を総合的に判断して ,本続編の計算機実験におけるサンプルサイズは ,10 万回に設定してデータ解析を進めることにした .

4. 計算機実験の結果

図 5 には ,UL-MU 伝送の同時送信する無線端末数が 2 台の場合を想定して ,小セルを形成する 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) の累積確率を ,計算機実験値 (× 印) と前編で得られた測定値 (○ 印) について示す .

図 6 には ,UL-MU 伝送の同時送信する無線端末数が 4 台の場合を想定して ,小セルを形成する 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) の累積確率を ,計算機実験値 (× 印) と前編で得られた測定値 (○ 印) について示す .

図 7 には ,計算機実験値として ,UL-MU 伝送の同時送信する無線端末数が 7 , 9 , 及び 18 台の場合を想定して ,小セルを形成する 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) の累積確率を ,無線端末数が 7 (○ 印) , 9 (× 印) , 及び , 18 (△ 印) 台の場合について示す . また , 図 8 には , 図 7 の縦軸を線形目盛に変更して示す .

計算機実験は ,ノート型パソコン (OS:Windows8.1 , CPU のクロック周波数:2.2GHz , RAM 容量:4GB) 上の Excel-VBA で作成したプログラム [6] で実施したが ,例えば ,UL-MU 伝送の同時送信する無線端末の想定数が 9 台の場合 ,計算機実験 (サンプルサイズ 10 万回) の結果 ,即ち ,累積確率が判明するまでの演算時間は ,約 90 秒間であった . また , 同想定数が 18 台の場合 , 同演算時間は , 約 180 秒間であった .

なお , 前編で実施したデータ解析方法の試行テスト時の演算時間の一例として , 無線端末数 24 台が小セルに接続している 1 つのデータ測定状況において , UL-MU 伝送の同時送信する無線端末の想定数が 8 台になる組み合わせ (73 万 5471 通り) を求めるのに , 15 分間必要であった . 最終的な累積確率を求めるためには , 複数の無線端末が小セルに接続している複数のデータ測定状況 (前編の 2.3 節 (4) (Step1) で述べたようにデータ数 70) において , 上記の組み合わせを順次求める必要があるが , これには現実的な時間で対応できないと判断した . 従って , 演算時間の視点からは , 計算機実験のほうが有用である .

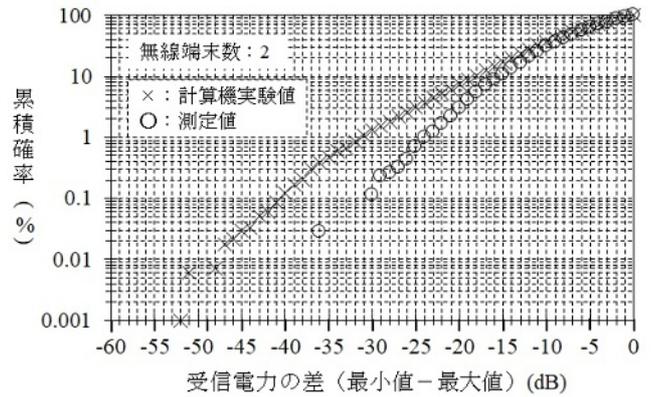


図 5 AP (小セル) における各無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) の累積確率

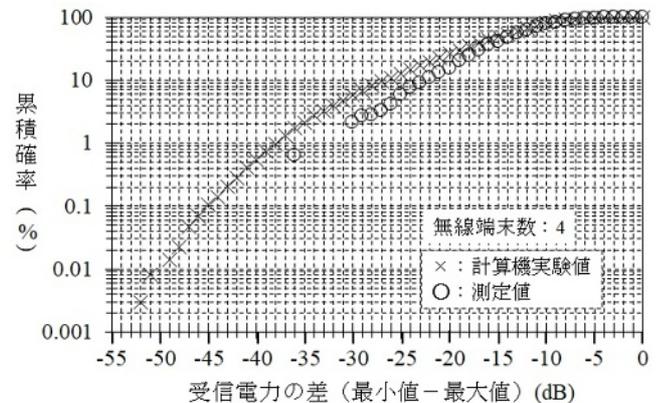


図 6 AP (小セル) における各無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) の累積確率

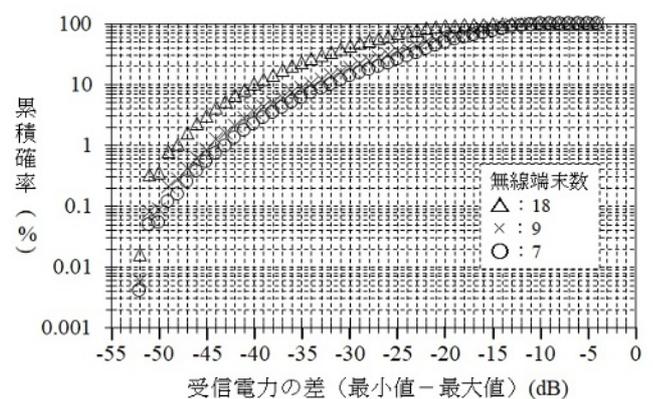


図 7 計算機実験 (サンプルサイズ = 10 万回) の結果 . AP (小セル) における各無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) の累積確率

5. 考察

5.1. 計算機実験値と前編[1]で得られた測定値における累積確率の比較

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, 3.1 節でも述べたが, 図 5 から, 累積確率が大きい, 即ち, 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲が小さい場合には, 計算機実験値と前編で得られた測定値との差は小さく, 一方, 累積確率が小さい, 即ち, 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲が大きい場合には, 計算機実験値と前編で得られた測定値との差が増加していることがわかる. この傾向は UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 4 台の場合の図 6 でも, 同様である.

累積確率が小さくなるに従い, 計算機実験値と前編で得られた測定値との差が増加している明確な理由は不明である. その理由の 1 つの考え方としては, 2.2 節(1)で述べた本検討における仮定が成り立たないということではなく, 図 1 の累積確率分布 (= 3 か月間に収集された AP において受信した各無線端末の受信電力測定データによって構成された母集団の確率的な特徴) に従う乱数を使ったサンプルサイズ 10 万回の計算機実験では, 前編で得られた測定値では未発生状況(無線端末の組み合わせ)が再現されていて, その状況が発生する可能性があることを示しているとも考えられる.

図 5 と 6 を参照すると, 計算機実験の結果からは, 前編で得られた測定結果よりも, UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲がさらに広がる(深くなる)と理解できる. 計算機実験だからこそ判明したこの知見は, 採用する無線端末の仕様や性能に, より一層の注意を払う必要があると気が付けてくれているので, 無線 LAN の構築や運用の実務の視点からは, とても有益である.

5.2. UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 7, 9, 及び 18 台の場合

(1) 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 7 と 8 からは, UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 7 (○印), 9 (×印), 及び, 18 (△) 台と増加すると, 小セルを形成する 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, 前編の図 6 と 9 で示された UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 2, 3, 及び 4 台と増加した場合に見られた傾向[1]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 7, 9, 及び, 18 台の各場合で, 同じサン

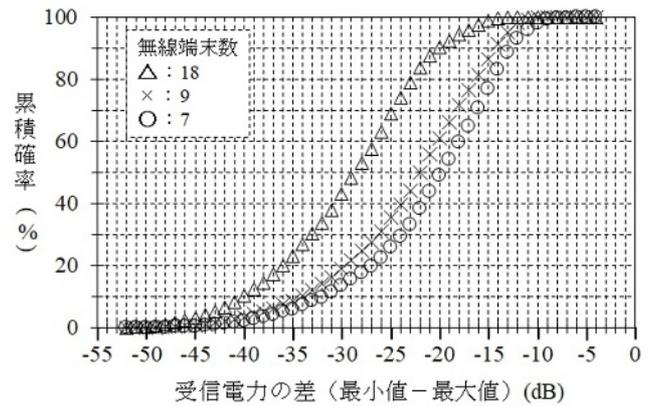


図 8 計算機実験 (サンプルサイズ = 10 万回) の結果。AP (小セル) における各無線端末の受信電力の差 (最小値 - 最大値 = 無線端末で送信電力を低減する場合の最大範囲) の累積確率 (線形目盛)

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, 無線端末数が 7, 9, 及び, 18 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無線端末での送信電力を低減する目安

前編で述べたように, 確実に安定した 11ax の 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 7 や 8 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.

小セルにおいて, UL-MU 伝送の同時送信を想定した無線端末数が 7 台の場合 : -32dB

同 9 台の場合 : -34dB

同 18 台の場合 : -40dB

例えば, 無線端末における送信電力制御の低減範囲が -32dB 以上の実装ならば, 90% の確率で UL-MU 伝送の同時送信が可能となるのは, 無線端末数が 7 台までとなり, 無線端末数が 8 台以上の場合には, 90% の確率で UL-MU 伝送することは, あきらめる必要があると推定される.

例えば, 90% の確率で UL-MU 伝送の同時送信を無線端末数が 18 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 -40dB 以上の実装が必要になると推定される.

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。

6. まとめ

確実に安定した11axのUL-MU伝送を実現するためには、APにおける各無線端末からの受信電力を揃える必要があり、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。しかしながら、無線端末で送信電力を低減する範囲は、どのくらいが現実的に妥当であるかは不明であるので、それを探る検討を前編で実施したが、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、データ解析の手間と演算時間も増加してきて、現実的な時間で対応できないことが顕著になった。

そこで、本続編では、UL-MU伝送の同時送信を想定した無線端末数が増加した場合にも、無線端末で送信電力を低減する範囲の目安を容易に推定できることを期待して、別のデータ解析方法として、小セルを形成するAPにおいて受信した各無線端末の受信電力測定データの累積確率分布に従った乱数発生を利用した計算機実験（モンテカルロ法）を使って検討を進め、本計算機実験（モンテカルロ法）が有用であることがわかった。

本計算機実験（モンテカルロ法）の検討で得られた主な知見は、次のとおりである。

(1) 計算機実験によって、UL-MU伝送の同時送信を想定した無線端末数が増加した場合にも、無線端末で送信電力を低減する範囲の目安を、現実的な演算時間で把握できた。

例えば、UL-MU伝送の同時送信する無線端末の想定数が18台の場合、ノート型パソコン(OS:Windows8.1, CPUのクロック周波数:2.2GHz, RAM容量:4GB)上のExcel-VBAで作成したプログラムで実施した計算機実験(サンプルサイズ10万回)の結果、即ち、累積確率が判明するまでの演算時間は、約3分間であった。

(2) 計算機実験の結果では、前編で得られた測定値では未発生の状況(無線端末の組み合わせ)が再現されていて、その状況が発生する可能性があることを示しているとも考えられた。従って、計算機実験だからこそ判明したこの知見は、採用する無線端末の仕様や性能に、より一層の注意を払う必要があると気がつかせてくれているので、無線LANの構築や運用の実務の視点からは、とても有益である。

(3) 例えば、90%の確率でUL-MU伝送の同時送信を無線端末数が18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-40dB以上の実

装が必要になると推定される。

今後の課題は、大セルや単一大セルを形成するAPにおいて受信した各無線端末の受信電力測定データの累積確率分布に従った乱数発生を利用した計算機実験（モンテカルロ法）でも、小セルを形成するAPによる本検討結果と同様になるかを確認することである。

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ン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、古森浩一シニアエキスパート、田牧英司エキスパート、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太野奈津子様、竹林百合香様、Ajithkumar Somasundaram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。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ン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ン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副本部長、同本部第1応用技術部の藤田雄介部長、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 Nov.19, 2019.
- [2] 松戸孝, "とある技術者から無線LAN製品メーカー殿への手紙 ~ 聖徳太子の伝説と新規約IEEE802.11axの課題 ~", ネットワンシステムズ ネットワンプログ, <https://gblog.netone.co.jp/20190719-1/>, 2019年7月19日, 参照 Nov.19, 2019.
- [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 Nov.19, 2019.
- [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帯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 Nov.19, 2019.
- [5] 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 ~", ネットワンシステムズ, <https://www.netone.co.jp/report/column/column1/20190904.html>, 2019年9月4日, 参照 Nov.19, 2019.
- [6] 加藤潔, "Excel 環境における Visual Basic プログラミング", 共立出版, 1999年8月10日.
- [7] 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 Nov.19, 2019.
- [8] 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 Nov.19, 2019.
- [9] 唐沢好男, "改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎", コロナ社, 2016年3月3日.
- [10] 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, "情報量統計学", 共立出版, 2008年9月25日.
- [11] 総務省 統計局, "標本調査とは? ~ 調査のしくみと設計 ~ 標本誤差 どのくらいの標本を調べればいいのか? ", 統計学習の指導のために (先生向け) 補助教材, <http://www.stat.go.jp/teacher/c2hyohon.html>, 参照 Nov.19, 2019.
- [12] Cisco systems, "Cisco Catalyst 9130 Series Access Points Data Sheet", <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/catalyst-9100ax-access-points/nb-06-cat-9130-ser-ap-ds-cte-en.html>, Nov.5, 2019, 参照 Nov.19, 2019.
- [13] 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 帯 11-2 IEEE802.11ax の導入に向けた検討", http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/02kiban12_04000218.html, 2018年7月27日, 参照 Nov.19, 2019.