

法人ネットワークホワイトペーパーシリーズ

革新的なネットワーク構築： ビジネスシーンを変革するWi-Fi 7 (全5回)

第3回 止まらないWeb会議を実現するWi-Fi 7
【リアルタイムの実現】



Wi-Fi
7

Wi-Fi
6

Increased Speed
and
Capacity

Lower
Latency

Improved
Efficiency

— 目 次 —

1) はじめに	02
2) 遅延、ジッタの発生例(オフィス内)	02
3) 遅延、ジッタが発生する原因	04
A) CSMA/CA	04
B) 外部システムからの干渉波	06
4) Wi-Fi 7でどのように遅延、ジッタが改善されるか	06
A) SMA/CA以外のアクセス方式の導入	06
I. OFDMA/MRU	
II. MU-MIMO	
B) 干渉波の影響抑制	11
I. MLO	
II. Preamble Puncturing	
III. チャンネル選択枝の増大	
5) まとめ	13

本文書は、エレコム株式会社が、特定の商品に関する機能・性能や技術についてより深く理解をしていただくため作成した技術解説参考資料となります。当該商品の利用という目的の範囲内で自由に使用、複製をしていただけますが、当社の事前の書面による承諾なしに、改変、掲示、転載等の行為は禁止します。また、あくまで参考資料であり、内容については一切保証を致しません。なお、当社サポートセンターでは内容に関するお問い合わせは承っておりません。以下の内容をご了承いただいた場合のみご利用ください。(1)当社は、本文書によりいかなる権利の移転もしくはライセンスの許諾、またはいかなる保証を与えるものではありません。(2)当社は、本文書について、有用性、正確性、特定目的への適合性等のいかなる保証をするものではありません。(3)当社は、本文書を利用したこと、または利用しなかったことにより生じるいかなる損害についても責任を負うものではありません。(4)当社は、本文書の内容を随時、断りなく更新、修正、変更、削除することがあります。最新の商品情報については、<https://www.elecom.co.jp/>をご覧ください。



1)はじめに

これまでビジネスシーンで利用される無線LANは、メールや資料送信等が中心だったため、遅延やジッタを意識することはありませんでした。しかし、現在ではWeb会議やウェビナーがビジネスシーンで当たり前のように利用され、これまでより遅延、ジッタ特性が利用者の満足度に大きく影響を及ぼすようになってきました。このような背景から、IEEE802.11beの検討をIEEE802.11WGで開始する際に、目標を定めた文章であるPAR(Project Authorization Request)にも、「遅延・ジッタを低減する」という文言が明記されました。

第3回では、Wi-Fi 7をWeb会議といったリアルタイムアプリケーションの切り口から見ていきます。

まず、遅延、ジッタとはどのようなものかイメージをつかんでいただくためにPingコマンドを使って遅延、ジッタを評価した実例を紹介します。次にジッタ、遅延の発生原因について整理します。最後にそのような原因による特性劣化がどのように低減されるかを示します。

2)遅延、ジッタの発生例(オフィス内)

無線LANの場合、遅延はある地点を発した信号が所望の地点に到達するまでにかかる時間、ジッタはその揺らぎと言う事ができます。無線LANでの許容値は、一般的に遅延は100ms程度、ジッタは30ms程度が目安とされています。本稿では主にWeb会議を想定していますが、例えばスポーツの生中継を見る場合等は、要求値はもっと厳しくなります。

遅延、ジッタについては無線LAN部で発生する以外に、MPEG2/4やH.264等をつかった動画の圧縮、解凍にかかる時間や有線ネットワーク部の伝送遅延、トラフィックの状況の影響など、始点から終点まですべてを考慮する必要がありますが、本稿では無線端末からアクセスポイントまでの遅延、ジッタに注目して説明します。図3-1にPingコマンドを使った遅延、ジッタ測定の実験図を示します。

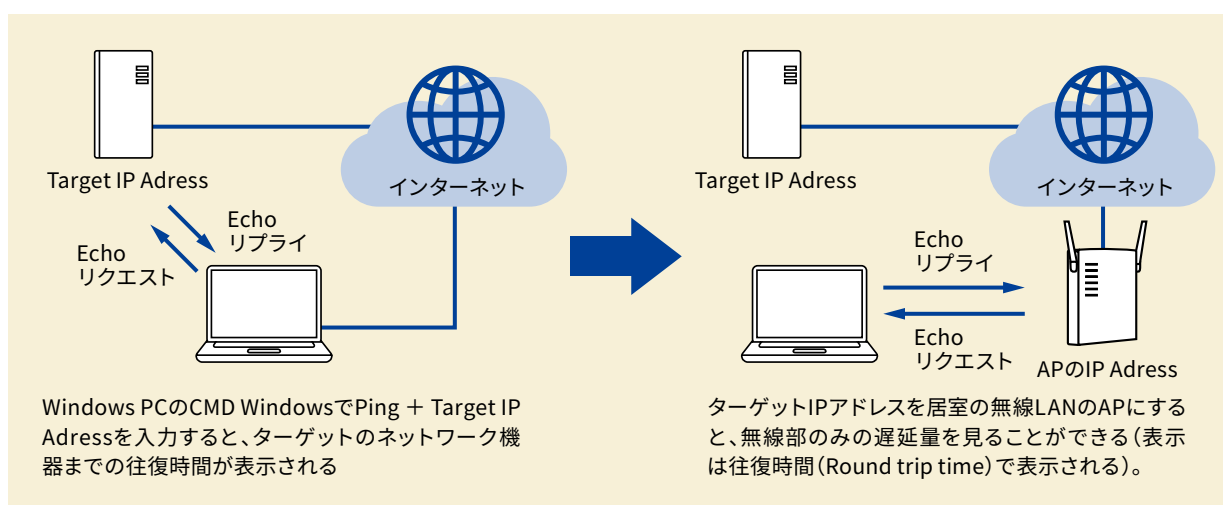


図3-1 Pingコマンドによる遅延測定の仕組み

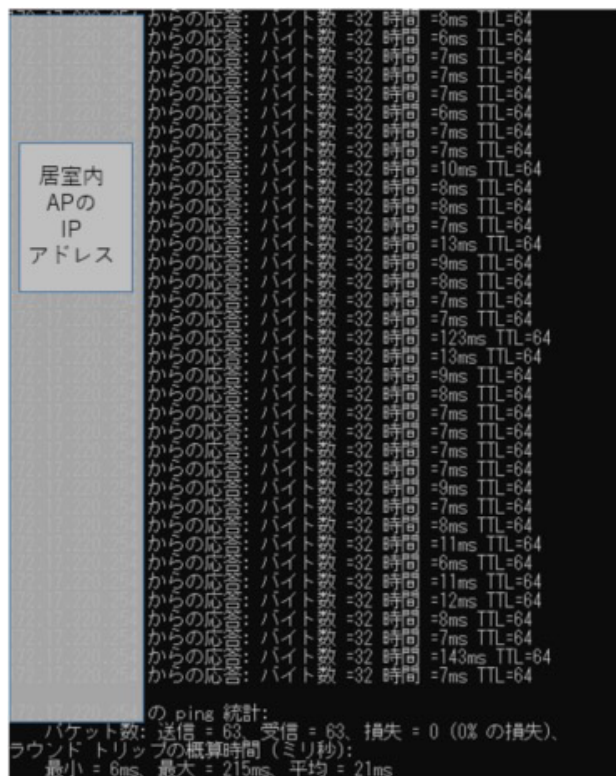
Pingコマンドは、WindowsのコマンドプロンプトからPing + [Target IP Address]と打つことによって、ターゲットのネットワーク機器との往復時間がわかります(図3-1の左)。このPingコマンドのターゲット機器をアクセスポイントにすることにより、無線LAN部分の遅延量がわかります(図3-1の右)。

図3-2に測定結果(左)と測定諸元(右)を示します。

図3-2左のPC画面のコピー部の一番右の列にTTLとあるのはTime to Lifeの略で、Pingコマンドがネットワーク機器を通過するたびに数字が1つ減る値となります。ゼロになるとそのパケットは破棄されます。初期値は機器のOS等により変わりますが、今回は初期値が64でした。Pingターゲット機器の無線LAN APとPingコマンドを実施したNote PCとの間にネットワーク機器が無いため、TTLも64となっています。

結果を見ると往復時間の最小値は6ms、最大値は215ms、平均値は21msとなりました。これほど無線LANの区間を通過するのにばらつく原因は何でしょうか。無線LANシステム内のばらつく主要因は、無線LANで採用しているCSMA/CAというアクセス方式にあります。また、無線LANシステム以外の主要因として干渉があります。この2つについて解説します。

■コマンドプロンプト



Pingコマンドによる遅延、ジッタ測定例

場所: 定員20名程度のオフィス
 状況: 朝、10名程度が勤務
 内容: PingコマンドによりNote PCと
 居室内に設置されているAP間通信の
 往復時間を測定
 測定: Windows PCのCMD窓で、以下の
 コマンドを実施
 Ping-t<APのIPアドレス>
 10秒後程度で測定を終了。結果を左に記載
 結果: 最小6ms、最大215ms、平均21ms

図3-2(居室)の遅延、ジッタ測定例



3)遅延、ジッタが発生する原因

A)CSMA/CA

無線LANでは1つのチャンネルを複数の端末で共用するためのアクセス方式としてCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)を採用しています。なんの規則もなく複数の端末がチャンネルを使おうとすると、電波がぶつかり(輻輳)、通信が出来なくなります。そこで複数の端末が時間をずらしてチャンネルを共用する為に、CSMA/CAというアルゴリズムを用いています。キャリアセンス(CS)とは、信号を出す前にチャンネルに他の端末が信号を出していないかモニター(これをセンスという)することです。信号がないことを確認したら信号を送信しますが、その際、疑似ランダム信号により端末ごとに信号を出し始める時間をずらすメカニズムが実装されています。せっかくキャリアセンスしても、同じタイミングで信号を出しては衝突してしまうからです。これがCA:Collision Avoidance(衝突防止)です。図3-3にCSMA/CAでどのように衝突を防止して、チャンネルを複数の端末で共有しているかの例を示します。衝突のメカニズムがわかりやすい様に、単純化をしています。

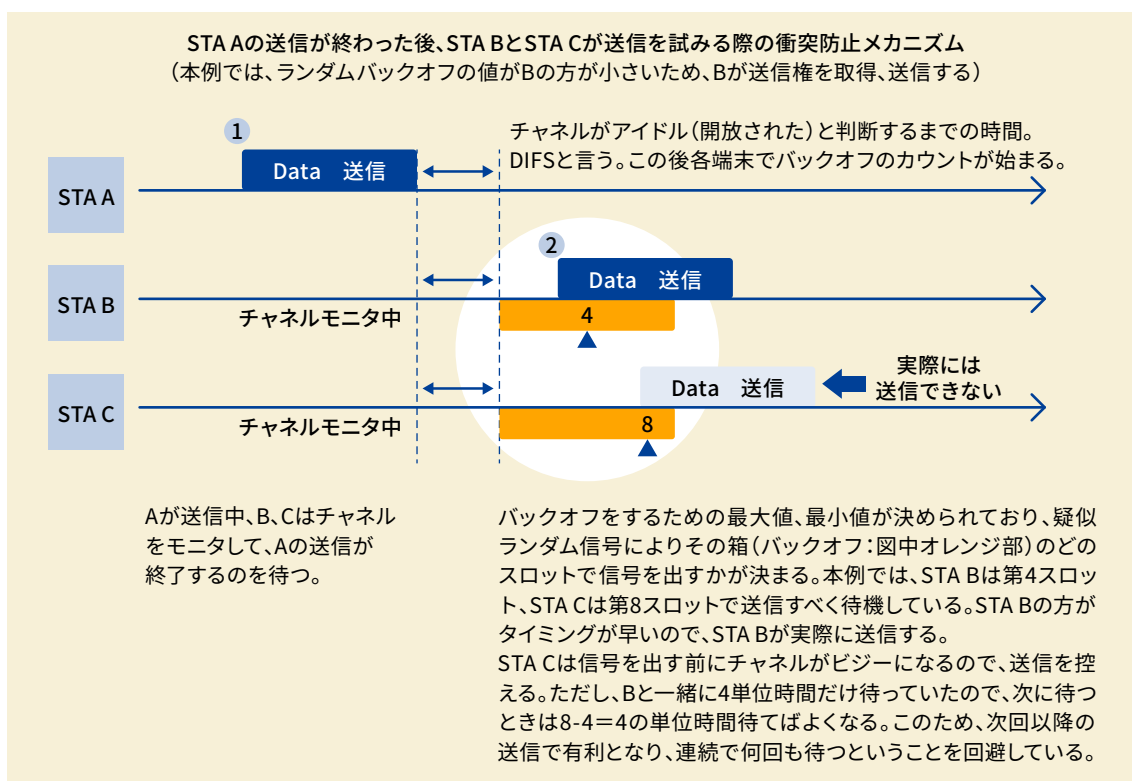


図3-3 CSMA/CAにおける衝突回避のメカニズム

簡単にするために、APに3台端末が接続しているとします。その中で端末Aは送信中です(図中①のタイミング)。端末B、Cはチャンネルをモニターしているので自分が送信したい信号を送信せずに待機しています。Aの送信終了を確認したら、内蔵しているバックオフタイマーを作動させて、タイマーの値がゼロになったら送信を開始します(図中②のタイミング)。このバックオフタイマーとは、ネットワーク通信における競合を防ぐために、各端末がランダムに設定する待機時間のことです。図の場合ではCのタイマーの設定値の方がBより長いので、Bに送信権を奪われ引き続き待機状態が続きます。ただし、Bと一緒に待っている間だけタイマーは進んでいますので、次にチャンネルが空いた時にバックオフして待たなければならない時間は減ります。このようなメカニズムを入れることにより、送信タイミングの獲得に際し、著しく有利になったり不利になったりする端末が出ないようにしています。図3-3だけでもCSMA/CAによるジッタ発生メカニズムにはなっていますが、実はジッタの値をもっと大きくする理由があります。それは、収容端末の増加です。収容端末が増えてくると、ランダムバックオフのメカニズムを入れても衝突が発生する確率が高くなり、よりジッタ量が増えてきます。図3-4でその仕組みについて説明します。

図3-4の左側はほぼ図3-3と同じで、STA Aが送信して、STA B、Cが送信待機中です(図中①のタイミング)。STA Aの送信が終わると、待機していたSTA B、Cが送信を試みようとして、図3-3と異なるのは、待機していたSTA B、Cでバックオフのタイミングが同じであることです(図中②のタイミング)。端末数が多い場合にこのようなことが起きやすくなります。図では、仮に2つの子機のバックオフのタイミングが4と表示しています。輻輳を起こすと再度送信をし直すこととなります。しかし、このままだとまた輻輳を起こす可能性が高いため、バックオフの為の窓(CW: Contention Window)をほぼ倍にします(図中③のタイミング)。この為、輻輳が起こる確率は下がりますが、遅延量が大きくなります。注目していただきたいのは、このバックオフするための窓の長さが2のべき乗で増えていくという事です。例えば3回連続して衝突したら2の3乗で、8倍長い時間になってしまいます。この為、収容端末数が増えるほど遅延やジッタが急激に大きくなってしまいます。

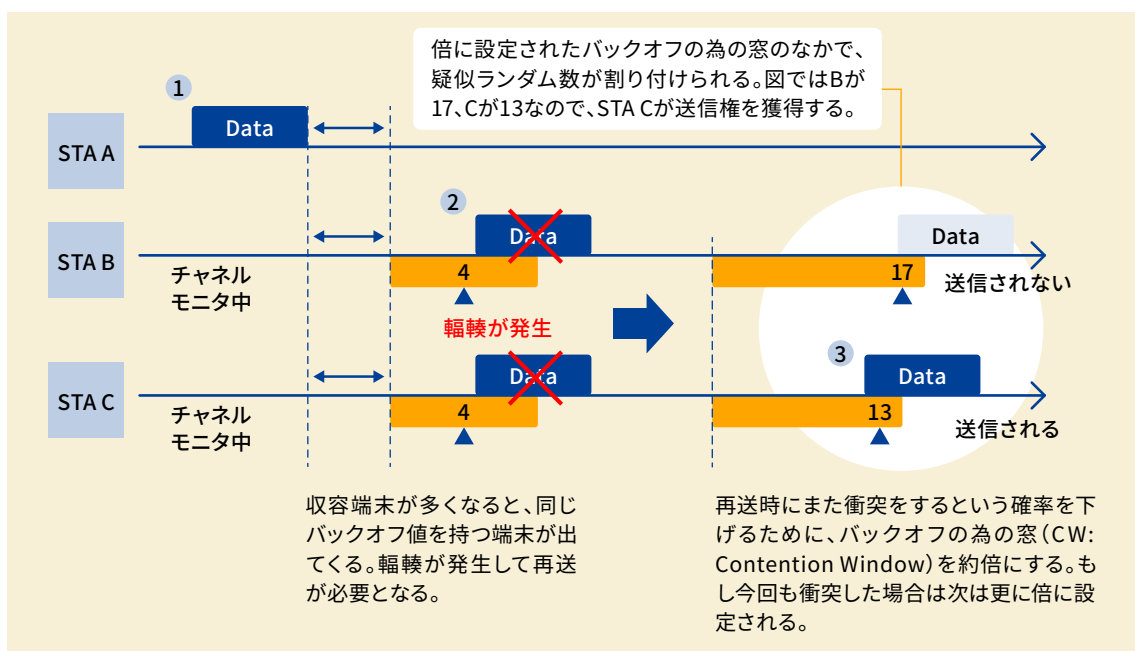


図3-4 収容端末数が増えた時に発生するCSMA/CAの問題点

B) 外部システムからの干渉波

前節では無線LANシステムのアクセス方法に起因する遅延、ジッタについて見てきましたが、干渉波によっても遅延、ジッタが増大します。通信信号にノイズ(干渉波)がかぶさり、うまく信号を復号できなくなり、再送が発生するからです。無線LANではあっても自分が所属しているBSS(Basic Service Set) 外、即ちOBSS(Overlapped BSS) からの干渉波と、無線LAN以外からの干渉波に分けられます。2024年現在無線LANは2.4GHz帯、5GHz帯、6GHz帯の3つの周波数帯が使用可能ですが、干渉源は周波数帯域によって異なります。

4) Wi-Fi 7でどのように遅延、ジッタが改善されるか

A) CSMA/CA以外のアクセス方式の導入

I. OFDMA/MRU

無線LANといえばCSMA/CAですが、前節で見たように、収容端末数が増えることで性能が極端に落ちていきます。そこで考えられたのがマルチアクセス方式をハイブリッドにすることです。無線LANの品質向上に用いられたのが周波数軸上のFDMA(Frequency Division Multiple Access)です。

11a, 11gでOFDMが無線LANに初めて採用されました。OFDMはOrthogonal Frequency Division Multiplexing(直交周波数分割多重)の略で、あくまでシングルアクセス(1対1通信)です。これが、Wi-Fi 6になってOFDMAが追加されました。英語の省略形で書くと最後にAが付いただけですが、最後のMのMultiplexingが、MA: Multiple Accessとなり、多重アクセスの意味になります。OFDMAはFDMAの一種です。無線LANのベースとしてCSMA/CAを残しつつ、そこで使用されるOFDMシンボルのサブキャリアの束を複数に分割し、同時複数通信を実現しています。

図3-5にOFDMとOFDMAの違いについて概念図を示します。

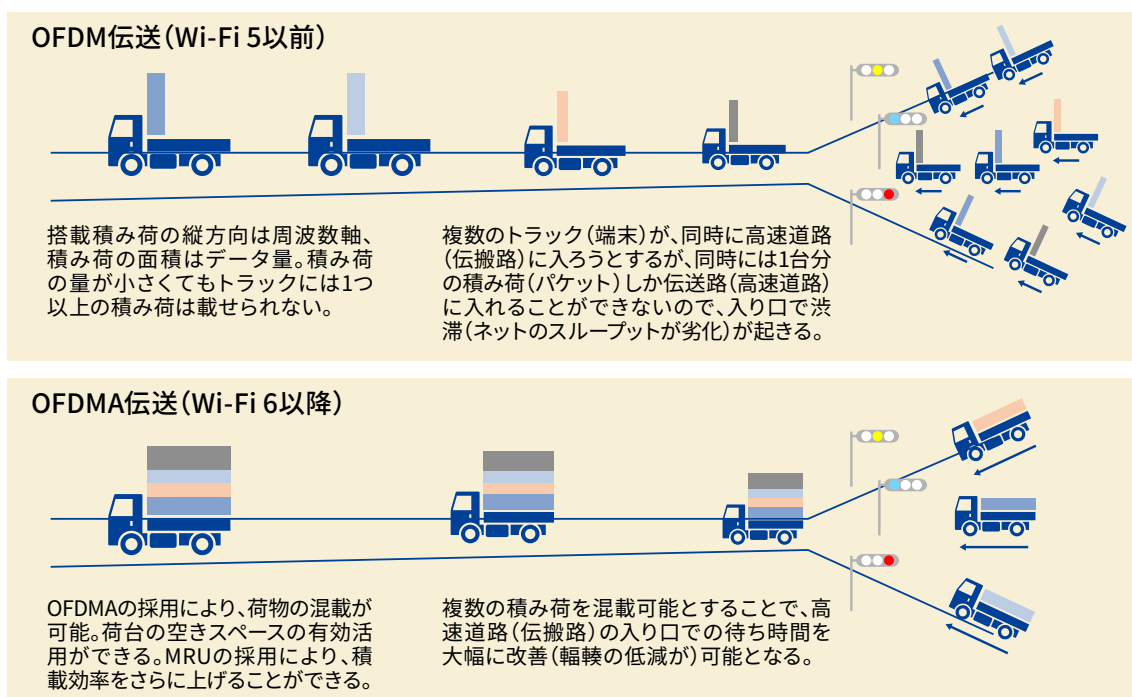


図3-5 OFDMとOFDMAの方式の違い(概念図)



前節で詳しく見たように、無線LANでは、衝突の確率が増えるとべき級数的に遅延が増えていきます。OFDMAを活用すれば、端末数が増えた場合でも、衝突の頻度を下げることができます。OFDMAでは、OFDMシンボルを構成しているサブキャリアをいくつかの束に分けて、その束を別の端末に割り付けることによって同時通信を実現していますが、このサブキャリアの束をRU(Resource Unit)と呼んでいます。OFDMAはWi-Fi 6で導入された際は1つの端末に割り付けられるRUの数は1つでした。Wi-Fi 7では、複数のRUを割り付けることができるようになりました。これにより、Wi-Fi 6の時に比べ、周波数をより無駄なく使用することが可能となりました。

この複数のRUの束のことをMRU(Multi-RU)と呼びます。図3-6に26、52、106トーンのRU並びに、それで構成したMRUを示します(図では占有帯域幅40MHzの場合を示しましたが、他の占有帯域幅の場合も考え方は同じです)。

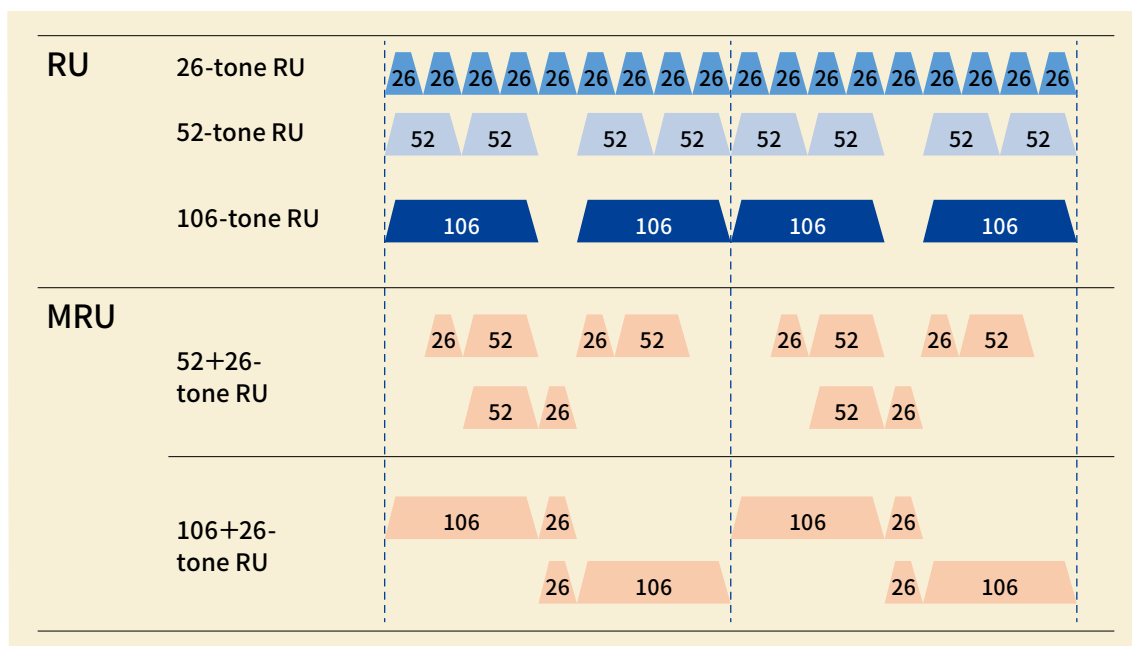


図3-6 26、52、106トーンRUを用いたMRUの例

RUからMRUを作る際に主要な規則が2つあります。RUは20MHz未満のものと20MHz以上のものに分けられますが、20MHz未満ではMRUは連続したRUの組み合わせを用いなければなりません。図3-6を見ても、26、52、106トーンの組み合わせはいくつかありますが、MRUを構成しているRUはすべて隣り合っています。また、20MHzの区切りをまたいでRUを組み合わせることは禁止されています。図3-6は40MHzの帯域を示していますが、20MHzの区切りをまたいでRUが組み合わさっているところはありません。もう1つの規則は、20MHzを超えるRUのマルチ化について定義しています。この場合、MRUは連続していなくても構いませんが、使用できるMRUは20MHz及びその倍数のRUのみとなります。図3-7に80MHzのMRUの例を示します。

上段に80MHzの帯域幅のMRUを構成するのに使用可能なRUを示します。台形内の数字はサブキャリア数です。242は20MHz、484は40MHzに対応しています。下段が、これらを用いたMRUです。既にご説明したように、隣り合っていない複数のRUでMRUを構成することができます。

OFDMA(MRU)による遅延、ジッタの低減効果をまとめると、OFDMのシンボルを構成しているサブキャリアをRUと呼ばれるいくつかの束に分け、それを異なる端末に割り付けることにより、同時通信を可能にしました。

ちなみに、図3-6の上段を見ると、40MHzの帯域幅に割り当てられた26-toneRU(最小サイズのRU)は18個であることがわかります。これは、原理上、2.4GHzのバンドでは40MHzの占有帯域幅を用いて18までの同時通信が可能になること意味します。同様に5GHz帯では最大の占有帯域幅が160MHzなので、同時接続数が最大72、6GHzは320MHzの占有帯域幅が使用できるので最大144までの同時接続数が原理上可能となります。小さいRUを使うとそれだけ1つのRU当たりの扱えるデータ量は小さくなりますが、並列度が非常に高くなるので、複数のサイズのRUをバランスよく割り付けることにより、衝突回数を減らし、遅延、ジッタを下げることができます。

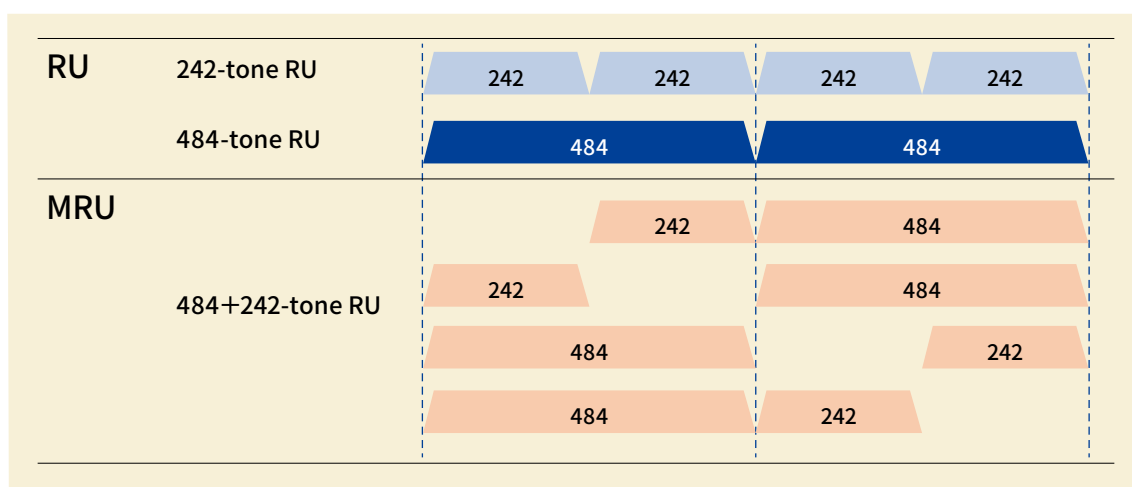


図3-7 20MHz以上のRUを用いたMRUの例(80MHz)

II. MU-MIMO

CSMA/CAの無線LAN環境下で同時接続数を増やして干渉を低減する方法として、MU-MIMO (Multi User MIMO)があります。OFDMとOFDMAの関係と同じ様に、MIMOとMU-MIMOは、前者は空間多重技術を1対1通信の通信量増大に利用した技術 (SDM: Spatial Division Multiplexing) であり、後者は空間多重を複数の利用者が同時にアクセスできるマルチプルアクセス技術 (SDMA: Spatial Division Multiple Access) となります。この技術はWi-Fi 5の時にダウンリンクに対して規格化され、Wi-Fi 6でアップリンクも規格化されました。Wi-Fi 7で新規導入された技術ではないですが、OFDMAと同じく同時アクセス技術であり、ジッタや遅延削減に効果を発揮するのでここで紹介します。図3-8に典型的な例として、親機が4本、子機が2本のアンテナを搭載している環境でMU-MIMOで通信している例をあげます。

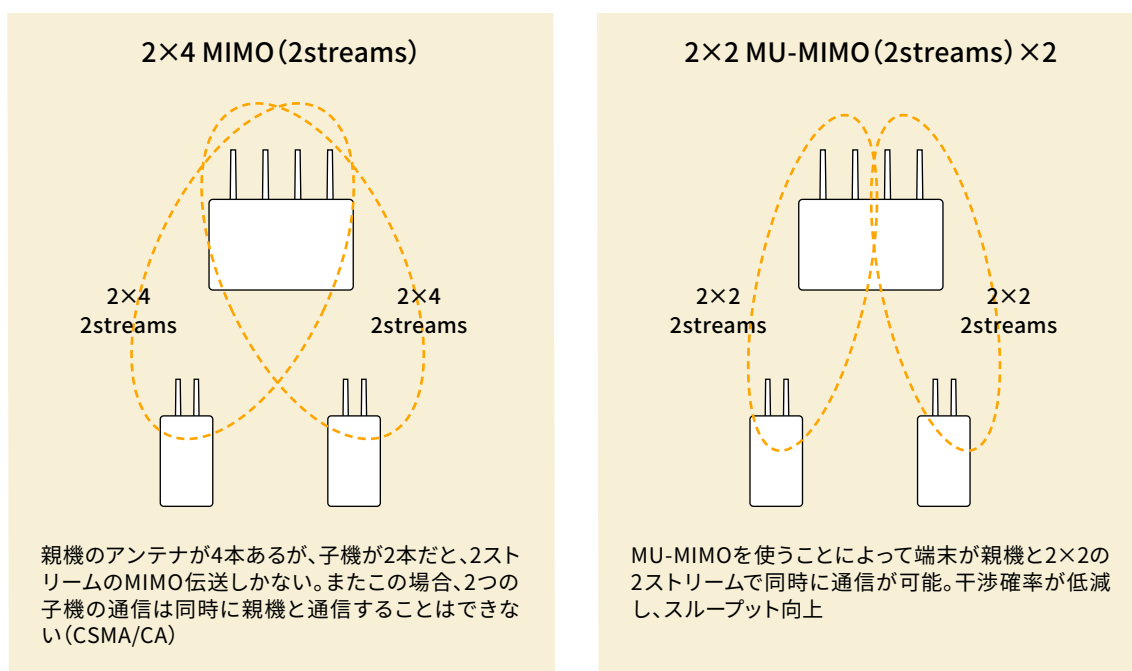


図3-8 MIMOとMU-MIMOの比較例 (親機のアンテナが4本、子機が2本の場合)

MIMOが導入されたのは11nの時からでMIMOのストリーム数(アンテナの本数)は規格上最大4本でしたが、実際の製品は2ストリームから始まりました。やがて技術が進み、4ストリームが無線LAN機器に実装できるようになった時、親機側は良いのですが、子機(特に普及しているスマホ)側にアンテナ4本搭載するのが困難で、親機と子機の間でアンバランスが起きました。子機側でアンテナを簡単に増やせない理由として、価格上の制約、搭載エリアが小さい、消費電力が高くなることがあげられます。そうすると親機側は4ストリーム対応製品でも子機側が2本のアンテナしかない、親機—子機間の通信は2ストリームまでとなります。アンテナの本数が増えるとダイバーシティ効果により安定度が増し、またより遠くまで飛ばすことができるようになりますが、最大速度の観点からすると(親機の)性能の半分しか出せないことになります。そこで注目を浴びたのがMU-MIMOでした。図3-8の左側では親機のアンテナが4本ですが、子機が2本搭載なので、MIMOの2ストリーム伝送をし、かつ子機はお互いに時間をずらして通信を実現しています。MIMOの実装を表現するのに、(送信アンテナの本数) × (受信アンテナの本数)という表現を使いますが、この場合は2 × 4通信となります。親機としては潜在能力としてはMIMOの4ストリームの速度まで出せるはずですが、子機側の制約によりその半分の速度までしか出せません。

一方図3-8の右側の図では、MU-MIMOを使う事により、2ストリームのMIMOを2多重しています(2 × 2伝送の2倍)。この場合、親機の4本アンテナの内2本を使って1台の子機と通信し、残りの2本を使ってもう一台の子機と通信するイメージです。この場合も見た目は2ストリーム伝送ではありますが、親機の立場では2ストリーム伝送を同時に2組扱っている、ネットのスループットとしては2ストリームの2倍(4ストリームと同じ)の速度を出しうるので、(親機側の)製品の性能を最大限に出せるようになりました。

このように親機と子機のアンテナ非対称を解決するMU-MIMOですが、端末の同時通信を実現できるので、遅延、ジッタの低減にも役に立ちます。OFDMAがショートパケットを扱う子機が多い時に有効(先ほど見たように一台当たりの最大通信量を下げることにより、原理上最大144の並列同時通信に適用可能)なのに対して、MU-MIMOは同時接続数という点ではOFDMAほど多くはできない反面、1ユーザ当たりの速度劣化のペナルティは小さいといえます。従って、ショートパケットを扱う子機が多い環境ではOFDMAが、並列度はそれほど高められませんが、1つの子機が扱う伝送量が多い場合はMU-MIMOが遅延、ジッタ対策として有効と考えられます。尚、MU-MIMOを使用する際の注意点としては、MU-MIMOモードの端末を近づけすぎない事です。これは、MIMO伝送は複数のアンテナからの異なった伝搬情報で空間上混ざり合った信号を分離しているのですが、アンテナ間が近くなると各アンテナで受信する信号の差が小さくなり、うまく信号処理ができなくなるからです。

B) 干渉波の影響抑制

I. MLO

MLOは複数のリンクを同時に接続して通信をする技術です。この為、どれか1つのリンクが干渉波の影響を受け、品質が劣化しても他のリンクで継続して使用できるので、遅延、ジッタ特性が維持できます。図3-9に干渉波が存在する環境下にあるMLO通信の概念図を示します。

図で見るとバンドステアリング機能と似ているように見えますが、性能的に強化できる点は大きく異なります。バンドステアリングは複数のリンクを、そのリンクの通信状態の良否によって切り替える機能ですが、これまでの技術を用いているので、切り替える際には一度子機との接続を切って、別のリンクに再接続をしなければなりません。通常秒単位の時間がかかりますので、長い時間変動の場合には効果がありますが、100ms以下の遅延やジッタを議論する際には適用限界があります。MLOの場合はパケット単位で異なったリンクを使用することができます。

図3-9に示されているように、干渉波としては、例えば2.4GHzでは典型的なものとして電子レンジ、Bluetooth製品、病院や工場などでは2.4GHzのISM帯を利用している機器等があります。5GHz帯は各種レーダーが有名です。

現在解放されている6GHz帯(5.925-6.425GHz)は、2.4GHz帯や5GHz帯に比べるとクリーンな帯域ですので、MLO通信において、可能であれば6GHzのリンクを中心に運用できれば理想的です。

6GHzは2022年9月に無線LANに開放されたので、比較的新しく、まだ市場で使用されている無線LAN端末の実装率がそれほど高くないかもしれません。ただ見方を変えると、6GHzのWi-Fi 7親機を今導入した場合、通常は導入した時点から機能の陳腐化が始まりますが、6GHzの子機の普及率が上がるにつれてネットのスループットが上がっていきますので、無線LANインフラの寿命を長くできるという見方ができるかも知れません。

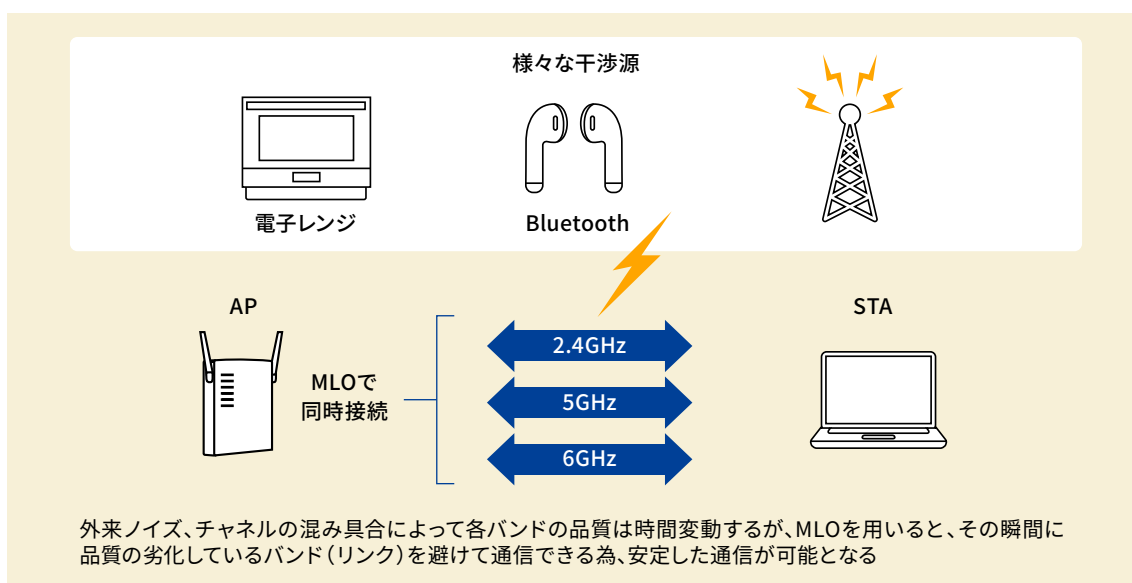


図3-9干渉波が存在する環境下のMLO通信

II.Preamble Puncturing

Preamble Puncturingは80MHz以上の占有帯域幅(80MHz、160MHz、320MHz)に対して20MHz単位で穴をあける技術です。この穴をあけた部分(周波数帯)は、Preambleも存在しないので、干渉波との干渉回避に有効です。図3-10に、80MHzの占有帯域幅に20MHzの穴をあけた場合のモードを示します。Preamble Puncturingは802.11axではオプションの扱いでしたが、11be(Wi-Fi 7)では必須サポート項目になりました。

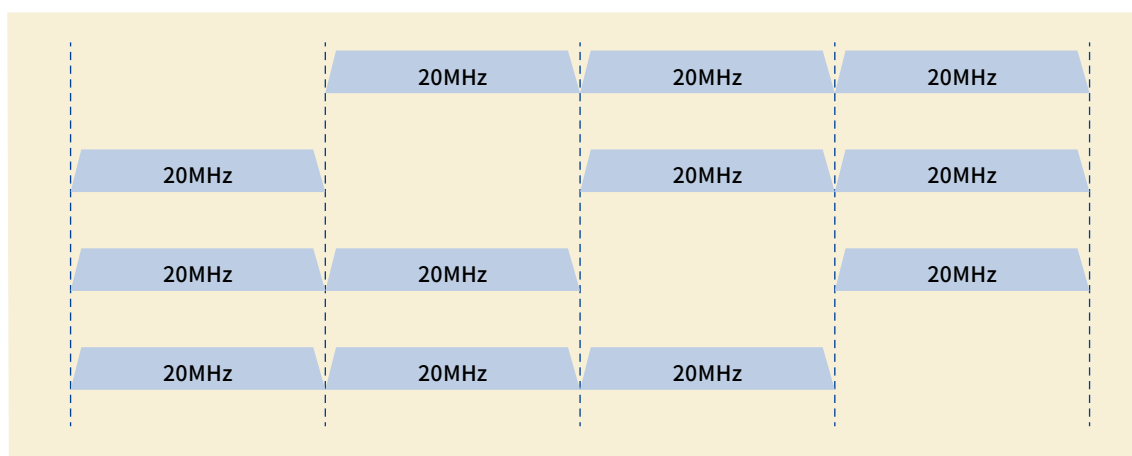


図3-10 Preamble Puncturingの例(80MHzの帯域に20MHzの穴をあけた場合)

連載第2回目でもご説明したように、Preamble Puncturingの技術を使うと、干渉波が存在する帯域だけ取り去ることができるので、周波数利用効率が増します。Static Puncturingという機能を使って、BSSを形成する際にPuncturingする帯域の情報をあらかじめ子機と共有することもできます。近隣の異なったBSSに所属するWi-Fiの信号や、一般的に存在する干渉波の影響を低減することができます。また、米国等ではPreamble Puncturingの技術をレーダーとの干渉回避に使用できますが、日本でも現在法整備を進めています。将来DFS帯がより使いやすくなる事が期待されます。

Ⅲ.チャンネル選択肢の増大

Wi-Fi 6Eより使用が可能になった6GHzは、Wi-Fi 7でMLO等と組み合わせることにより、遅延、ジッタの改善に効果があります。

表3-1に各バンドで使用可能な(20MHz)チャンネル数を示します。

表3-1 各バンドで使用可能なチャンネル数

バンド	帯域(GHz)	チャンネル数	備考
2.4GHz	2.4-2.4835	3(同時)	ISM帯
5GHz(W52)	5.15-5.25	4	
5GHz(W53)	5.25-5.35	4	DFS帯
5GHz(W56)	5.47-5.73	12	DFS帯
6GHz(6L)	5.925-6.425	24	

2.4GHzは3チャンネル(日本では13チャンネルありますが、5MHzごとに配置されているので、同時に使用可能なチャンネルは3チャンネルとなります)、5GHz帯は非DFSチャンネルが4(W52)、DFSチャンネルが16(W53/W56)になります。これに対して6GHz帯は24チャンネルです。このチャンネルは屋内使用の場合は10mW/MHzでかつ、DFS帯ではないので、W52と同じ使い勝手とっても良いかもしれません。この(6GHz帯の)24チャンネルが新たに無線LAN用のチャンネルとして追加されたことは、輻輳を低減する意味でも、非常に大きな意味があります。

5)まとめ

連載第3回目の本稿では、ユースケースとしてWeb会議などのようなリアルタイムアプリケーションを念頭に置き、その際重要な指標となる遅延、ジッタがWi-Fi 7を用いるとどのように低減されるかをご紹介しました。Wi-Fi 7以前に規格化されて技術についても、Wi-Fi 7で追加された新機能と相まって、遅延やジッタ改善に大きく役立つものについては全体の流れをわかり易くするために言及しています。次回の第4回では収容端末数を上げるという観点からWi-Fi 7について議論をします。

マネージ Wi-Fi 7 18700Mbps
スタンダードモデル
無線アクセスポイント

WAB-BE187-M



エレコムWi-Fi 7対応法人向け無線アクセスポイント。トライバンド対応により2.4GHz、5GHz、6GHzの周波数帯の同時通信を実現。これにより高速、低遅延の通信を実現するだけでなく、最大768台(各帯域256台)のデバイスをスムーズに接続可能。

<https://www.elecom.co.jp/products/WAB-BE187-M.html>

