

802.11ac 技術概要

ホワイト・ペーパー

本アプリケーションノートでは、IEEE802.11ac の技術概要を解説します。802.11ac は 802.11-2007 仕様の改定版ともいえる規格です。802.11ac はスループットの向上や 既存の無線 LAN 801.11n-2009 との協調動作も実現します。

目次

1	はじめに.....	3
2	802.11ac 主なドキュメント.....	3
3	802.11ac 主な要件.....	4
4	802.11ac PHY 仕様.....	5
4.1	チャネライゼーション.....	5
4.2	帯域と OFDM サブキャリア.....	7
4.3	フレーム・フォーマット.....	8
4.3.1	VHT プリアンブル.....	10
4.3.1.1	VHT SIG-A.....	10
4.3.1.2	VHT STF.....	12
4.3.1.3	VHT LTF.....	13
4.3.1.4	VHT SIG-B.....	14
4.4	802.11ac BCC を伴ったシングルユーザ・データフィールド.....	15
4.5	802.11ac 送信仕様.....	16
4.5.1	スペクトラム・マスク.....	16
4.5.2	スペクトラム・フラットネス.....	18
4.5.3	送信中心周波数およびシンボルクロック許容度.....	19
4.5.4	送信変調精度.....	20
4.5.4.1	送信キャリアリーク.....	20
4.5.4.2	送信コンスタレーション・エラー.....	21
4.6	802.11ac 受信仕様.....	21
4.6.1	受信最小入力感度.....	21
4.6.2	隣接および非隣接チャネル阻止.....	22
4.6.3	受信最大入力レベル.....	24
4.6.4	クリアチャネルアセスメント (CCA).....	24
5	参考文献.....	25
5.1	参考文献.....	25
6	用語.....	25

1 はじめに

IEEE 802.11 は、IEEE のワーキンググループであり、無線ローカルエリアネットワーク仕様を開発しています。グループの活動は 1990 年代後半から始まり、それ以来 802.11a、b、および g を含むいくつかの規格化とその修正を行ってきました。WLAN は、現在ではほぼ全てのノート PC と多くのスマートフォンで標準機能として含まれ、非常に普及した技術といえます。IEEE 802.11 のグループは、a/b そして g を改版し 2009 年に 802.11n を正式リリースし、また他の拡張としては 802.11w、11k などをもとめるなど、改善活動を継続しています。「IEEE 802.11 ユニバース」[1]では、802.11 プロジェクトに関して今までの経緯がまとめられています。またさらに深い技術や測定ソリューションに関しては弊社アプリケーションノート[2][15]を参照ください。

2008 年後半に、802.11 のデータのスループットを大幅に向上させ有線のスループットと同等にすることを目的に、2つのグループ(802.11ad とその修正は TGad、また 802.11ac とその修正は TGac)が発足しました。802.11ad は、60GHz 帯で非常に広い帯域幅を使用し、802.11ac は 5GHz 帯の周波数を使用します。両方の改定は、2012 年末完成を予定しています。

本ドキュメントは、802.11ac(VHT(Very high throughput)として知られている)とその修正をカバーし、いくつかの主要なトピックに分かれています。802.11ac 主要ドキュメント、主要要件、さらに 802.11ac PHY 仕様(チャネルの構造、フレームフォーマット、プリアンブルフィールド、およびデータフィールドがある)、また PHY 層のテスト仕様書に関して説明します。

2 802.11ac 主なドキュメント

- **TGac Usage Models R2 [4]**: 2010 年 5 月 802.11 ワーキンググループの会議中に承認されたドキュメントです。このドキュメントでは、11ac のために使用されると予想される 6 使用モデルが含まれています。
- **TGac Feature Requirements and Evaluation Methodology Document v16 [5]**: 2011 年 1 月の会議で承認されたドキュメントです。主な目的は、802.11ac 修正版の要件を定義することです。
- **TGac Channel Model Addendum v12 [6]**: 2010 年 3 月の会議で承認されたドキュメントです。このドキュメントでは 11ac が使用するチャネルモデルを定義しています。それらは主に 802.11n のチャネルモデルへの変更です。これらのモデルは 802.11ac の改定版への入力が機能要件を満たすことを示すために(評価手法のドキュメントで指定された他のパラメータと共に)シミュレーションで使用されています。
- **Specification Framework Document, currently at v21 [7]**: 2011 年 1 月承認されました。TGac のメンバーは、このドキュメントでより高いレベルの要件を開発し、それが“フレームワーク”または 802.11ac 改訂版の概要として使用されます。

- **TGac Draft Amendment v1.1 [8]**: ドラフト 11ac の改訂版のバージョン 1.1。このドキュメントでは、802.11ac 要件を満たすように 802.11mb ドラフト V9 の変更が含まれています。(802.11mb は、802.11-2007 規格の改訂プロジェクトです。802.11-2007 のリリース以降承認された 802.11 の修正を全て組み込み、これらの規格のリリース以降に見つかった全ての曖昧さも修正しています)。これらの変更は、PHY の仕様や 802.11 MAC の仕様を含みます。802.11ac ドラフトバージョン 1.1 は 2011 年 8 月にリリースされました。ドラフト v1 を 2011 年 5 月までに、そして最終版を 2012 年中旬までにリリースする予定です。

3 802.11ac 主要要件

802.11ac 改定版の主要要件/目標は次の通りです ([5]を参照)。

- **旧バージョンとの互換性**: 11ac は、5GHz 帯で動作する 802.11a と 802.11n デバイスとの後方互換性を提供しなければなりません。これは 11ac は、11a 及び 11n と共に動作し、11a と 11n のデバイスに対応するためのフレーム構造を定義する必要があるということを意味します。
- **共存**: 11ac は、5GHz 帯で動作する 11a と 11n デバイスと共存させるためのメカニズムを提供します。
- **単一ステーションスループット**: 80 MHz を超える帯域を使用せずに、MAC サービスアクセスポイント (SAP) で 500Mbps 以上のスループットが可能でなければならない。
- **マルチステーションスループット (MAC SAP にて測定)**: 80 MHz を超える帯域を使用せずに、複数のステーションの 11ac システムは 1Gbps 以上のスループットがでなければならない。

802.11ac は、様々な利用モデルに対応するためにより高いスループットとデータレートを使用します ([4]を参照):

1. ワイヤレスディスプレイ
2. HDTV や他のコンテンツの家庭内配信
3. サーバーへ大容量ファイルのダウンロード/アップロード
4. バックホールのトラフィック (メッシュ、ポイントトゥーポイント、等)
5. キャンパスや講堂での配信
6. 製造現場の自動化

2012 年に非常に高いスループットを必要とするデバイスのトップスリーが現実化することが予想されています。室内ゲーム (カテゴリー1)、迅速な sync- N - Go のファイル転送 (カテゴリー3)、また会議室でのテレビまたはプロジェクターへの投写 (カテゴリー1) です。

4 802.11ac PHY 仕様

802.11ac は 11n(11a)の仕様を再利用する予定です。これは後方互換性と共存を確保するために有利であり、また 11ac 開発者はスループット要件を達成するために必要とされる新機能に集中することができるからです。例えば、11ac PHY は、11a と 11n の OFDM (直交周波数分割多重)PHY を使用しており、インターリーブやコーディング変調も 11n のものと同様です。しかし、いくつかの変更と新 11ac 機能またパラメータは 11ac の目標を達成するために必要です。

802.11ac(別名 VHT、very high throughput) デバイスは、20、40、および 80 MHz のチャネルと 1 空間ストリームをサポートする必要があります。いくつかのオプション機能も 802.11ac で定義されています：

- ・ より広いチャネル帯域幅(80+80 MHz および 160 MHz)
- ・ より高い変調のサポート(オプション 256QAM)
- ・ 2 つ以上の空間ストリーム(最大 8)
- ・ MU-MIMO(マルチユーザ MIMO)
- ・ 400 ns の短いガードインターバル
- ・ STBC(時空ブロック符号化)
- ・ LDPC(低密度パリティチェック)

必須パラメータのみ(80 MHz の帯域幅、1 空間ストリーム、および 64 QAM5/6)を使用した 11ac デバイスは、~293 Mbps のスループットを実現できます。オプションのパラメータを全て(160 MHz の帯域幅、8 空間ストリーム、ショートガードインターバル、256 QAM5/6)活用した場合、約 3.5Gbps を実現できます。

4.1 チャネライゼーション

OFDM PHY が 802.11 に導入された際、チャネル帯域幅は 20MHz で、後の改定で 5 と 10MHz がサポートされました。802.11n の改定では、オプションの帯域幅 40MHz がサポートされました。802.11ac は、80MHz の帯域幅をサポートするだけでなく、オプションで 160MHz の帯域幅が含まれます。11ac デバイスは、20、40、および 80MHz チャネル帯域幅の受信と送信をサポートする必要があります。80MHz チャネルは 2 つの隣接した、重複しない 40MHz のチャネルで構成されます。160MHz のチャネルは、隣接(連続)もしくは非連続の 2 つの 80MHz のチャネルによって形成されます。

米国(図 1)およびヨーロッパ、日本(図 2)のチャネル割り当ての背景は、“Channelization for 11ac”[8]の中で説明されています。その当時から、FCC は米国でチャネル 144 を使うことを認めています。([16]Annex E 参照)図 1 には、米国およびグローバル・オペレーティングクラスに、この 20 MHz のチャネルが追加されたこと、また、それに伴って 40 MHz および 80 MHz のチャネルが追加されたことが反映されています。

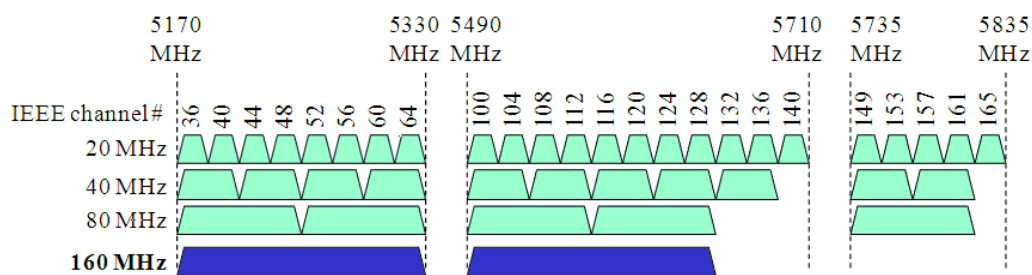


図 1: 米国 およびグローバル・オペレーティングクラスのチャネル割り当て

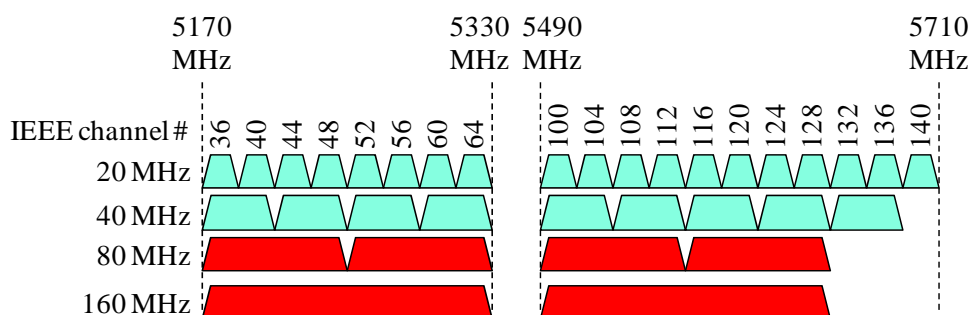


図 2: 欧州、日本でのチャネル割り当て

VHT 帯域幅で信号を生成するために、4 つのフィールドが使用されています。

- ・ 現在のチャネルの帯域幅: 20MHz、40 MHz、80 MHz、160 MHz および 80+80 MHz の帯域幅が提供されている。
- ・ 現在のチャネルの中心周波数インデックス 1: 20、40、80 または 160 MHz の帯域幅の場合の中心周波数を提供します。80+80 MHz の場合は、これはプライマリ・セグメントの中心周波数を提供します。
- ・ 現在のチャネルの中心周波数インデックス 2: 20、40、80 または 160 MHz の帯域幅の場合、これは未定義です。80+80 MHz の場合は、これは、セカンダリ・セグメントの中心周波数を提供します。
- ・ 現在のプライマリの 20 MHz チャンネル: プライマリ 20MHz のチャンネルの位置情報を提供します。全てのチャンネル帯域幅でプライマリ 20MHz チャンネルを割り当てられます。

これらのパラメータは、PLME MIB (Physical Layer Management Entity Management Information Base) で送信され、802.11 規格のチャンネルスタート周波数と共に使用されます。以下の式はチャンネルの中心周波数と 20MHz プライマリ・サブチャンネルの周波数を示しています。

$$\text{Channel center frequency [MHz]} = \text{Channel starting frequency} + 5 * \text{Current Channel Center Frequency Index}$$

$$\text{Primary 20 MHz channel center frequency [MHz]} = \text{Channel starting frequency} + 5 * \text{Current Primary 20 MHz Channel}$$

([9]からの)いくつかの例は、どのように中心周波数と帯域幅を提供するかを説明するために役立ちます (VHT ステーションは、5GHz 帯で動作するため、例ではチャンネルのスタート周波数を 5GHz と想定しています。)

例 1:

CurrentChannelBandwidth = 80 MHz
CurrentChannelCenterFrequencyIndex1 = 42
CurrentPrimary20MHzChannel = 36

のチャンネルは、80MHz であり、

Channel center frequency = 5 GHz + 5 * 42
= 5210 MHz

Primary 20 MHz center freq = 5 GHz + 5 * 36
= 5180 MHz

になります。

例 2:

CurrentChannelBandwidth = 80+80 MHz
CurrentChannelCenterFrequencyIndex1 = 155
CurrentChannelCenterFrequencyIndex2 = 106
CurrentPrimary20MHzChannel = 161

のチャンネルは80+80MHzであり、

Channel center freq (Primary) = 5 GHz + 5 * 155
= 5775 MHz

Channel center freq (Secondary) = 5 GHz + 5 * 106
= 5530 MHz

Primary 20 MHz channel center freq = 5 GHz + 5 * 161
= 5805 MHz

になります。

4.2 帯域と OFDM サブキャリア

802.11a や 802.11n と同じよう 802.11ac は、OFDM(直交周波数分割多重)方式を使用します (11ac は既存の 802.11a および 802.11n の仕様の多くを再利用します。ただ 11ac の目標を達成するために若干の変更があります)。OFDM はデータを送信するために、等間隔のサブキャリアを使用し、11ac 信号のサブキャリアの数と帯域幅は、表 1 の通りです。信号を送信するために使用されていないサブキャリアは、DC サブキャリア(複数可)およびガードサブキャリアのヌルサブキャリアです。DC サブキャリア(サブキャリア 0)は、A/D コンバータとキャリア・フィードスルーの問題を軽減させるために OFF にします。

表 1: 11ac 帯域幅とサブキャリア数

帯域幅(MHz)	サブキャリア数	信号を送信するサブキャリア
20	64	-28 ~ -1 および 1 ~ 28
40	128	-58 ~ -2 および 2 ~ 58
80	256	-122 ~ -2 および 2 ~ 122
160	512	-250 ~ -130、-126 ~ -6、 6 ~ 126、130 ~ 250
80+80	256 / 80MHz チャンネル	-122 ~ -2 および 2 ~ 122

VHT デバイスは、既存のレガシーデバイス(例えば 11a 及び 11n)と共存する必要があるため 11ac デバイスは 20、40、および 80 MHz の帯域幅をサポートします。全ての 802.11、全ての 20 MHz のサブバンドで同じプリアンブルが送信されるので VHT デバイスは、パケットに同期することができるようになります(プリアンブルの詳細については、4.3.1 を参照してください)。これはパワーアンプの効率を低下させる高い PAPR の問題(平均電力比のピーク)が残ったままになっています。この影響を軽減するために、上位 20 MHz のサブバンドのサブキャリアは、表 2 に示すように回転させています。40 MHz 帯域幅における、サブキャリアの回転は、11n の場合と同じです。

表 2: 帯域幅とサブキャリアの位相の回転

帯域幅(MHz)	回転させるサブキャリア	回転の角度
20	N/A	
40	≥ 0	90° (j)
80	≥ -64	180° (-1)
160	-192 ~ -1 および ≥ 64	180° (-1)
80+80	各 80 MHz のセグメント毎に、80 MHz と同じ	80MHz と同じ

4.3 フレーム・フォーマット

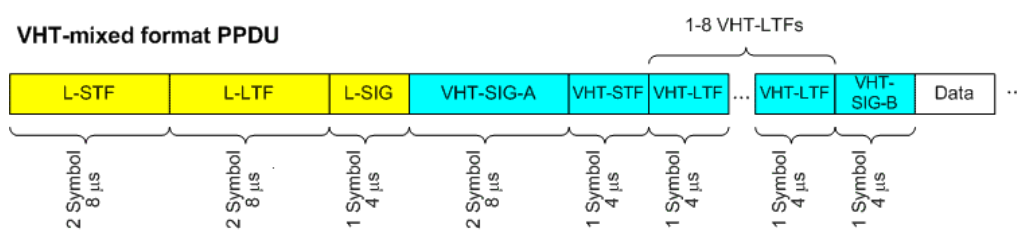


図 3: VHT ミックスド・フォーマット PPDU

802.11ac フレーム・フォーマットを図3に示します。最初にプリアンブルが配置されています。最初の3つのフィールドは、L-LTF(ロング・トレーニング・フィールド)、L-STF(ショート・トレーニング・フィールド)、L-SIG(シグナル)です。L-STFとL-LTFには、デバイスが周波数オフセット推定、タイミングの同期などを実行し信号を検出するための情報が含まれています。また、“L-”は、“レガシー”を表し、20MHz内で使用されるシーケンスは11aや11nと同じものとなっているため、全ての802.11デバイスは同期可能になっています。さらに、L-SIGフィールドは、パケットの残りの部分の長さに関する情報が含まれています。つまり、レガシー・デバイスを含む全てのデバイスが指定された長さのパケットが送信されていることを知っているということです。

「VHT-」から始まるフィールドは、11acで新しく用意されたものです。VHT-SIG-Aフィールドは2つのOFDMシンボルが含まれています。最初のシンボルは、BPSKを用いて変調されていますので、全ての11nのデバイスは、パケットが11aだと認識します。二番目のシンボルにて、VHTのデバイスは、これは11acパケットであることを認識します。90度回転BPSKを使用しています。重要な情報は、これらの2つのシンボルに含まれます。シングルユーザの場合は、帯域幅、MCS(変調および符号スキーム)、時空間ストリームの数などです。

レガシーフィールドとVHT-SIG-Aフィールドは帯域の各20MHzが重複しており、適切な位相回転が適用されています(4.2参照)。

VHT-SIG-Aの後に、VHT-STFが送信されます。VHT-STFの主な役割は、MIMO伝送における自動利得制御の推定を改善させることです。

パケットの次の1-8フィールドには、VHT-LTFが配置されます。これらは、MIMOチャネルを推定し、受信信号を等化するために使用されています。送信LTFの数がユーザごとの空間ストリームの数に等しいもしくはより大きいことより、それらは“解決LTF(resolvable LTFs)”と呼ばれています。

VHT-SIG-Bは、データフィールドが送信される前のプリアンブルの最後のフィールドです。VHT-SIG-Bは、BPSK変調され、パケット内の有益なデータ長に関する情報やマルチユーザMIMOの場合にMCS情報を提供します(シングルユーザの場合のMCSは、VHT-SIG-Aにて送信されます)。

適切な位相回転はVHT-STF、VHT-LTF、とVHT-SIG-Bの各20MHzチャンネルに適用されます(4.2を参照)。

プリアンブルに続いて、データシンボルが送信されます。ここでも20MHzの上位サブバンド内で位相回転が行われます。

4.3.1 VHT プリアンブル

4.3.1.1 VHT SIG-A

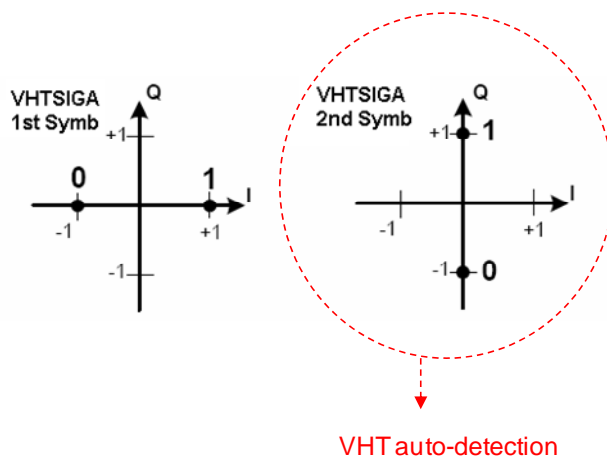


図 4: VHT SIG-A シンボルの変調

VHT SIG のシンボルは、レガシーのプリアンブル部分の後ろに配置され、全ての STA (ステーション) にとって、かつ 11ac デバイスが VHT パケットの残りの部分をデコードのために必要となる情報が含まれています。SIG-A シンボルは長い GI (ガードインターバル) を使用しており、 $R=1/2$ の BCC エンコードされています。最初のシンボルは BPSK 変調されていますので、11n の受信機は 11a パケットであると認識しその後無視します。2 番目のシンボルは 90 度回転された BPSK (QBPSK) であり (図 4)、VHT ステーションによる VHT パケットの自動検出が可能です (VHT デバイスは 11ac パケットが QBPSK 変調されていることを知っているため)。

VHT-SIG-A シンボルには各 24 ビットが含まれます。8 ビットは CRC (巡回冗長検査) のために使用され、6 ビットはエンコーダ用テールビットです。VHT-SIG-A の残りの 34 ビットで提供される情報は VHT パケットをデコードするために必要です。図 5 はシングル・ユーザの場合の VHT-SIG-A フォーマットを各フィールドに使われるビット数とともに表しています。また表 3 は各フィールドの値を説明しています。

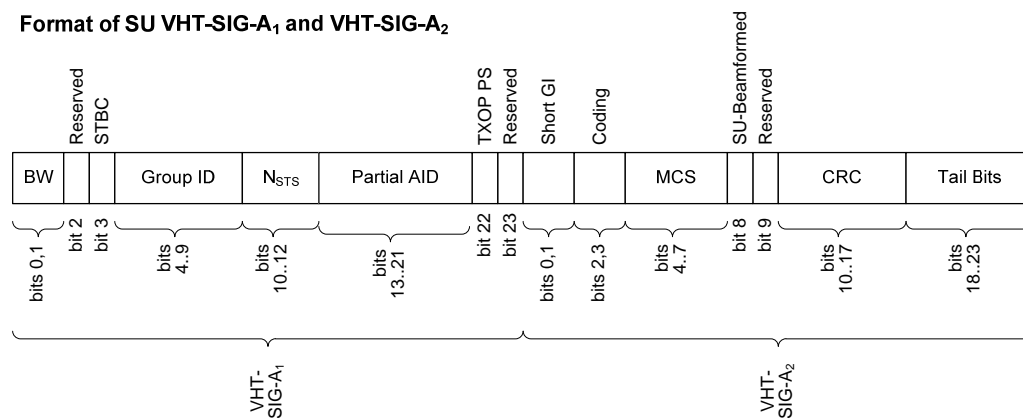


図 5: VHT SIG-A フォーマット (シングル・ユーザ)

表 3: VHT-SIG-A フィールド(シングル・ユーザ)

VHT-SIG-A1 Fields (Single User)	
Field	Description/Value
BW	PPDU Bandwidth 00: 20 MHz 01: 40 MHz 10: 80 MHz 11: 160 MHz or 80+80 MHz
Reserved	Set to 1.
STBC	Space Time Block Coding 1 if all streams use STBC 0 otherwise
Group ID	0 if packet is addressed to an AP or for a mesh STA 0 if packet is addressed to a mesh STA 111111 (63) otherwise
NSTS	Provides the number of space time streams (STS) 0: 1 STS 1: 2 STS 2: 3 STS 3: 4 STS 4: 5 STS 5: 6 STS 6: 7 STS 7: 8 STS
Partial AID	Partial Association Identifier an abbreviated indication of the intended recipient of the frame An AP assigns an AID to a STA during association
TXOP_PS NOT_ALLOWED	If non-AP VHT STA, Reserved. Set to 1. If VHT AP, 0: AP allows STAs to enter doze state in TXOP PS 1: Otherwise
Reserved	Set to 1.

VHT-SIG-A2 Fields (Single User)	
Field	Description/Value
Short GI Bit 0 (B0)	0: Data Field does not use short guard interval 1: Data Field uses short guard interval
Bit 1 (B1)	1: short GI is used and number of symbols mod 10 = 9 0: otherwise
Coding Bit 2 (B2)	0: BCC 1: LDPC
Bit 3 (B3)	1: if LDPC encoding results in extra OFDM symbol 0: otherwise
MCS	MCS Index 0: BPSK 1/2 1: QPSK 1/2 2: QPSK 3/4 3: 16-QAM 1/2 4: 16-QAM 3/4 5: 64-QAM 2/3 6: 64-QAM 3/4 7: 64-QAM 5/6 8: 256-QAM 3/4 9: 256-QAM 5/6
Beamformed	1: Beamforming steering matrix is applied 0: otherwise
Reserved	Set to 1.
CRC	Cyclic Redundancy Check
Tail	Set to 0. (used to end the trellis of the convolutional decoder)

マルチ・ユーザ(最大 4)に対応する場合、VHT-SIG-A フィールドの一部はユーザ固有の情報のために変更されます。図 6 では各フィールドに使われるビット数が、特定のユーザのためのフィールドを色分けして表されています。(ユーザ 0 は紫、1 は赤、2 は緑、3 は青)表 4 は、各フィールドの詳細を説明しています。

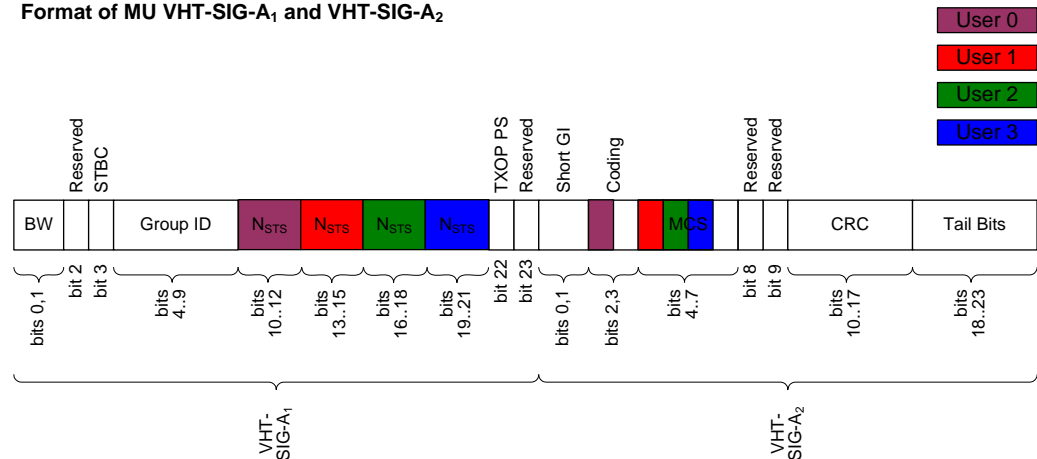
Format of MU VHT-SIG-A₁ and VHT-SIG-A₂

図 6: VHT-SIG-A フォーマット(マルチ・ユーザ)

表 4: VHT-SIG-A フィールド(マルチ・ユーザ)

VHT-SIG-A1 Fields (Multi-User)		VHT-SIG-A2 Fields Multi User	
Field	Description/Value	Field	Description/Value
BW	PPDU Bandwidth 00: 20 MHz 01: 40 MHz 10: 80 MHz 11: 160 MHz or 80+80 MHz	Short GI	Bit 0 (B0) 0: Data Field does not use short guard interval 1: Data Field uses short guard interval Bit 1 (B1) 1: short GI is uses and number of symbols mod 10 = 9 0: otherwise
Reserved	Set to 1.	Coding	Bit 2 (B2) If packet intended for user 0 (ie if NSTS field is non-zero) 0: User 0 uses BCC 1: User 0 uses LDPC If packet is not intended for user 0 (ie if NSTS field zero) Reserved. Set to 1. Bit 3 (B3) 1: if LDPC results in extra OFDM symbol for at least 1 user 0: otherwise
STBC	Space Time Block Coding 1 if all streams use STBC 0 otherwise	MCS	If data is present for user n (ie if NSTS field for that user (user n) is non-zero) 0: User n uses BCC 1: User n uses LDPC If packet is not intended for user 0 (ie if NSTS field zero) Reserved. Set to 1. Bit 4 is for user 1 Bit 5 is for user 2 Bit 6 is for user 3 Bit 7 is reserved and set to 1.
Group ID	Value range: 1-62; indicates intended MU group (The group definitions are established by AP before transmission of a MU frame and provide information such as a user's position within a group.)	Reserved	Set to 1.
NSTS (Per User)	Provides the number of space time streams (STS) per user 0: 0 STS 1: 1 STS 2: 2 STS 3: 3 STS 4: 4 STS values 5-7 are reserved	Reserved	Set to 1.
TXOP_PS NOT_ALLOWED	If non-AP VHT STA, Reserved. Set to 1. If VHT AP, 0: AP allows STAs to enter doze state in TXOP PS 1: Otherwise	CRC	Cyclic Redundancy Check
Reserved	Set to 1.	Tail	Set to 0. (used to end the trellis of the convolutional decoder)

4.3.1.2 VHT STF

VHT STF (short training field) は、MIMO 伝送における自動利得制御を向上させるために使用されます。20MHz および 40MHz の帯域幅のための周波数領域のシーケンスは、標準の 802.11n-2009 の 20.3.9.3.3 の場合と同じです。

$$S_{-26,26} = \sqrt{1/2} \{0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0\}$$

$$S_{-58,58} = \sqrt{1/2} \{0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0\}$$

80MHz の場合の VHT STF は次のように、 $S_{-58,58}$ のシーケンスを用いて形成されています。

$$VHTS_{-122,122} = \{VHTS_{-58,58}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, VHTS_{-58,58}\}$$

80+80 MHz の場合には、それぞれ 80 MHz のセグメントは、 $VHTS_{-122,122}$ を使用しています。

160MHz の場合には、シーケンスは次のとおりです。

$$VHTS_{-250,250} = \{VHTS_{-122,122}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, VHTS_{-122,122}\}$$

番号付きの添え字は、サブキャリアを参照しています。 $S_{-26,26}$ はサブキャリア -26, -25, -24 ..., 0, ..., 24, 25, 26 をあらわし、括弧内の数字は対応するサブキャリア番号を示します。例えば、サブキャリア -26 は 0 振幅で、サブキャリア-25 も 0 振幅、そしてサブキャリア -24 は $\sqrt{1/2}(1+j)$ の振幅をもつ、というような形です。もしスペクトラム・アナライザで信号を見るならば、0 振幅でないサブキャリアのみが見えるようになります(図 7 参照)。



図 7: スペクトラム・アナライザ画面上での VHT STF プリアンブル

VHT STF は、常に長いガードインターバルを使用することに注意してください。

4.3.1.3 VHT LTF

VHT LTF (Long training field) は、MIMO チャネルを推定し、受信信号を等化するために、受信側で使用されています。パケットで送信される LTF のシンボル数は、時空間ストリームの数に依存します。1 時空間ストリームは 1LTE、2 時空間ストリームは 2LTE シンボル、3 もしくは 4 時空間ストリームは 4LTE、5 もしくは 6 時空間ストリームは 6LTE シンボル、7 もしくは 8 時空間ストリームは 8LTE、のようになります。

VHT-LTF は、それぞれのトーン(すなわちサブキャリア)に適用される値(-1、0、または 1)とデータのサブキャリアで構成されています(値のシーケンスが 11ac で定義されている)。VHT-LTF は、時空間ストリームの数の増加(すなわち、MIMO のオーダーが増加する)に伴い長くなる可能性があります。レガシーLTF とは異なり、パイロットトーンは、残留周波数誤差と位相ノイズ(受信側で推定誤差につながる OFDM 信号の劣化要因)を補償するためにトラッキングフェーズの VHT-LTF のシンボルに挿入されます。([14])

パイロットの位置は、信号の帯域幅に依存し、表 5 に表すとおりです([9])。

表 5: VHT-LTF パイロットのサブキャリア・インデックス

送信帯域幅	パイロットトーンのサブキャリア・インデックス
20 MHz	±7, ±21
40 MHz	±11, ±25, ±53
80 MHz	±11, ±39, ±75, ±103
160 MHz	±25, ±53, ±89, ±117, ±139, ±167, ±203, ±231

トーン(サブキャリア)は、データサブキャリア用のマトリックス P とパイロットサブキャリア用のマトリックス R を使って、各時空間ストリームにマッピングされます。マトリックス R は単に VHT-LTF シンボルのパイロットサブキャリアの全ての時空間ストリームが同じパイロットの値を持つ、行の反復マトリックスです。

マッピングした後、受信機はより正確なチャネル推定がデータのサブキャリアから可能になるように LTF のシンボルの位相オフセット及び周波数を追跡するために、パイロットサブキャリアを使用することが可能です。

VHT-STF と同様に、VHT-LTF は、常に長いガードインターバルを使用します。

4.3.1.4 VHT SIG-B

VHT-SIG-B は、VHT-LTF の後に配置されます。BPSK 変調された1シンボルで、20MHz のパケットに 26 ビット含まれます。また 40MHz のパケットには 27 ビット、80MHz と 160MHz または 80+80MHz のパケットには 29 ビットが含まれます。VHT-SIG-B のフォーマットは、図 8 に示すように、パケットは SU-MIMO 用または MU-MIMO 用によって異なります。

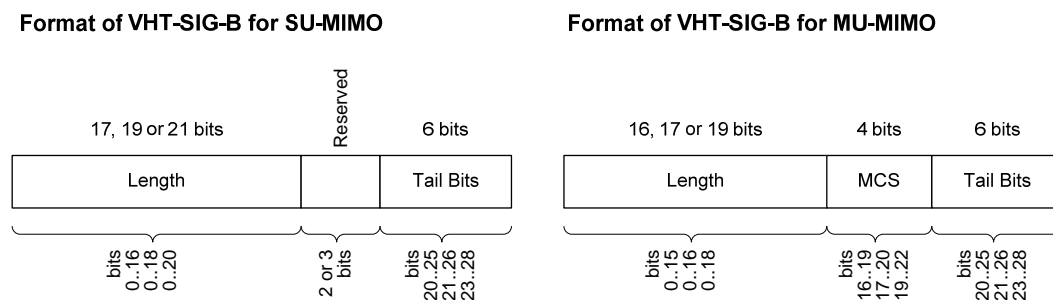


図 8: VHT-SIG-B フォーマット

Length フィールドのサイズを変更することによって、チャネル幅の違いや、SU-MIMO か MU-MIMO かによらず、パケットの時間は一定 (5.46 ms) に保たれます。

図 9 に示すように、これらのビットは、帯域幅が高くなるに伴い繰り返されます。パッドビットは、全ての 117 のトーンを $(29 * 4 + 1)$ に対応するために 80MHz の繰り返しの最後に必要です ([9])。

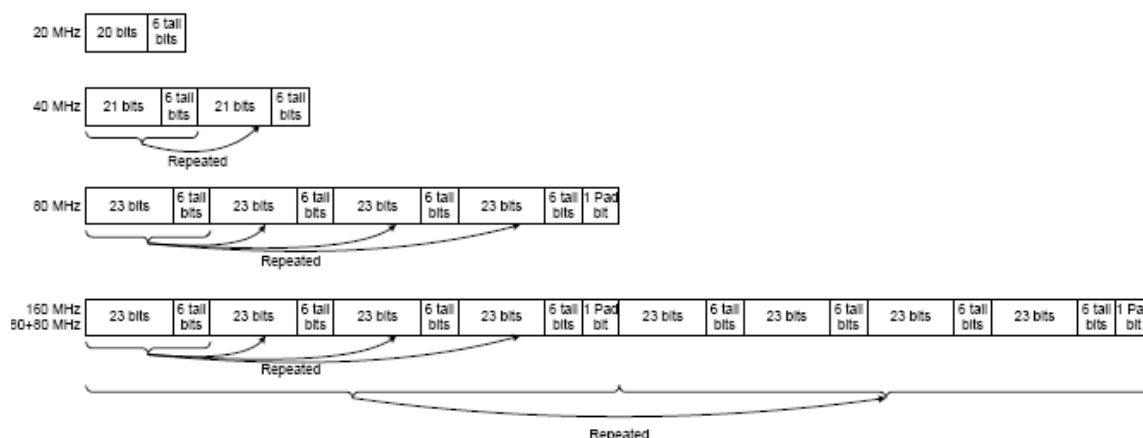


図 9: 20, 40, 80, 80+80, 160 MHz の SIG-B ビット

4.4 802.11ac BCC を伴ったシングルユーザ・データフィールド

802.11ac は、802.11n の変調、インターリーブ、コーディング、のアーキテクチャを使用します。しかし、11n の仕様といくつかの違いがあります。11ac と 11n は、BPSK、QPSK、16QAM 及び 64QAM 変調をサポートしますが、11ac は、オプションとして 256 QAM を追加します。2 つ目の違いは、定義されている MCS インデックスの数になります。表 6 に示すように、10 個のシングルユーザ用 MCS が 11ac で定義されています。これは 11n で指定されている 77 個の MCS インデックスよりもかなり少ないことになります。11n では“異なる”変調をサポートしているため、77 もの MCS が必要となります。例えばシングルユーザは 1 つのストリームで BPSK を使用し別のストリームで 16QAM を使用する可能性があります。([10] の表 20-38 から 20-43 を参照)。11ac では同じ変調を使用します。

MCS	変調方式	コーディングレート
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

表 6: 11ac シングルユーザ MCS インデックス

4.5 802.11ac 送信仕様

4.5.1 スペクトラム・マスク

11ac デバイスは 11ac と適用可能な規制要件で指定されたスペクトラム・マスクを満たす必要があります。11ac マスクの測定は、100 kHz の RBW と 30 kHz の VBW を使用して行われます。20、40、80、および 160 MHz のマスクが図 10 に、表 7 の A、B、C、および D の値と共に示されています。マスクの“振幅”は、信号の最大スペクトラム密度を基準とした相対 dB を意味する dBr の単位で与えられます。

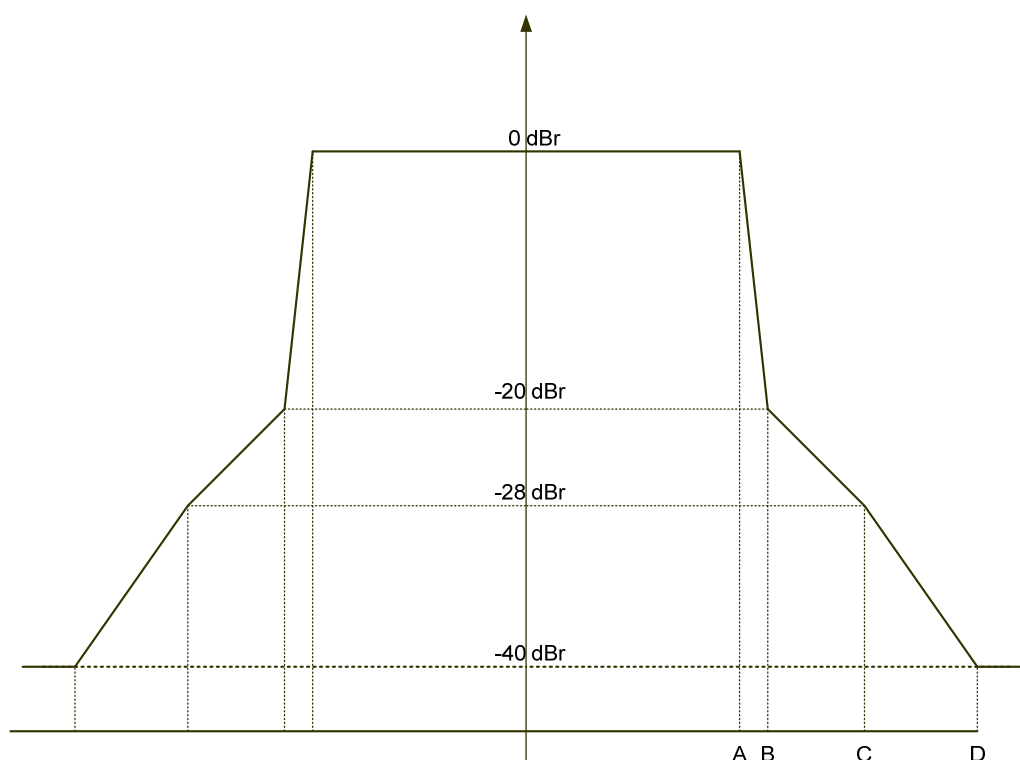


図 10: 20, 40, 80, 160 MHz チャンネルのスペクトラム・マスク

表 7: スペクトラム・マスクに必要な周波数オフセット

チャンネル・サイズ	A	B	C	D
20 MHz	9 MHz	11 MHz	20 MHz	30 MHz
40 MHz	19 MHz	21 MHz	40 MHz	60 MHz
80 MHz	39 MHz	41 MHz	80 MHz	120 MHz
160 MHz	79 MHz	81 MHz	160 MHz	240 MHz

非連続 80+80 MHz の場合には、80 MHz のマスクがそれぞれのチャンネルに適用されます。また2つの非連続の 80MHz のオーバーラップのマスクの値は表 6 にある通りです。図 11 にマスクの構成が記載されています。

表 8: 80 + 80 MHz 非連続スペクトラム・マスクの値

ステップ	マスクの値の周波数オーバーラップ	マスクの値の結果
1	両方のマスクが-20 dBから -40 dBの値をとる。	線形領域における2つのマスクの値の合計
2	どちらかのマスクが0 dBから -20 dBの値をとらない	マスクの値の高い方
3	マスクの値が定義されていない	定義されたマスクの値を持つ2つの最寄りの周波数点間のdBのドメインで線形補間。

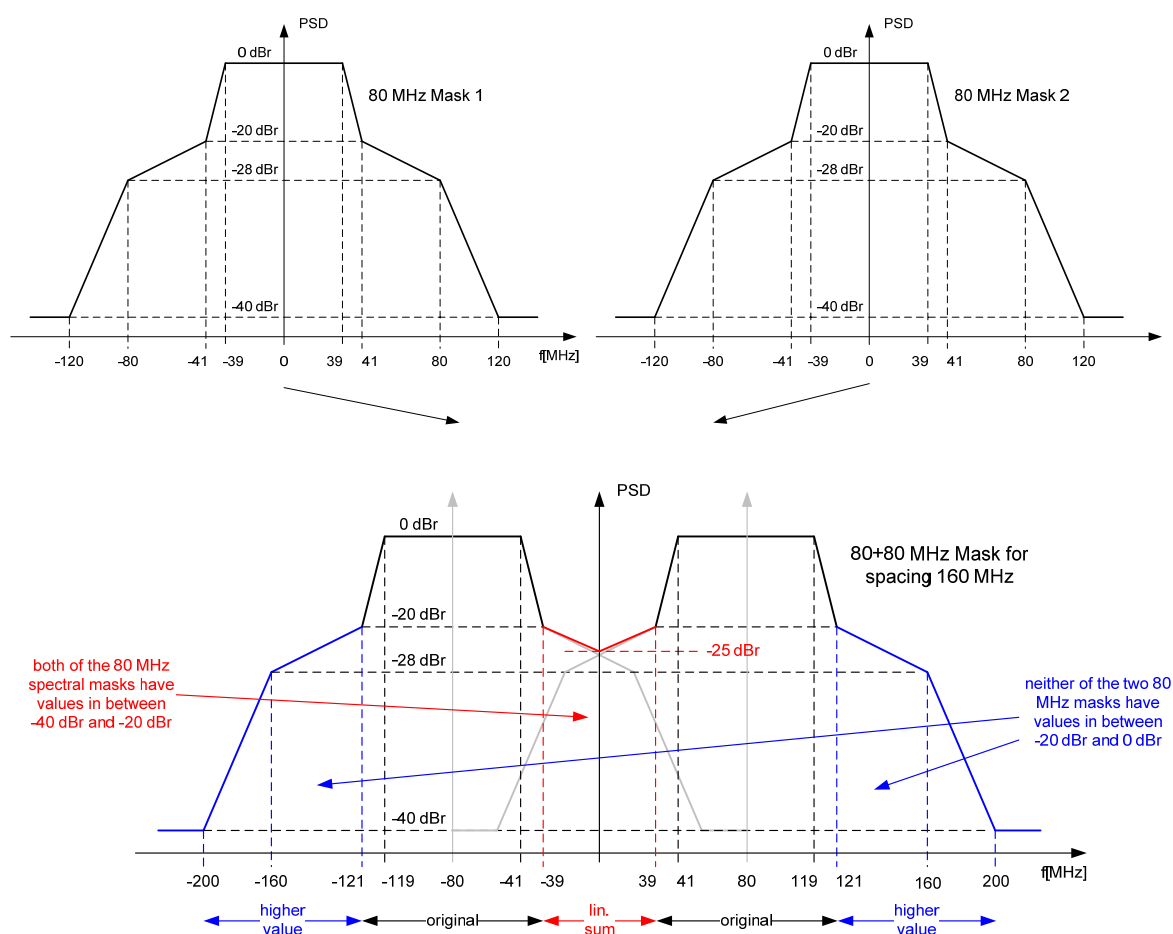


図 11: 80 + 80 MHz 非連続チャンネル・マスク(80 MHz チャンネルの中心周波数が 160MHz 離れている場合)

dBr のマスク値が決定された後、-59 dBm/MHz 以下にマスクの値がないことを保証するために、送信電力と一緒にチェックする必要があります(言い換えれば、可能な限り低いマスクの値は-59 dBm/MHz となります。)

4.5.2 スペクトラム・フラットネス

スペクトラム・フラットネス測定により、それぞれのサブキャリアが同電力であるかどうか確認できます。サブキャリアの範囲の平均エネルギーを決定し、その範囲内に個々のサブキャリアのエネルギーが指定された値を超えているかどうかを確認することによって行います。図 12 は、表 9 に示す A、B、および C の値を持つサブキャリアの関数としてスペクトラム・フラットネスの仕様を示しています。例えば、20MHz チャンネル幅のチャンネル・フラットネスを測定した際、インデックス5のサブキャリアはサブキャリア1～16 および -1～-16 の平均エネルギーの+/-4 dB 以内、またインデックス 20 のサブキャリアは、サブキャリア1～16 および-1～-16 の平均エネルギーの+4/-6 dB 以内である必要があります。バンド・エッジでは送信フィルタのアッテネーションが大きく、平均エネルギーの値を歪めてしまう可能性があるため外側のキャリアは、計算には使われません。

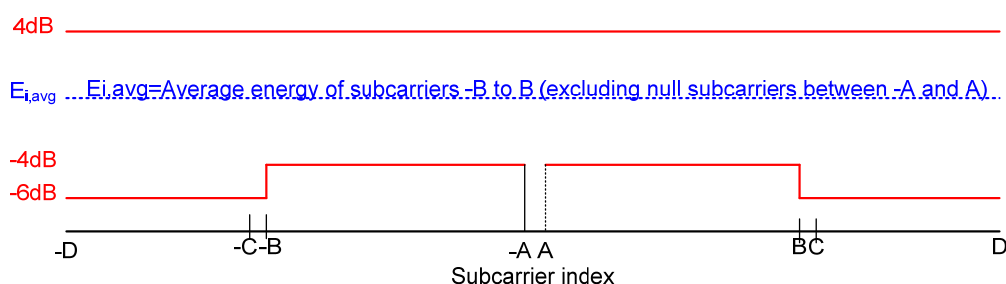


図 12: スペクトラム・フラットネス要件 (20、40、および 80 MHz 帯域幅)

表 9: スペクトラム・フラットネス要件 A、B、C、D、 $E_{i,avg}$ に対するサブキャリアのインデックス

チャンネル・サイズ	A	B	C	D	$E_{i,avg}$ に対するサブキャリア
20 MHz	1	16	17	28	1 ~ 16、-1 ~ -16
40 MHz	2	42	43	58	2 ~ 42、-2 ~ -42
80 MHz	2	84	85	122	2 ~ 84、-2 ~ -84

160 MHz は 80 + 80 MHz の信号と相互使用できる必要があるため、スペクトラム・フラットネスの仕様は少し複雑になっています。80+80 MHz の送信機から出る隣接する二つの 80 MHz 信号を 160 MHz の受信機が受ける場合があります、逆に 160 MHz 送信機の信号を 80+80 MHz の受信機が受ける場合もあります。従って、160 MHz のフラットネスをテストする場合には、その両方の場合を考慮する必要があります。(より詳細は[11]を参照)

図 13 の一番上の図は、160 MHz 信号だけを考慮した場合の仕様を示しています。これは 80 MHz の仕様を 250/122 倍したものです。この倍率は、160 MHz のサブキャリア数 250 を 80 MHz のサブキャリア数 122 で割ったものです。

中段の図は 80+80 MHz 信号だけを考慮した場合の仕様を示しています。これは、二つの 80 MHz 信号を並べたものです。(80 MHz のバンド・エッジには 6 本のヌル・キャリアがあることが分かります。)キャリア番号は、160 MHz のキャリア配置に合わせて書き換えられています。

実際の 160 MHz のスペクトラムフラットネス仕様は、下段の図にあるように、上の二つの仕様を重ね合わせることで得られます。具体的には、平均エネルギーは-172~-130、-126~-44、44~126、130~172 のサブキャリアの平均から得られます。これらのサブキャリアは平均エネルギー ± 4 dB に入っている必要があります。また、サブキャリア-250~-173、-43 から-6、6~43、173~250 は平均エネルギー ± 4 dB に入っている必要があります。

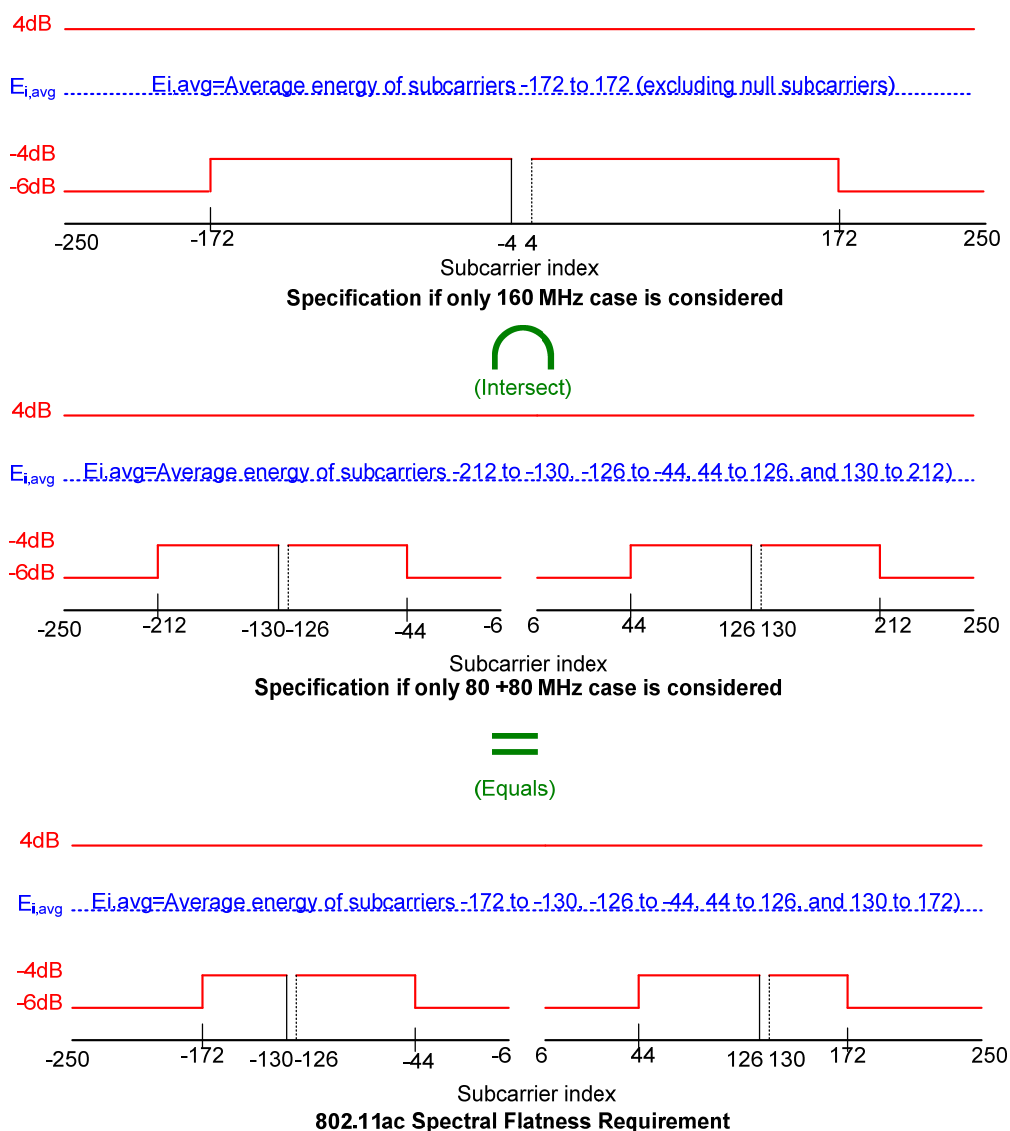


図 13: 160 MHz スペクトラムフラットネス仕様の導出

4.5.3 送信中心周波数およびシンボルクロック許容度

どちらの場合も、許容値は 20 ppm (100 万分の 1) 以内であること、と[3]に示されています。[3]にあるように、シンボルクロックや中心周波数の不正確さをもつ OFDM 信号は、高いコンスタレーション・エラーにつながるといえます。送信機の周波数誤差は、スペクトラム・マスクの不適合を招き、さらにはアクセスポイント間の接続にも支障をきたします。

4.5.4 送信変調精度

キャリアリークと相対的なコンスタレーション・エラー (RCE) の二つの測定は、変調精度を評価するために使用されています

4.5.4.1 送信キャリアリーク

名前が示すように、これは中心周波数にリークしているエネルギーの量を測定します。使用する受信機によっては、キャリアリークが大きいと復調の劣化につながる可能性があるため、テストが必要です。更に、受信機のトリガ上の問題を起こす可能性もあります。

802.11ac のキャリアリーク仕様は、送信バンド幅に対するローカル信号の位置によって異なります。 ([16]参照)

- 80+80 MHz の非隣接信号の場合、ローカル信号は各チャンネルの外に位置するので、スペクトラム・マスクの仕様を満たしていれば問題ありません。(図 11 参照)
- ローカル信号が、送信バンド幅の中央に位置する場合、平均サブキャリア・パワーより小さい必要があります。(図 14 参照)
- ローカル信号が送信バンドの中央に位置しない場合、ローカル信号の周波数のパワーは、-20 dBm もしくは全送信パワーから 32dB 引いた値のいずれか小さい方を超えてはいけません。20 MHz PPDU が 80 MHz チャンネルで送信される時 (図 15)、また 40 MHz PPDU が 80 MHz チャンネルで送信される時 (図 16)、このようなケースに当てはまります。

キャリアリークは分解能帯域幅 (RBW) を 312.5 kHz に設定して測定されます。

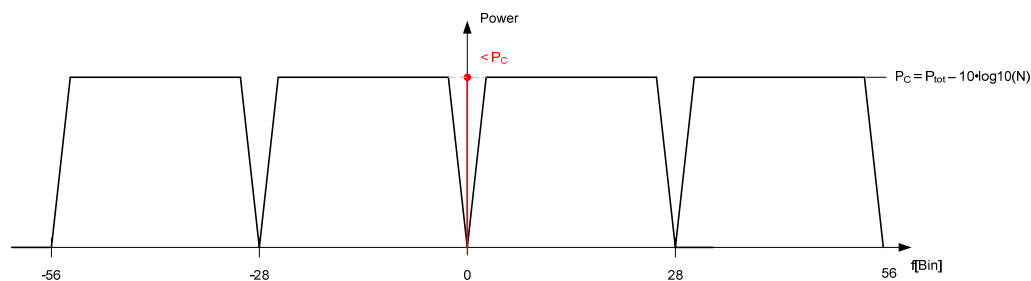


図 14: キャリアリークが 80 MHz 送信バンドの中央に位置する場合

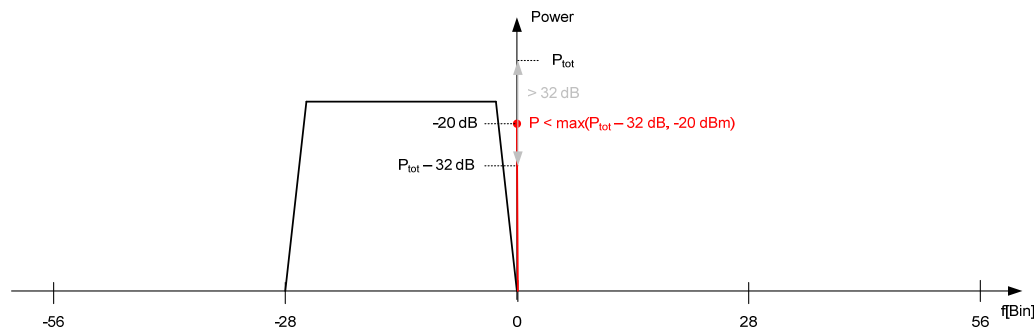


図 15: キャリアリークが 80 MHz 送信バンドの中央に位置しない場合 (20 MHz 信号の例)

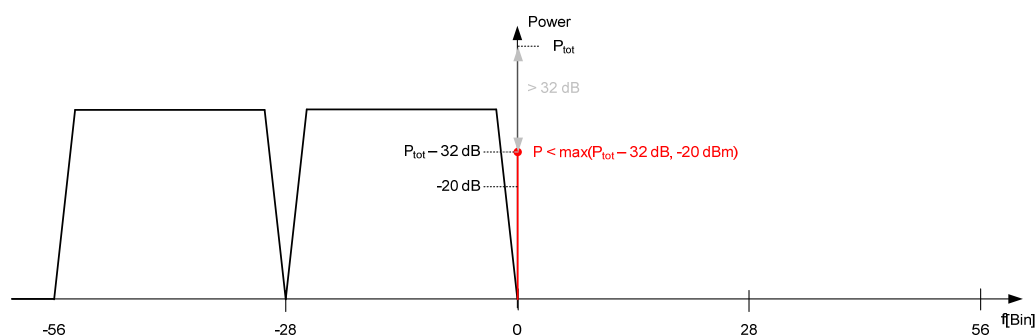


図 16: キャリアリークが 80 MHz 送信バンドの中央に位置しない場合 (40 MHz 信号の例)

4.5.4.2 送信コンスタレーション・エラー

相対的なコンスタレーション・エラー (RCE) の要件は、表 10 に示されています。この要件は、信号帯域幅に関係なく同じです。テストでは、空間ストリーム数は、各送信ポートで測定されている RCE の送信アンテナの数に等しくなるように要求されています。

送信された信号は、フレームごとに少なくとも 16 のシンボルの 19 フレーム以上である必要があり、ランダムデータが含まれている必要があります。

表 10: RCE 仕様

MCS	変調	符号化率	RCE (dB)
0	BPSK	1/2	-5
1	QPSK	1/2	-10
2	QPSK	3/4	-13
3	16-QAM	1/2	-16
4	16-QAM	3/4	-19
5	64-QAM	2/3	-22
6	64-QAM	3/4	-25
7	64-QAM	5/6	-28
8	256-QAM	3/4	-30
9	256-QAM	5/6	-32

4.6 802.11ac 受信仕様

4.6.1 受信最小入力感度

最小入力感度テストでは、受信機が与えられた最小の入力強度レベルの信号を復調ができるかどうかを検証します。成功した復調は 10% 未満のパケット誤り率 (PER) によって判断されます。802.11ac では最小入力レベルは、表 11 に示すように変調、符号化率および帯域幅に依存します。このテストに使用される 11ac パケットは 4096 バイトの長さで、長い GI (800 ナノ秒のガードインターバル)、BCC、および非 STBC を使用します。

表 11: 受信最小入力感度仕様

変調	符号化率 (R)	最小感度 (20 MHz PDU) (dBm)	最小感度 (40 MHz PDU) (dBm)	最小感度 (80 MHz PDU) (dBm)	最小感度 (160 MHz or 80+80 MHz PDU) (dBm)
BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73
QPSK	1/2	-79	-76	-73	-70
QPSK	3/4	-77	-74	-71	-68
16-QAM	1/2	-74	-71	-68	-65
16-QAM	3/4	-70	-67	-64	-61
64-QAM	2/3	-66	-63	-60	-57
64-QAM	3/4	-65	-62	-59	-56
64-QAM	5/6	-64	-61	-58	-55
256-QAM	3/4	-59	-56	-53	-50
256-QAM	5/6	-57	-54	-51	-48

4.6.2 隣接および非隣接チャンネル阻止

隣接チャンネル阻止テストでは、近隣のチャンネルで強い信号が存在した場合の信号検出および復調の能力を測定します。図 17 はこの概念を示しています。

受信機は、帯域幅 W MHz ($W = 20, 40, 80, \text{または } 160$) で、表 11 で与えられる最小感度レベル値よりも 3dB 高いパワーで、 f_0 での信号を復調します。デューティサイクル(オン/オフ比)が 50% より大きく、希望波と同じ帯域幅の干渉 OFDM 信号が希望波から W MHz ($f_0 + W$ MHz) のところに配置されます。また、パワーレベルは希望波よりも高めです。

干渉波の信号を上げると同時にパケットエラー率を測定します。パケットエラー率が 10% に達した際、干渉波と希望波のレベル差デルタが測定されます。このデルタは隣接チャンネル阻止と呼ばれ、表 12 の値より大きい必要があります。(160 MHz 対応の受信機であっても、法規制により、160 MHz 連続の送信が許されていない場合は、隣接チャンネル阻止テストは省略することができます。)

非隣接チャンネル阻止も似ていますが、干渉波は図 18 のように希望波から $2W$ MHz のところに配置されます。

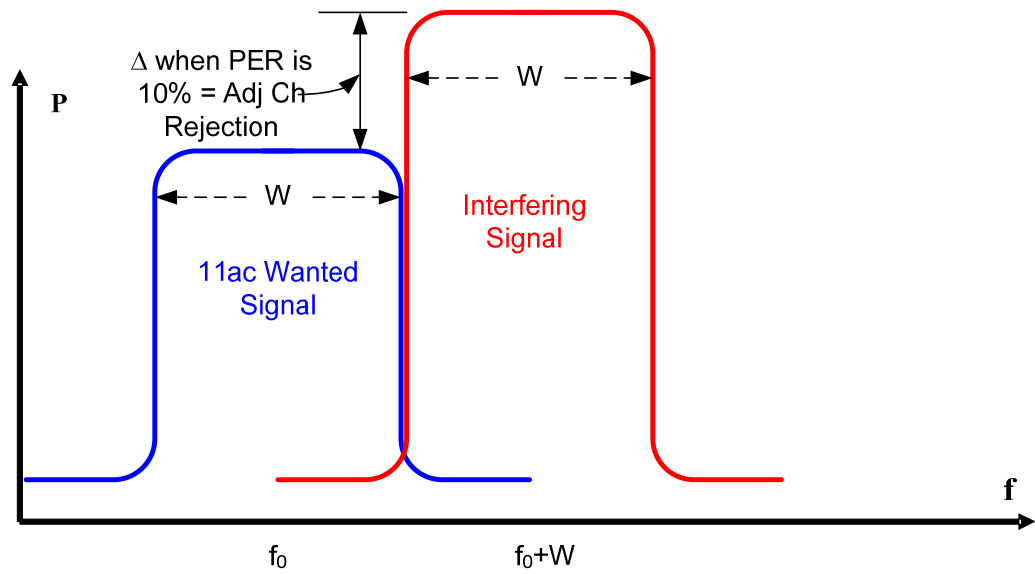


図 17: 隣接チャンネル阻止

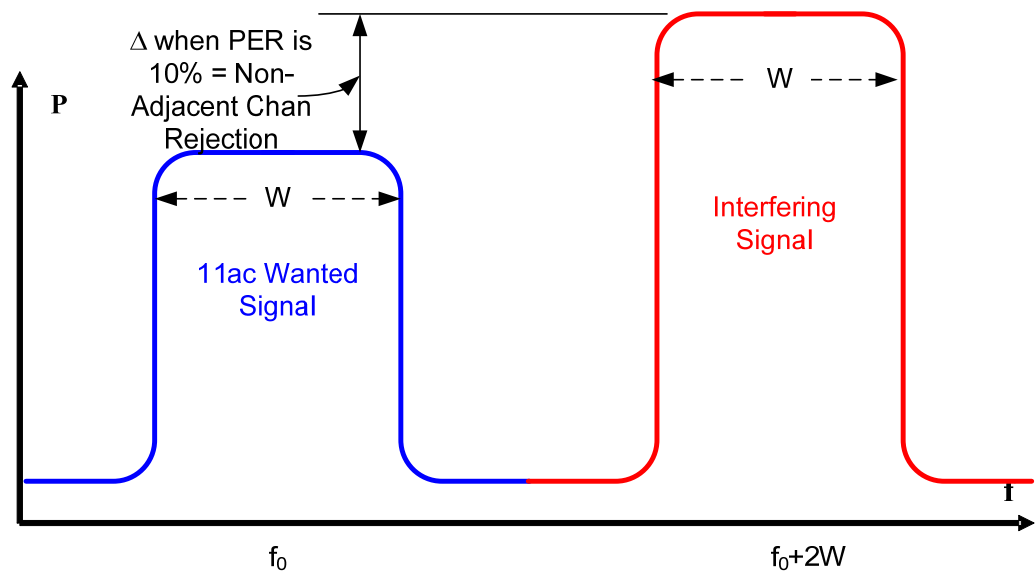


図 18: 非隣接チャンネル阻止

表 12: 最小隣接また非隣接チャンネル阻止要件

変調	レート (R)	隣接チャンネル阻止 (dB)		非隣接チャンネル阻止 (dB)	
		20/40/80/160 MHz チャンネル	80+80 MHz チャンネル	20/40/80/160 MHz チャンネル	80+80 MHz チャンネル
BPSK	1/2	16	13	32	29
QPSK	1/2	13	10	29	26
QPSK	3/4	11	8	27	24
16-QAM	1/2	8	5	24	21
16-QAM	3/4	4	1	20	17
64-QAM	2/3	0	-3	16	13
64-QAM	3/4	-1	-4	15	12
64-QAM	5/6	-2	-5	14	11
256-QAM	3/4	-7	-10	9	6
256-QAM	5/6	-9	-12	7	4

4.6.3 受信最大入力レベル

受信機の最大入力レベルテストは、11ac の信号が -30dBm の入力レベルで復調できるかどうかテストします。それぞれのアンテナで、-30dBm の信号が入力され、PER が測定されます。結果、10%未満でなければなりません。

4.6.4 クリアチャンネルアセスメント (CCA)

クリアチャンネルのアセスメントでは、11ac デバイスのチャンネルが空いているか、占有されているかどうかを判断する能力をテストします。占有されている場合、802.11 PHY は CCA インデックス信号フィールドを“busy”に設定します。

プライマリ・チャンネルでは、4us の間に、チャンネルがビジー状態であるか否かを、90%以上の確率で検出することが、デバイスに求められています。セカンダリ・チャンネルでは、チャンネルが90%以上の確率で 25us 間でビジー状態であることを検出することがデバイスに求められています。占領信号のパワーレベルは、信号の帯域幅および VHT か非 VHT 信号であるか、に依存します (20MHz のプライマリチャンネルでの非 VHT 信号の CCA の試験については、[3]を参照してください)。

5 参考文献

5.1 参考文献

- [1] Hiertz, G., Denteneer, D., Stibor, L., Zang, Y., Costa, X., & Walke, B. (2010) “The IEEE 802.11 Universe.” *IEEE Communications Magazine* January 2010: 62–70.
- [2] Liebl, Detlev, “WLAN 802.11n: From SISO to MIMO”, Rohde & Schwarz Application Note, 1MA179, March 3, 2011. [Online] Available: http://www2.rohde-schwarz.com/file_15784/1MA179_9E.pdf
- [3] Weiss, Martin, “WLAN Tests According to Standard 802.11a/b/g”, Rohde & Schwarz Application Note, 1MA69, July, 2004. [Online] Available: http://www2.rohde-schwarz.com/file_6438/1MA69_1e.pdf
- [4] Rolf de Vegt, “802.11ac Usage Models Document,” Institute of Electronic and Electrical Engineers, IEEE 802.11-09/0161r2, January 22, 2009. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0161-02-00ac-802-11ac-usage-model-document.ppt> [Accessed: May 20, 2010].
- [5] Peter Loc and Minh Cheong, “TGac Functional Requirements and Evaluation Methodology Rev. 16”, Institute of Electronic and Electrical Engineers, IEEE 802.11-09/00451r16, 2011. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0451-16-00ac-tgac-functional-requirements-and-evaluation-methodology.doc> [Accessed: Jan 19, 2011].
- [6] Greg Breit, et al, “TGac Channel Model Addendum”, Institute of Electronic and Electrical Engineers, IEEE 802.11-09/0308r12, March 18, 2010. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0308-12-00ac-tgac-channel-model-addendum-document.doc> [Accessed: May 20, 2010]
- [7] IEEE 802, “Specification Framework for TGac,” Institute of Electronic and Electrical Engineers, IEEE 802.11-09/0992r21, 2011. [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0992-21-00ac-proposed-specification-framework-for-tgac.doc> [Accessed: Jan. 28, 2011].
- [8] IEEE 802, “IEEE P802.11ac/D0.3”, Institute of Electronic Engineers, April 7, 2011
- [9] IEEE 802, IEEE Std 802.11n™-2009, October 29, 2009
- [10] IEEE 802, “IEEE Draft P802.11-REVmb™/D7.03
- [11] IEEE 802, “IEEE Std 802.11™-2007, Institute of Electronic Engineers, June 12, 2007
- [12] Kai Shi, et al, “Phase Tracking During VHT-LTF”, Institute of Electronic and Electrical Engineers, IEEE 802.11-10/0771r12, July, 2010.

6 用語

用語(略称)	
BCC	Binary Convolutional Coding
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BW	Bandwidth
CCA	Clear Channel Assessment

CRC	Cyclic Redundancy Check
EVM	Error Vector Magnitude
GI	Guard Interval
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LDPC	Low Density Parity Check
L-LTF	Legacy Long Training Field
L-STF	Legacy Short Training Field
LO	Local Oscillator
LTF	Long Training Field
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MU	Multi User
MU-MIMO	Multi-User MIMO
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PER	Packet Error Rate
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PPDU	PLCP Protocol Data Unit
PPM	Parts Per Million
PS	Power Save (mode)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RBW	Resolution Bandwidth
RCE	Relative Constellation Error
STBC	Space Time Block Coding
STF	Short Training Field
SU	Single User
TG	Task Group
TXOP	Transmission Opportunity
VHT	Very High Throughput
WLAN	Wireless Local Area Network

ローデ・シュワルツについて

ローデ・シュワルツ・グループ（本社：ドイツ・ミュンヘン）は、エレクトロニクス分野に特化し、電子計測、放送、無線通信の監視・探知および高品質な通信システムなどで世界をリードしています。75年以上前に創業し、世界70カ国以上で販売と保守・修理を展開している会社です。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

本社／東京オフィス

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1

住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

神奈川オフィス

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-8-12

Attend on Tower 16 階

TEL : 045-477-3570 (代) FAX : 045-471-7678

大阪オフィス

〒564-0063 大阪府吹田市江坂町 1-23-20

TEK 第2ビル 8 階

TEL:06-6310-9651 (代) FAX:06-6330-9651

サービスセンター

〒330-0075 埼玉県さいたま市浦和区針ヶ谷 4-2-20

浦和テクノシティビル 3 階

TEL:048-829-8061 FAX:048-822-3156

E-mail: info.rsjp@rohde-schwarz.com

<http://www.rohde-schwarz.co.jp/>

Certified Quality System
ISO 9001
DQS REG. NO 1954 QM

Certified Environmental System
ISO 14001
DQS REG. NO 1954 UM

このアプリケーションノートと付属のプログラムは、ローデ・シュワルツ社のウェブサイトのダウンロード・エリアに記載されている諸条件に従ってのみ使用することができます。

掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。

おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。あらかじめご了承ください。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1 住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

www.rohde-schwarz.co.jp