

WiFi : 802.11の物理層と トランスミッタ測定

目次

はじめに	3	物理層の変調形式	25
IEEE 802.11規格とフォーマット	4	DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum、 直接スペクトラム拡散)	25
IEEE 802.11-1997またはレガシ・モード	4	OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing、直交周波数分割多重)	28
IEEE 802.11b	4	データ変調と符号化 (FEC) の組合せ	29
IEEE 802.11a	5	無線LANの動作プロセス	31
IEEE 802.11g	6	無線LAN デバイスの構造	31
IEEE 802.11n	6	接続の確立	32
IEEE 802.11ac	7	同期	33
プロトコル・アーキテクチャの概要	8	Authentication (オーセンティケーション)	33
チャンネル割り当てとスペクトラム・マスク	10	Association (アソシエーション)	33
チャンネルの帯域幅	10	データの交換	33
スペクトラム・マスク	11	トランスミッタ測定	34
オーバーラップ・チャンネル	12	トランスミッタのテスト条件	34
国による規制	15	トランスミッタ・テスト	34
物理層 (PHY) のフレーム構造	17	トランスミッタ・パワー	34
管理フレーム	18	送信スペクトラム・マスク	34
制御フレーム	19	スペクトラム・フラットネス	34
データ・フレーム	19	送信中心周波数の許容度	35
802.11b のパケット・フォーマット	20	送信中心周波数のリーク	35
802.11a/g のパケット・フォーマット	21	送信コンスタレーション・エラー	35
802.11n のパケット・フォーマット	22	送信変調精度 (EVM) テスト	35
802.11ac のパケット・フォーマット	24	シンボル・クロック周波数の許容度	35
		802.11と802.11bのトランスミッタ要件	36
		802.11aのトランスミッタ要件	37
		802.11gと802.11nのトランスミッタ要件	38
		802.11acのトランスミッタ要件	39
		まとめ	40

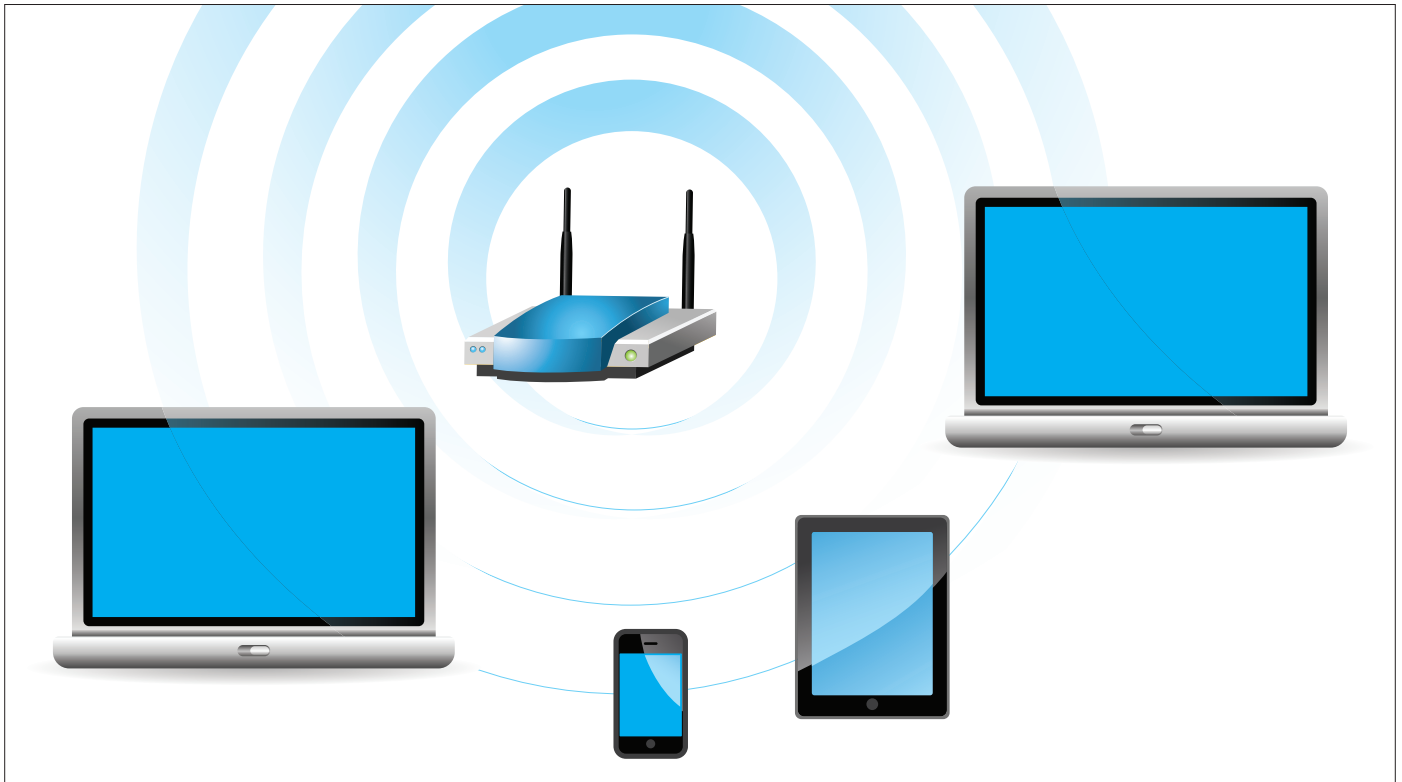


図1. 802.11規格により、何百万という電子デバイスが無線でつながり、データ交換が可能になる

はじめに

WiFiは、無線で数多くの電子デバイスの接続、データ交換を可能にする技術です。WiFiアライアンスでは、WiFiデバイスを「IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers’) 802.11規格をベースとしたWLAN (Wireless Local Area Network、無線LAN) 製品」と定義しています。

IEEE 802.11デバイスの重要な利点は、LAN (Local Area Network) をローコストに展開できることです。屋外や空港など、すべてのデバイスをケーブルで接続することが現実的でないところでは、無線LANを提供できます。WiFiアライアンスによってWiFi認定を受けた製品であれば、すべてのメーカーの製品は基本レベルのサービスを同時に利用できます。

今日、何百万というIEEE 802.11デバイスが世界中で使用され、同じ周波数バンドで動作しているため、その共存が重要になります。古いデバイスが引退しても、個人、事業者によっては古い規格のデバイスを何年も使用することがあります。事業者によっては802.11bのデバイスでニーズを満たしており、変更する必要がないかもしれません。したがって、より広い帯域の802.11機器を展開するときには、近くに設置されている古い無線LANへの影響を最少にし、従来からあるアクセス・ポイントとも通信できるようにする必要があります。

この入門書では、802.11規格の各世代の概要、物理層の特長、テスト要件について説明します。この入門書では、802.11とIEEE 802.11は同義として使用します。

IEEE 802.11規格とフォーマット

IEEE 802は、LAN (Local Area Network) とMAN (Metropolitan Area Network) に関するIEEEのファミリ規格です (表1を参照)。IEEE 802規格ファミリは、IEEE 802 LAN/MAN規格委員会 (LMSC) によって維持されています。それぞれの領域は、個々のワーキング・グループ (WG) が担当しています。

IEEE 802.11は、WLAN (Wireless Local Area Network、無線LAN) 通信実装のためのMAC (メディア・アクセス制御) とPHY (物理層) の仕様から成ります。802.11ファミリは、同じ基本プロトコルを共有する一連の無線通信技術です (表2を参照)。これらの規格は、WiFiバンドを使用した無線ネットワーク製品の基礎となります。802.11で使用される無線周波数の割り当ては、国ごとに異なります。

IEEE 802.11-1997 またはレガシ・モード

IEEE 802.11規格のオリジナル・バージョンは1997年に発行されましたが、ほとんど使われていません。仕様で規定されたビット・レートは、1または2Mbps (bits per second、ビット/秒) でした。以下の3つの物理層技術が規定されていました。

- 1Mbpsによる拡散赤外線
- 1Mbpsまたは2Mbpsによる周波数ホッピングスペクトラム拡散
- 1Mbpsまたは2Mbpsによる直接シーケンス・スペクトラム拡散

後ろ2つの無線技術は、2.4GHzのISM (Industrial Scientific Medical) 周波数バンドのマイクロ波伝送を使用していました。規定されたデータ・レートは、赤外線 (IR) 信号、または周波数ホッピングか直接シーケンス拡散スペクトラム (DSSS) 無線信号による伝送でした。IRは規格の一部として残っていますが、現実には実装されていません。

オリジナルの仕様の欠点として、数多くの選択肢があったためにインターオペラビリティ (相互運用性) に問題がありました。厳格な仕様というよりもベータ仕様に近いものであり、当初は製品ベンダに対して製品の差別化のために柔軟性を与えたものであり、ベンダ間の相互運用性はほとんどありませんでした。

802.11のDSSSバージョンは1999年、ただちに802.11bとして補完 (発行) され、ビット・レートは11Mbpsになりました。802.11のネットワークが広く展開されたのは、802.11bの発行以後でした。これにより、オリジナルの802.11-1997の規格を

IEEE 802規格	
802.1	Bridging & Management (ブリッジ/管理)
802.2	Logical Link Control (論理リンク制御)
802.3	Ethernet - CSMA/CD Access Method (Ethernet - CSMA/CDアクセス方法)
802.4	Token Passing Bus Access Method (トークン・パッシング・バス・アクセス方法)
802.5	Token Ring Access Method (トークン・リング・アクセス方法)
802.6	DQDB (Distributed Queue Dual Bus) アクセス方法
802.7	Broadband LAN (広帯域LAN)
802.8	Fiber Optic (光ファイバ)
802.9	Integrated Services LAN (統合サービスLAN)
802.10	Security (セキュリティ)
802.11	Wireless LAN (無線LAN)
802.12	Demand Priority Access (デマンド・プライオリティ・アクセス)
802.14	Medium Access Control (メディア・アクセス制御)
802.15	Wireless Personal Area Networks (ワイヤレス・パーソナル・エリア・ネットワーク)
802.16	Broadband Wireless Metro Area Networks (広帯域無線メトロ・エリア・ネットワーク)
802.17	RPR (Resilient Packet Ring)

表1. 802規格ファミリ

使用したネットワークの展開はほとんどなくなりました。この理由により、この入門書のいくつかの章ではオリジナルのレガシ・モードの詳細については説明していません。

IEEE 802.11b

802.11bの最大ロー・データ・レートは11Mbpsであり、オリジナルのレガシ規格で定義されたのと同じメディア・アクセス方法を使用しています。802.11bの製品が市場に出回ったのは2000年の始めであり、オリジナルの規格で定義された変調技術を直接的に拡張したものです。802.11bの劇的なスループットの増加 (オリジナルの規格に比べて) と大幅な製品価格の低下により、802.11bは無線LAN技術として急速に認知されました。

IEEE 802.11のPHY規格						
発行年	規格	周波数バンド	周波数帯域	変調方式	拡張アンテナ技術	最大データレート
1997	802.11	2.4GHz	20MHz	DSSS, FHSS	—	2Mbps
1999	802.11b	2.4GHz	20MHz	DSSS	—	11Mbps
1999	802.11a	5GHz	20MHz	OFDM	—	54Mbps
2003	802.11g	2.4GHz	20MHz	DSSS, OFDM	—	54Mbps
2009	802.11n	2.4GHz, 5GHz	20MHz, 40MHz	OFDM	MIMO、 最大4つの空間ストリーム	600Mbps
2013	802.11ac	5GHz	40MHz, 80MHz、 160MHz	OFDM	MIMO、MU-MIMO、 最大8つの空間ストリーム	6.93Gbps

表2. IEEE 802.11のPHY規格

802.11bデバイスの欠点の一つに、2.4GHz帯で動作する他の製品との干渉問題があります。2.4GHzレンジで動作するデバイスには、電子レンジ、コードレス電話、Bluetoothデバイス、ベビーモニター、いくつかのアマチュア無線機器などがあります。WiFiが普及するにしたがって、2.4GHzバンドによる干渉とユーザ密度が大きな問題となりました。

IEEE 802.11a

802.11aの規格は、1999年にオリジナルの規格に追加され、承認されました。802.11aの規格はオリジナルの規格と同じコア・プロトコルを使用しており、5GHzで動作する802.11ファミリの最初の規格となりました。52のサブキャリアを持つ直交周波数分割多重（OFDM）を使用して最大54Mbpsのデータ・レートを実現しており、一般的には20Mbps台のスループットを実現しています。今日では、多くの国が5.47～5.725GHzバンドでの動作を認めています。これにより5GHzバンドでのチャンネル数が増え、無線ネットワーク全体の容量が大幅に増加します。802.11aと802.11bは異なる周波数バンドで動作するため、相互運用性がありません。しかし、現在のほとんどの企業クラスのアクセス・ポイントには、マルチバンドに対応しています。

2.4GHzのISMバンドは混雑しているため、5GHzバンドを使用する802.11aには大きな強みがあります。混雑で起こる品質低下には、頻繁に発生する接続の遮断やサービスの品質低下などがあり

ます。しかし、より高い5GHzの周波数には少なからず欠点があり、802.11aの通信エリアは802.11b/gよりもわずかに狭くなります。802.11aの信号は、その信号経路にある壁やその他の硬いものによって吸収され、また、信号強度の経路損失は信号周波数の二乗に比例するため、802.11bの信号ほど遠くに届きません。一方、OFDMには室内のオフィスなどの高いマルチパス環境において伝搬の利点があり、高い周波数では大きな利得を持った小型アンテナが実現可能なので、高い周波数バンドによる動作の欠点を補います。802.11aは、利用可能なチャンネル数が多い、隣接する干渉システム（電子レンジ、コードレス電話、赤ちゃんモニター）がないなど、802.11b/gに対して周波数および信頼性の優位点があります。

802.11aと802.11bの策定時期が同じであることが混乱をもたらしています。802.11aの製品は、5GHzコンポーネントの製造の難しさにより、802.11bの製品よりも出荷開始が遅れました。さらに、第一世代の製品の性能が十分ではありませんでした。第二世代の製品出荷が始まったとき、すでに安価な802.11b製品が広く普及していたため、802.11aの製品は広く普及しませんでした。しかし、初期のコスト上の不利にもかかわらず、802.11b/gのみのネットワークに対してより大きな容量、信頼性が求められるビジネス分野において、802.11aは後に企業ネットワーク環境で広く浸透することになります。このため、この入門書では802.11bについて多く言及します。

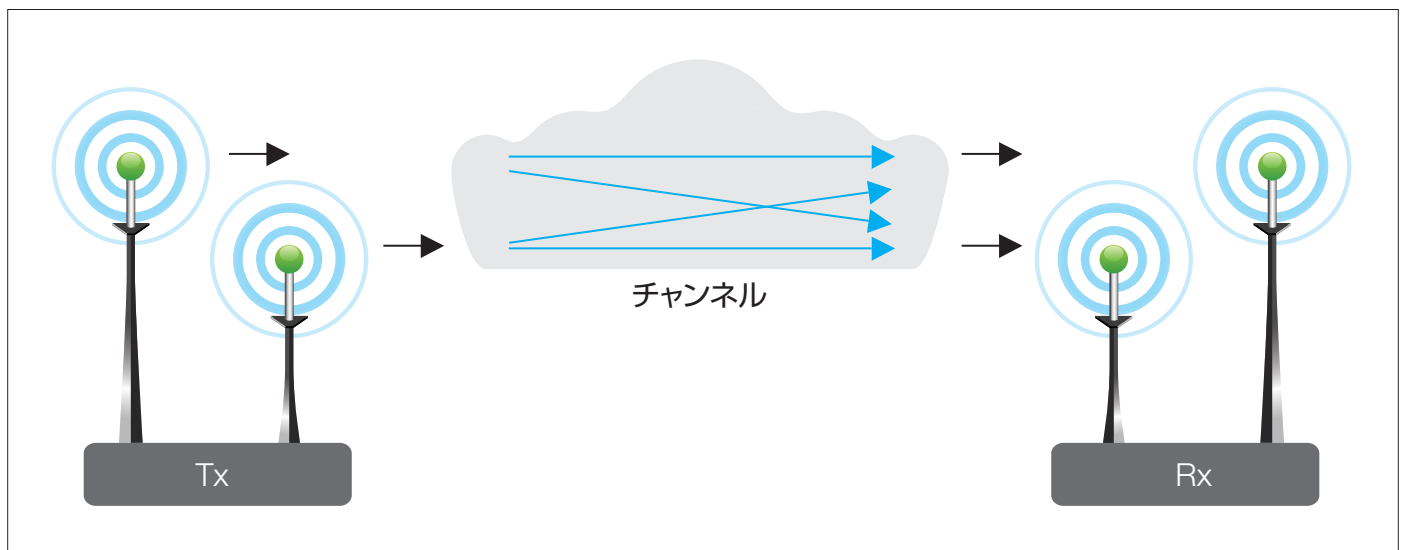


図2. MIMOでは、マルチアンテナを使用することで、1本のアンテナ使用に比べてより多くの情報を明確に分離できる

IEEE 802.11g

802.11gは2003年1月に発行しましたが、より高速で低コストな製品の要求により、規格承認の随分前から一般消費者の間で急速に普及しました。2003年の夏には、ほとんどのデュアルバンド802.11a/b製品がデュアルバンド／トライモードになり、1つのモバイル・アダプタ・カードまたはアクセス・ポイントで802.11aおよびb/gをサポートするようになりました。

802.11gは802.11bと同様、2.4GHzバンドで動作しますが、802.11aと同じOFDMベースの伝送方法を使用します。前方誤り訂正 (FFC) コードを除き、最高物理層54Mbpsで動作します。802.11gのハードウェアは、802.11bのハードウェアに対して完全に下位互換性があります。しかし、802.11gのネットワーク内に802.11bのデバイスがあると、802.11gネットワーク全体のスピードが大幅に低下します。

802.11gは広く受け入れられましたが、すでに混雑している2.4GHzレンジで802.11bが持つ、同じ干渉問題が存在します。また、規格の成功により、都市部での混雑による使用／密度問題もあります。干渉を避けるため、米国では、重ならず可以使用するチャンネルを3つのみ (チャンネル1、6、11で25MHz間隔) にしています。他の国も同様な規制を実施しています。ヨーロッパでは4つのチャンネル (チャンネル1、5、9、13で20MHz間隔) にしています。このように分離しても、側波帯があるため、非常に弱いものですが干渉が存在します。

IEEE 802.11n

802.11nの改正では、無線LANの通信距離、信頼性、スループットを改善する、数多くの強化が含まれました。物理 (PHY) レイヤでは、マルチアンテナと広いチャンネルを活かすために、進化した信号処理と変調技術が追加されました。メディア・アクセス制御 (MAC) レイヤでは、プロトコルを拡張して利用可能な帯域幅をより効率的に使用しています。これにより、HT (High Throughput) エンハンスメントでデータ・レートを最大600Mbpsまで高め、802.11a/gの54Mbpsに対して10倍以上の改善となりました。

802.11nは、2.4GHz、5GHzバンドの両方で動作します。5GHzバンドのサポートはオプションです。IEEE 802.11nは802.11規格をもとに、PHYレイヤのMIMO (Multiple-input multiple-output) と40MHzチャンネルの追加、さらにMACレイヤのフレーム・アグリゲーションを追加しています。

802.11nのほとんどの機能強化は、マルチアンテナによる同時送受信によって可能になっています。802.11nでは、“1×1” から“4×4” までの数多くの“M×N” アンテナ構成を定義しています。MIMOは、マルチアンテナを使用することで、1本のアンテナ使用に比べてより多くの情報を明確に分離できます。これを実現する方法が空間分割多重 (SDM, Spatial Division Multiplexing) であり、複数の独立したデータ・ストリームを空間的に多重化し、1つの空間チャンネル帯域で同時に伝送します。MIMOは、分解された空間データ・ストリームの数が増えるので、データ・スループットが大幅に増加します。トランスミッタ、レシーバの両方において、空間ストリームごとに別々のアンテナが必要になります。



図3. 802.11デバイスの普及により、高いスループットを必要とする新しい使用形態の要求が増加した

同時データ・ストリーム数は、リンクの両側で使用されるアンテナの少ない方の数によって制限されます。しかし、それぞれの無線の方が、独立したデータを送る空間ストリームの数を制限します。 $M \times N = Z$ により、与えられた無線の容量がわかります。Mは、無線で使用できる送信アンテナ数の最大値です。Nは、無線で使用できる受信アンテナ数の最大値です。Zは、無線が使用できるデータ空間ストリーム数の最大値です。例えば、送信で2つのアンテナ、受信で3つのアンテナで無線伝送できますが、送受信できるデータ・ストリームは $2 \times 3 : 2$ となります。

もう一つの802.11nのオプション機能が40MHzチャンネルです。従来の802.11製品は、約20MHz幅のチャンネルを使用します。802.11nの製品は20MHzまたは40MHz幅のオプションがあるため、APも40MHzになります。40MHzの帯域幅で動作するチャンネルは、1つの20MHzチャンネルに対して2倍のPHYデータ・レートが可能になります。2.4GHzまたは5GHzモードのどちらでも広い帯域幅が利用できますが、同じ周波数を使用する他の802.11システムまたはBluetoothなどの802.11ではないシステムと干渉してはいけません。

IEEE 802.11ac

無線LANの初期の規格は、ノート・コンピュータを家庭、オフィス、さらに屋外で接続するために設計されました。無線LANの普及と成功により、高いスループットを必要とする、次のような使用モデルの要求が出てきました。

- ワイヤレス・ディスプレイ
- HDTVなどのコンテンツの家庭内配信
- 大容量のファイルのサーバからの迅速なダウンロード/アップロード
- バックホール・トラフィック（メッシュ、ポイント・トゥ・ポイントなど）
- キャンパス、ホールへの展開
- 製造ラインの自動化

入門書

VHT (Very High Throughput) としても知られるIEEE802.11acは、VHT (Very High Throughput) としても知られるIEEE802.11acは、5GHz帯でスループットを実現するために開発された規格です。802.11acは、可能な限り802.11n (および802.11a) を再利用するように計画されています。こうすることで、下位互換性や共存が可能になり、802.11acの開発エンジニアはスループット要件の達成に必要な新機能のみに注力することができます。

802.11acの仕様では、マルチステーションのWLANスループットで最低1Gbpsを、シングル・リンクのスループットで最低500Mbpsを要求しています。これは、802.11nで採用された無線インタフェースを拡張することで達成しています。

- 広いRF帯域幅 (最高160MHz)
- より多くのMIMO空間ストリーム (最大8)
- マルチユーザMIMO
- 高密度変調 (最大256QAM)

規格は2011年から2013年にかけて開発され、802.11 Working Groupによる最終承認を得て、2014年初めに発行される予定です。

すべての802.11acデバイスは、20MHz、40MHz、80MHzのチャンネルと1つの空間ストリームをサポートする必要があります。さらに、以下のオプション機能も定義されています。

- 広いチャンネル帯域幅 (80+80MHz、160MHz)
- 高密度変調サポート (オプションで256QAM)
- 2つ以上の空間ストリーム (最大8)
- マルチユーザMIMO (MU-MIMO)
- 400nsの短いガード・インターバル
- STBC (Space Time Block Coding、時空間ブロック符号化)
- LDPC (Low Density Parity Check、低密度パリティ・チェック)

必須のパラメータ (80MHz帯域幅、1空間ストリーム、64QAM 5/6) のみを使用した802.11acデバイスは、約293Mbpsのデータ・レートがあります。オプションのパラメータ (8空間ストリーム、160MHz帯域幅、256QAM 5/6、ショート・ガード・インターバル) を利用すると、ほぼ7Gbpsが可能になります。

OSIモデル

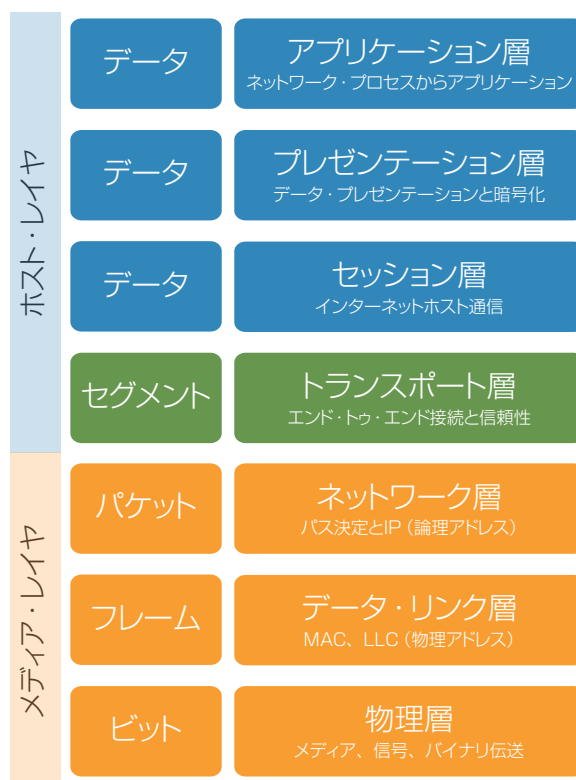


図4. OSIモデルは、ネットワークに接続された1つのコンピュータで実行するアプリケーション・プログラムから、別のネットワークに接続されたコンピュータで実行するアプリケーション・プログラムに、どのように情報が移動するかを示している

プロトコル・アーキテクチャの概要

OSI (Open Systems Interconnection) 参照モデル、いわゆるOSIモデルは、ISO (International Organization for Standardization、国際標準化機構) によって開発されました。OSIモデルは、ネットワークに接続された1つのコンピュータで実行するアプリケーション・プログラムから、別のネットワークに接続されたコンピュータで実行するアプリケーション・プログラムに、どのように情報が移動するかを示す階層モデルです。基本的に、OSIモデルはネットワークに接続されたデバイス間において、伝送メディアでデータを転送するための手順を規定しています。OSIモデルでは、図4に示すように、ネットワーク通信プロセスを7つの層 (レイヤ) に分けて定義しています。

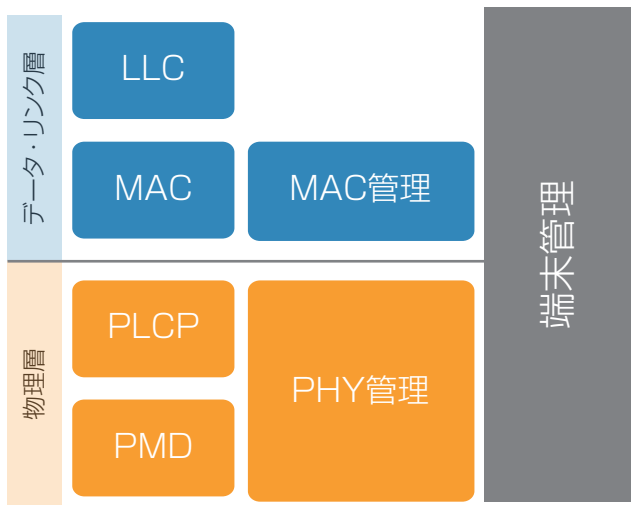


図5. OSI参照モデルのデータ・リンク層、物理層を中心とした802.11規格

通信先と接続を確立せずに通信するLANは、実質的にIEEE 802.3で規定される前の規格から始まります。802.11の規格は、無線ネットワークのプロトコルと動作をカバーしており、OSI参照モデルの2つの下位レイヤ、物理層、データ・リンク層（またはMACレイヤ）のみを規定しています。目標は、すべての802.11シリーズ規格において、MAC (Medium Access Control) レイヤまたはデータ・リンク層において下位互換性を持たせることです。このため、どの802.11規格も物理層(PHY)の特性が異なるだけです(図5を参照)。

MACレイヤは、ネットワーク装置間でのデータ転送の機能と手順、物理層で発生するエラーの検出/修正方法を規定しています。異なる種類の物理層における競合を考慮し、お互いに競合しないトラフィック・アクセスを提供します。MACレイヤは、MACサブレイヤとMAC管理サブレイヤに分かれます。MACサブレイヤは、アクセス・メカニズムとパケット・フォーマットを規定します。MAC管理サブレイヤは、パワー管理、セキュリティ、ローミング・サービスを規定します。

物理層は、デバイスの電気/物理仕様を規定します。実際には、デバイスと伝送メディア間の関係を規定します。物理層の主な機能とサービスを以下に示します。

- 通信メディアとの接続の確立と開放
- 通信リソースが複数のユーザ間で効率的に共有されるプロセスに関与。例：競合の解消とフロー制御
- ユーザ機器のデジタル・データと、通信チャンネルで使用される信号との変調または変換。この信号は、銅線や光ファイバなどの物理ケーブルまたは無線リンクで動作する

物理層は、3つのサブレイヤに分かれます。

1. PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) は、アダプテーション・レイヤとして機能
2. PLCPは、CCA (Clear Channel Assessment) モードと、異なった物理層技術のためのパケット構築に責任を持つ
3. PMD (Physical Medium Dependent) レイヤは、変調と符号化技術を規定する。PHY管理レイヤは、チャンネル・チューニングなどの管理問題をケアする

端末管理サブレイヤは、MACとPHYレイヤ間の相互関係の調整を行います。

この入門書は、802.11規格のさまざまな技術を使用してデバイスのハードウェアの設計要件を実現するために書かれているので、PHYレイヤを中心に説明します。

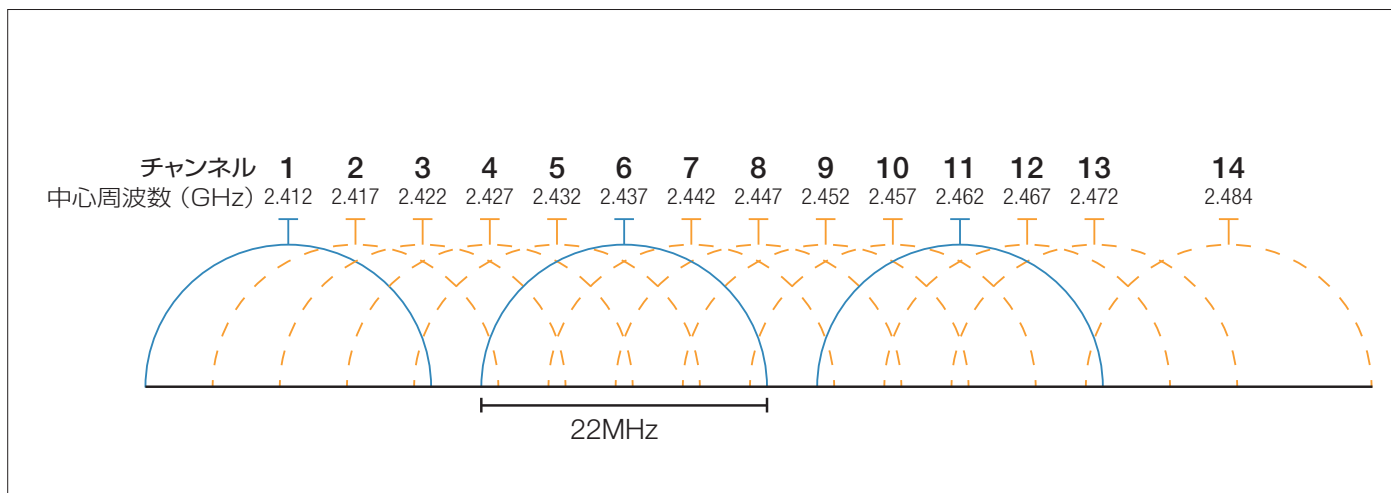


図6. 2.4GHzバンドは14の重複したチャンネルに分割される

チャンネル割り当てとスペクトラム・マスク

802.11b、802.11g、および802.11n規格は低い周波数帯として、ISMバンドの2.400~2.500GHzの周波数を利用しています。802.11a、802.11n、および802.11acの規格は、より厳しく規制されている4.915~5.825GHz帯を使用しています。これは、通常2.4GHz、5GHzの周波数帯と呼ばれています。これらの帯域は、商用の無線通信のように、中心周波数と帯域幅を持つチャンネルに分割されます。

2.4GHzバンドは、1チャンネルから始まり、中心周波数2.412GHz、5MHz離れて14のチャンネルに分割されます（図6を参照）。5.725~5.875GHzのスペクトラムのチャンネル番号は、国ごとの規制の違いによりわかりにくくなっています。

チャンネルの帯域幅

初期の802.11製品は、約20MHz幅のチャンネルを使用しています。米国では、802.11b/gの無線は、2.4GHz ISM周波数バンドにある、11の20MHzチャンネルの一つ（通常は3つの重複しないチャンネル：1、6、11のうち一つ）を使用します。802.11でOFDM PHYが採用されたときのチャンネル帯域幅は20MHzであり、後の改正では5MHzと10MHzの帯域幅サポートが追加されています。802.11aの無線は、5GHz UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) バンドの重複しない、12ある20MHzチャンネルの一つを使用します。802.11nの製品は、ISMまたはUNIIバンドのいずれかの20MHz幅または40MHz幅のチャンネルが使用できます。

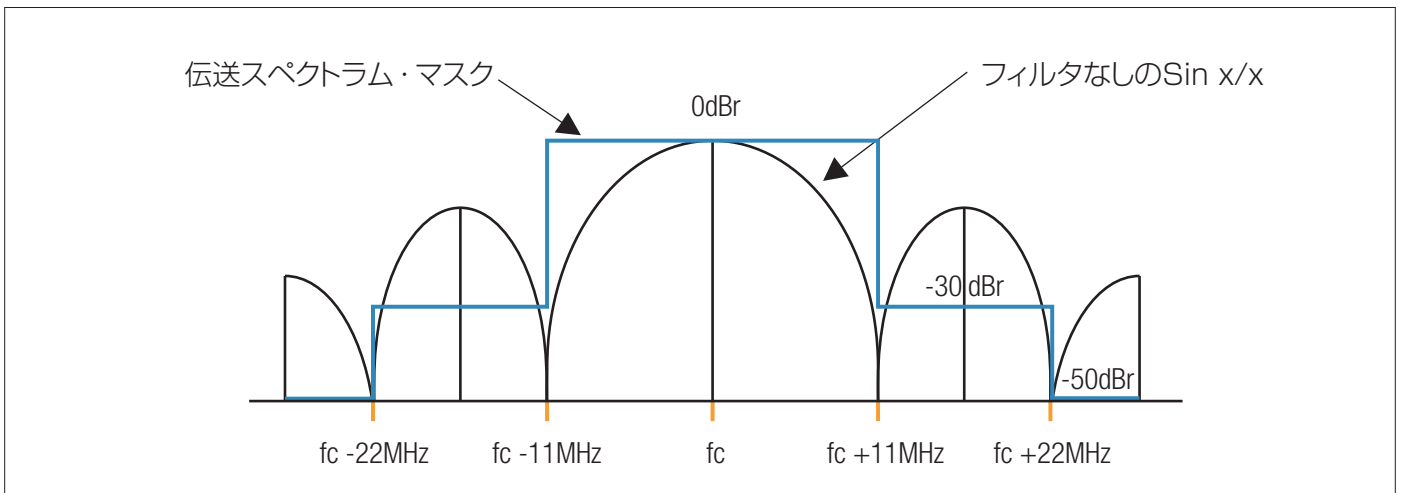


図7. 802.11b規格のスペクトラム・マスク

802.11acは、80MHz帯域幅サポートの他に、オプションで160MHz帯域幅もサポートしています。802.11acのデバイスは、20MHz、40MHz、80MHzのチャンネル帯域幅の受信、送信をサポートする必要があります。80MHzチャンネルは、2つの隣接した、重複しない40MHzチャンネルから成ります。160MHzチャンネルは、隣接（連続）する、または連続しない2つの80MHzチャンネルで構成されます。新しい規格では、より広い帯域幅を使用することでスループットを改善しています。

しかし、2.4GHz、5GHzの周波数バンドは広がらなかったことを認識することが重要です。すべての802.11規格の製品は、同じ帯域幅を共有する必要があります。スペクトラムが利用可能な場合にのみ、広い帯域幅が利用できます。数多くの802.11n無線LAN製品が5GHzバンドで40MHzチャンネルを使用するのは、このためです。

スペクトラム・マスク

802.11規格では、チャンネルごとの許容電力分布を定義したスペクトラム・マスクが規定されています。信号はスペクトラム・マスク内において、規定された周波数オフセットにおいて（ピーク振幅から）あるレベル減衰している必要があります。図7に、802.11b規格で使用されるスペクトラム・マスクを示します。エネルギーはピークから急激に低下しますが、RFのエネルギーは他のチャンネルにおいて放射されています。これについては、次の章で詳細にご説明します。

20MHz、40MHz、80MHz、160MHzチャンネルのスペクトラム・マスク

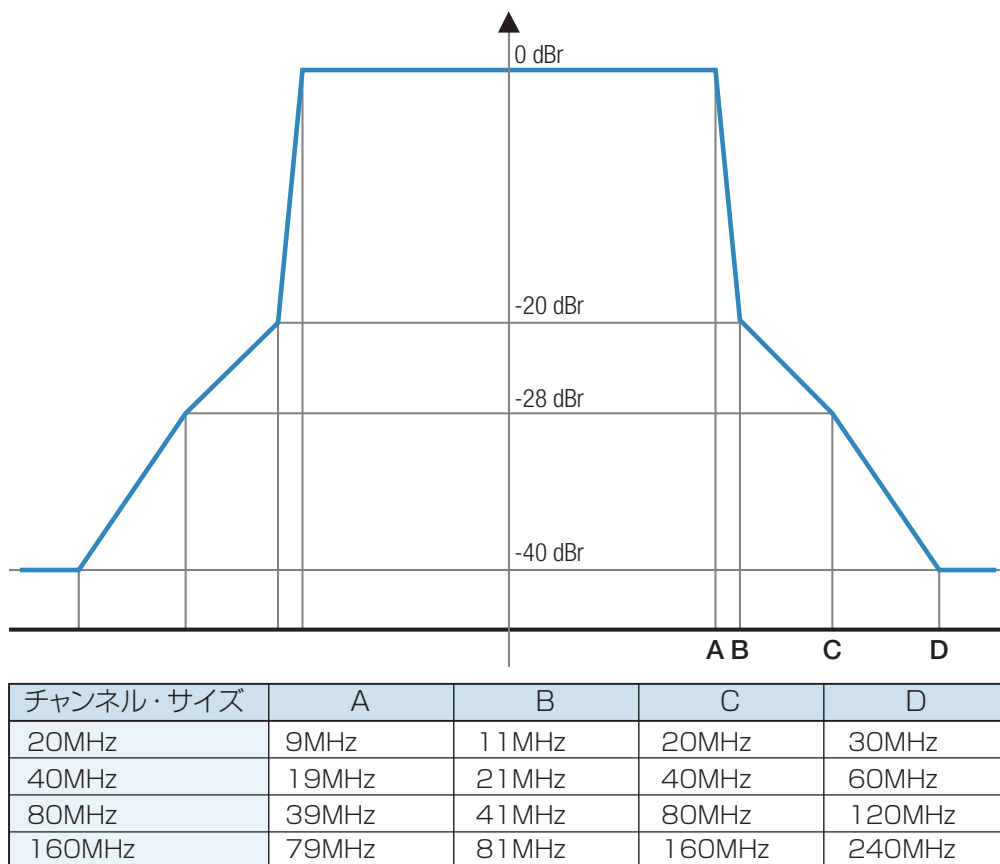


図8. 802.11a/g/n/acで使用するOFDMスペクトラム・マスク

OFDMによる符号化を使用する802.11a、802.11g、802.11n、および802.11acの規格は、まったく異なるスペクトラム・マスクを持っています（図8を参照）。OFDMではより高密度なスペクトラム効率が可能なため、BPSK/QPSKを使用する802.11bに比べて高いデータ・スループットを実現しています。

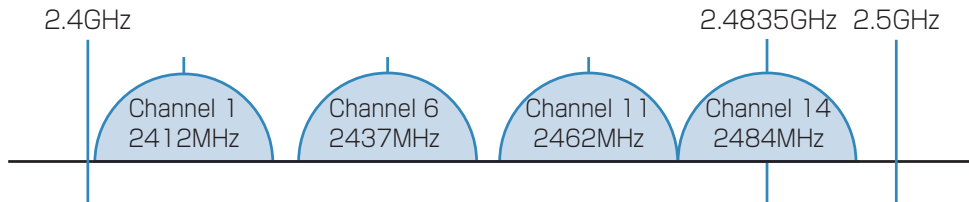
オーバーラップ・チャンネル

802.11で使用する「チャンネル」という用語は、しばしば誤解を生むことがあります。ラジオやテレビでは、運用で割り当てら

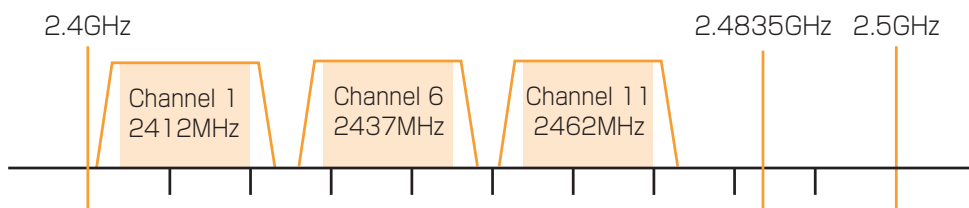
れた特定の周波数スペクトラムを意味します。図6や802.11のスペクトラム・マスクが示すように、数多くのRFエネルギーが隣接するチャンネルに入り込んでいます。スペクトラム・マスクは、特定の周波数オフセットにおける出力パワーの抑制のみを定義しているため、チャンネルのエネルギーはこのリミットを超えないものと想定されています。より正確に言えば、チャンネル間を離しておくことにより、任意のチャンネルでオーバーラップしている信号は、他の任意のチャンネルのトランスミッタへの干渉が最少になるように、十分に減衰させる必要があります。

2.4GHzの無線LANにおけるオーバーラップしないチャンネル

802.11b (DSSS) のチャンネル幅 : 22MHz



802.11g/n (OFDM) の20MHzチャンネル幅 – サブキャリアで使用される16.25MHz



802.11n (OFDM) の40MHzチャンネル幅 – サブキャリアで使用される33.75MHz

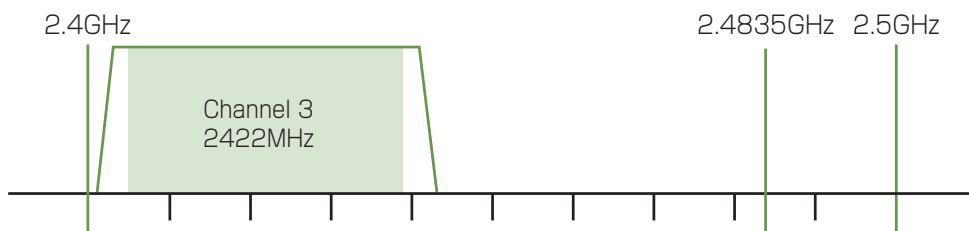


図9. 802.11規格では、オーバーラップしないチャンネルはごくわずかである

伝送デバイス間で必要なチャンネル間隔が異なることが原因となって、しばしば混乱が生じます。802.11bの規格はDSSS変調をベースとし、22MHzの帯域幅を利用しているため、3つのオーバーラップしないチャンネルがあります (1、6、11)。802.11gはOFDM変調をベースとし、20MHzの帯域幅を利用しています。このため、802.11gでは4つのオーバーラップしないチャンネル (1、5、9、13) があると思われがちですが、そうではありません。

図9は、2.4GHzバンドでオーバーラップしない可能性のあるチャンネルを示しています。オーバーラップしないチャンネルはデバイス間の間隔もしくは設置密度によっても限定されますが、特定の状況ではこの概念には利点があります。チャンネル間のオーバーラップにより信号品質、スループットにおいて許容できない劣化が発生することがあるため、アクセスポイントの設置間隔には十分な注意が必要です。

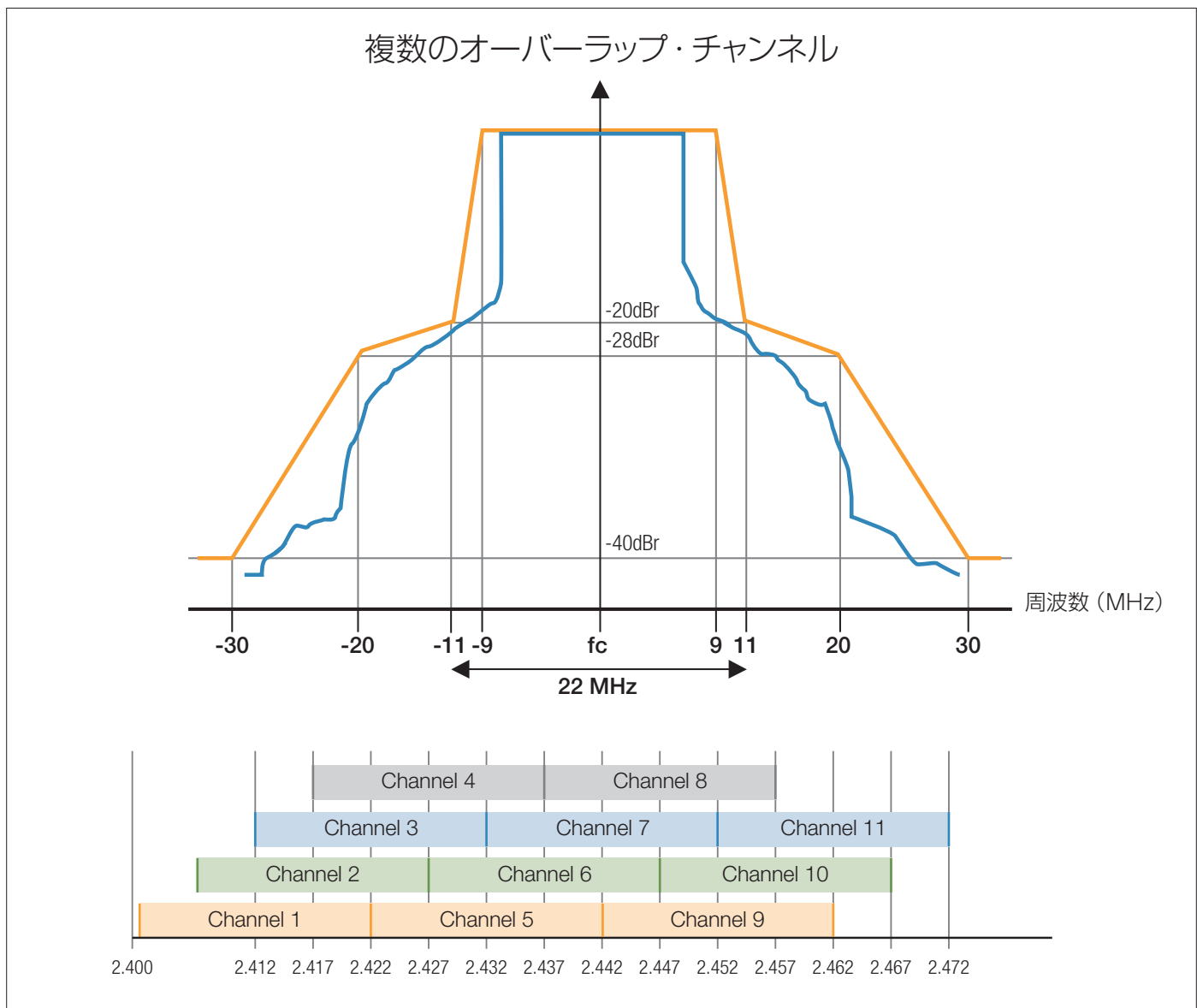


図10. RFのエネルギーは隣接するいくつかのチャンネルの周波数にも入り込むため、アクセス・ポイントは実際には複数のオーバーラップ・チャンネルを使用することがある

802.11b/g/nのチャンネル・オーバーラップによるISMの使用はさらに複雑です。802.11b/g/nの無線伝送では、変調信号はチャンネルの中心周波数からの帯域幅内に収まるように設計されます。しかし、RFのエネルギーは隣接するいくつかのチャンネルの周波数に入り込みます。このため、802.11b/g/nのアクセス・ポイントは、実際には複数のオーバーラップ・チャンネルを使用します(図10を参照)。40MHzの802.11nチャンネルをISMバンドで伝送することは、9チャンネル(中心周波数と左右の4チャン

ネルずつ)を使用することになり、この不足感をますます強めます。混雑したISMバンドで使用されていない隣接チャンネルを見つけることは困難であるため、40MHzの802.11n運用では既存の802.11b/gのアクセス・ポイントに干渉することになります。この問題を軽減するため、40MHzチャンネルを使用する802.11nのアクセス・ポイントは、レガシ(または他の40MHz以外の802.11n)デバイスに問い合わせ、共存のメカニズムを提供する必要があります。

国による規制

802.11で利用可能なチャンネルは国ごとに規制されており、さまざまなサービスでどのように無線周波数帯が割り当てられているかが指定されています（表3、4を参照）。例えば、日本では802.11bの全14チャンネルと802.11g/n-2.4の1～13チャンネルの使用が認められています。スペインでは10と11のチャンネルのみが、フランスでは10、11、12、13のチャンネルのみが認められていました。現在では、1～13のチャンネルが認められています。北米と中央／南アメリカのいくつかの国では、1～11のチャンネルのみが認められています。米国では、ISMバンドで運用される802.11規格は、FCC Rules and RegulationsのPart 15で認められているように、免許なしで運用できます。

規制パラメータはPHY管理レイヤに送られ、802.11規格のCountry Information and Regulatory Classes Annexで与えられるチャンネル開始周波数とともに使用されます。IEEEは、法的規制地域を示す「regdomain」という用語を使用しています。国ごとに、許容される送信パワー、チャンネルが占有できる時間、利用可能なチャンネルが定義されています。ドメイン・コードは、日本、米国、カナダ、ETSI（ヨーロッパ）、スペイン、フランス、中国で指定されています。regdomainの設定は変更が困難またはできないようになっているため、エンド・ユーザは米国のFCC（Federal Communications Commission、連邦通信委員会）などの地域の規制機関とトラブルになることがありません。

国ごとで利用可能な802.11の2.4GHzチャンネル				
チャンネル	中心周波数 (MHz)	北米	日本	その他の多くの国
1	2412	○	○	○
2	2417	○	○	○
3	2422	○	○	○
4	2427	○	○	○
5	2432	○	○	○
6	2437	○	○	○
7	2442	○	○	○
8	2447	○	○	○
9	2452	○	○	○
10	2457	○	○	○
11	2462	○	○	○
12	2467	×	○	○
13	2472	×	○	○
14	2484	×	11bのみ	×

表3. 国ごとで利用可能な802.11の2.4GHzバンドのチャンネル（22MHz帯域幅）

国ごとに利用可能な802.11の5GHzチャンネル													
チャンネル	中心周波数 (MHz)	米国	ヨーロッパ	日本		シンガポール	中国	イスラエル	韓国	トルコ	オーストラリア	南アフリカ	ブラジル
		40/20MHz	40/20MHz	40/20MHz	10MHz	40/20MHz	20MHz	20MHz	20MHz	40/20MHz	40/20MHz	40/20MHz	40/20MHz
183	4915	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
184	4920	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
185	4925	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
187	4935	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
188	4940	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
189	4945	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
192	4960	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
196	4980	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
7	5035	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
8	5040	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
9	5045	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
11	5055	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×
12	5060	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
16	5080	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
34	5170	×	×	クライアントのみ	×	○	×	○	○	屋内	×	屋内	屋内
36	5180	○	屋内	○	×	○	○	○	○	屋内	○	屋内	屋内
38	5190	×	×	クライアントのみ	×	○	×	○	○	屋内	×	屋内	屋内
40	5200	○	屋内	○	×	○	○	○	○	屋内	○	屋内	屋内
42	5210	×	×	クライアントのみ	×	○	×	○	○	屋内	×	屋内	屋内
44	5220	○	屋内	○	×	○	○	○	○	屋内	○	屋内	屋内
46	5230	×	×	クライアントのみ	×	○	×	○	○	屋内	×	屋内	屋内
48	5240	○	屋内	○	×	○	○	○	○	屋内	○	屋内	屋内
52	5260	DFS	屋内/DFS/TPC	屋内	×	○	DFS/TPC	○	○	屋内	DFS/TPC	屋内	屋内
56	5280	DFS	屋内/DFS/TPC	屋内	×	○	DFS/TPC	○	○	屋内	DFS/TPC	屋内	屋内
60	5300	DFS	屋内/DFS/TPC	屋内	×	○	DFS/TPC	○	○	屋内	DFS/TPC	屋内	屋内
64	5320	DFS	屋内/DFS/TPC	屋内	×	○	DFS/TPC	○	○	屋内	DFS/TPC	屋内	屋内
100	5500	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
104	5520	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
108	5540	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
112	5560	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
116	5580	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
120	5600	×	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	×	○	DFS
124	5620	×	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	×	○	DFS
128	5640	×	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	○	DFS/TPC	×	○	DFS
132	5660	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	×	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
136	5680	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	×	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
140	5700	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	×	×	×	×	×	DFS/TPC	DFS/TPC	○	DFS
149	5745	○	SRD (25 mW)	×	×	○	○	×	○	×	○	×	○
153	5765	○	SRD (25 mW)	×	×	○	○	×	○	×	○	×	○
157	5785	○	SRD (25 mW)	×	×	○	○	×	○	×	○	×	○
161	5805	○	SRD (25 mW)	×	×	○	○	×	○	×	○	×	○
165	5825	○	SRD (25 mW)	×	×	○	○	×	○	×	○	×	○

表4. 国ごとに利用可能な802.11の5GHzバンドのチャンネル。中心周波数は、20MHzまたは40MHz幅のチャンネル。80MHzチャンネルは、隣接した40MHzチャンネルで構成。160MHzチャンネルは、隣接した80MHzチャンネルで構成。80MHzと160MHzの中心周波数は、ここで示す値とは異なる

DFS (Dynamic Frequency Selection) - 周波数再利用によって、ビット/Hz/サイトにおけるシステム・スペクトラム効率を最大化するのが目的ですが、チャンネル共有による干渉及び近傍のチャンネルによる隣接チャンネルの干渉を防ぐことでサービス品質を確保することも必要です。

屋内 - チャンネルは屋内でのみ利用可能です。

クライアントのみ - チャンネルはクライアント・モードでのみ使用できます。

TPC (Transmit Power Control) - 通信システムにおいて良好な性能を実現しながら送信パワーを能動的にコントロールする機能。

SDR (Short Range Device) - このチャンネルを使用したデバイスの許容パワー・レベルの規制 ○/× - 国ごとによるチャンネルの認可を示します。

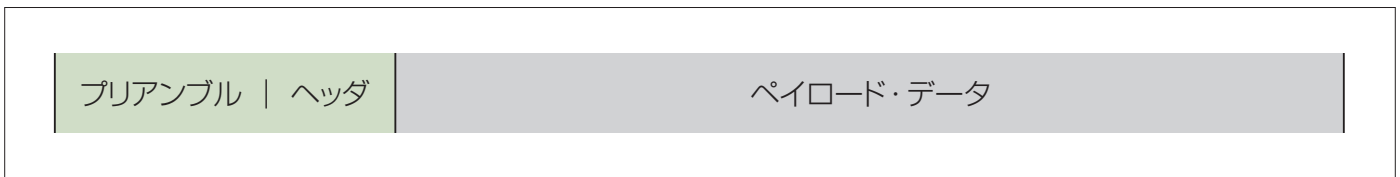


図11. PHYパケットごとに含まれるプリアンブル、ヘッダ、ペイロード・データ

物理層 (PHY) のフレーム構造

802.11の物理層は、バースト状の送信またはパケットを使用します。各パケットは、プリアンブル、ヘッダ、ペイロード・データを含んでいます (図11を参照)。プリアンブルは、レシーバによる時間と周波数の同期、イコライゼーションのためのチャンネル特性の推定を可能にします。また、プリアンブルはレシーバが後に続く信号に同期するためのビット・シーケンスです。ヘッダは、フォーマット、データ・レートなどのパケット構成情報が含まれます。ペイロード・データは、ユーザが送信すべきペイロード・データが含まれます。

802.11の規格では、データの送信、無線リンクの管理と制御で使用するフレームの種類を規定しています。上位レベルでは、このフレームは管理フレーム、制御フレーム、データ・フレームの3種類に分かれます。それぞれのフレームはMACヘッダ、ペイロード、FCS (フレーム・チェック・シーケンス) を含んでいます。フレームによってはペイロードを持っていないものもあります。MACヘッダの最初の2バイトはフレーム・コントロール・フィールドで、フレームの形式と機能を指定します。フレーム・コントロール・フィールドは、さらに次のサブフレームに分かれます。

- **プロトコル・バージョン** : 2ビットのプロトコルのバージョンです。現在使用されているプロトコル・バージョンは0です。その他の値は、将来のためにリザーブされています。
- **タイプ** : 2ビットで無線LANフレームのタイプを識別します。IEEE 802.11では、制御、データ、管理などのタイプが規定されています。
- **サブ・タイプ** : 4ビットでフレーム間の追加識別を行います。タイプとサブ・タイプで特定のフレームを識別します。
- **ToDS、FromDS** : どちらも1ビットです。データ・フレームがDS (Distribution System) に向かうかを示します。コントロール/管理フレームは、この値を0に設定します。すべてのデータ・フレームはこのビット・セットのいずれかを持ちます。しかし、IBSSネットワーク内の通信では、このビットは常に0になります。
- **More Fragments** : More Fragmentビットは、送信でパケットが複数のフレームに分割されるときに設定されます。パケットの最後のフレームを除いたどのフレームも、このビット・セットを持ちます。
- **Retry** : フレームを再送信する必要がある場合、フレーム再送信時にRetryビットを1に設定します。これにより、フレームの重複を防ぎます。
- **パワー・マネージメント** : このビットは、フレーム交換完了後の送信側のパワー・マネージメント状態を示します。アクセス・ポイントは接続を管理する必要があり、決してパワー・セーブ・ビットを設定しません。
- **More Data** : More Dataビットは、配信システムで受信されたフレームをバッファするために使用されます。アクセス・ポイントは、このビットにより端末をパワー・セーブ・モードにすることができます。このことは、接続されているすべての端末のために少なくとも1つのフレームが確保されていること示します。
- **WEP** : WEPビットは、フレーム処理後に変更されます。フレームが復号された後は1に切り替わり、暗号化されていない場合はすでに1を持っています。
- **Order** : このビットは、送信する順序を厳密に指定する場合にのみ設定されます。送信性能が低下する原因になるため、フレームとセグメントは常に順序通りに送られるわけではありません。

入門書

次の2バイトは、Duration IDフィールドのためにリザーブされています。このフィールドは、Duration、Contention-Free Period (CFP)、Association ID (AID) の3つのフォームのいずれかを持ちます。802.11のフレームは4つまでのアドレス・フィールドを持ちます。いずれのフィールドもMACアドレスを持つことができます。アドレス1はレシーバ、アドレス2はトランスミッタ、アドレス4はレシーバによるフィルタ目的で使用されます。

シーケンス制御フィールドは2バイト・セクションで、メッセージの順番の特定と重複フレームの回避のために使用されます。最初の4ビットはフラグメンテーション番号のために使用され、後の12ビットはシーケンス番号です。802.11eでは、オプションで2バイトのQoS (Quality of Service) 制御フィールドが追加されました。フレーム・ボディ・フィールドのサイズは0~2304バイトで可変し、セキュリティのカプセル化からのオーバーヘッドが加わり、上位レイヤからの情報を含みます。802.11規格のフレームの最後が、FCS (Frame Check Sequence) です。CRC (Cyclic Redundancy Check) とも呼ばれ、読み出したフレームの整合性をチェックします。フレームが送信される直前、FCSが計算され、付加されます。端末がフレームを受信すると、フレームのFCSを計算し、受信したものと比較します。一致すれば、フレームは伝送によって損傷していないと推定されます。

管理フレーム

管理フレームにより通信を維持します。802.11に共通のサブタイプを以下に示します。

- **認証フレーム**：802.11の認証では、WNIC (Wireless Network Interface Controller) がIDを含んだ認証フレームをアクセス・ポイントに送ることから始まります。オープン・システム認証では、WNICは1つの認証フレームのみを送り、アクセス・ポイントは承認または拒否を示した認証フレームを返します。共有キー認証では、WNICが初期認証リクエストを送ると、アクセス・ポイントはチャレンジ・テキストを含んだ認証フレームを送信します。WNICは、チャレンジ・テキストを暗号化したテキストを含んだ認証フレームを、アクセス・ポイントに送ります。アクセス・ポイントは、暗号化されたテキストを解読し、正しいキーで暗号化されていることを確認します。このプロセスの結果により、WNICの認証ステータスが決まります。
- **アソシエーション要求フレーム**：端末から送られ、アクセス・ポイントによるリソースの割り当てと同期を可能にします。フレームには、サポートされるデータ・レート、端末が希望するネットワークのSSIDを含む、WNICに関する情報が含まれています。要求が受け付けられると、アクセス・ポイントはメモリをリザーブし、WNICのためのアソシエーションIDを確立します。
- **アソシエーション応答フレーム**：アクセス・ポイントから端末に送られ、アソシエーション要求に対する受入れまたは拒否を含みます。受け入れる場合、フレームにはアソシエーションIDとサポートされるデータ・レートなどの情報が含まれます。
- **ビーコン・フレーム**：アクセス・ポイントから定期的に送られ、範囲内のWNICにその存在を知らせ、SSIDなど他のパラメータを提供します。
- **Deauthentication (ディオーセンティケーション) フレーム**：他の端末との接続終了を希望する端末から送られます。
- **Disassociation (ディスアソシエーション) フレーム**：端末から送られ、接続終了を希望します。アクセス・ポイントがメモリ割り当てを開放し、アソシエーション・テーブルからWNICを削除するための簡潔な方法です。
- **プローブ要求フレーム**：他の端末からの情報が必要な場合に端末から送られます。
- **プローブ応答フレーム**：プローブ要求フレームを受け取った後にアクセス・ポイントから送られ、機能情報、サポートされるデータ・レートなどが送られます。
- **Reassociation (リアソシエーション) 要求フレーム**：WNICが現在接続しているアクセス・ポイントの範囲から外れ、より強い信号のアクセス・ポイントを探す場合、WNICはリアソシエーション要求フレームを送ります。新しいアクセス・ポイントは、以前のアクセス・ポイントのバッファに残っているかもしれない情報もまとめて転送します。
- **Reassociation (リアソシエーション) 応答フレーム**：アクセス・ポイントから送られ、WNICのリアソシエーション要求フレームに対する受入れ、拒否を含みます。フレームには、アソシエーションID、サポートされるデータ・レートなど、アソシエーションに必要な情報が含まれます。

制御フレーム

制御フレームは、端末間のデータ・フレーム交換を支援します。802.11の制御フレームに共通するものを以下に示します。

- **ACK (Acknowledgement) フレーム** : データ・フレーム受信後、エラーがなければ受信端末は送信端末にACKフレームを送ります。あらかじめ決められた時間内に送信端末がACKフレームを受信しない場合は、送信端末はフレームを再送します。
- **RTS (Request to Send) フレーム** : RTS、CTSのフレームは、隠れ端末を持つアクセス・ポイントにおいて、衝突軽減スキームをオプションで提供します。端末は、データ・フレーム送信前に必要になる双方向のハンドシェイクの第一ステップとしてRTSフレームを送ります。
- **CTS (Clear to Send) フレーム** : 端末は、RTSフレームに対してCTSフレームで応答します。端末のためにデータ・フレームを送信できるクリアランスを用意します。CTSは送信を要求した端末が送信している間、他のすべての端末が送信を待機するための時間の値を指定することにより、衝突を制御しています。

データ・フレーム・タイプの分類			
フレーム・タイプ	コンテンションベースのサービス	コンテンションフリーのサービス	データの搬送
Data	○		○
Data+CF-Ack		○	○
Data+CF-Poll		APのみ	○
Data+CF-Ack+CF-Poll		APのみ	○
Null	○	○	×
CF-Ack		○	×
CF-Poll		APのみ	×
CF-ACK+CF-Poll		APのみ	×

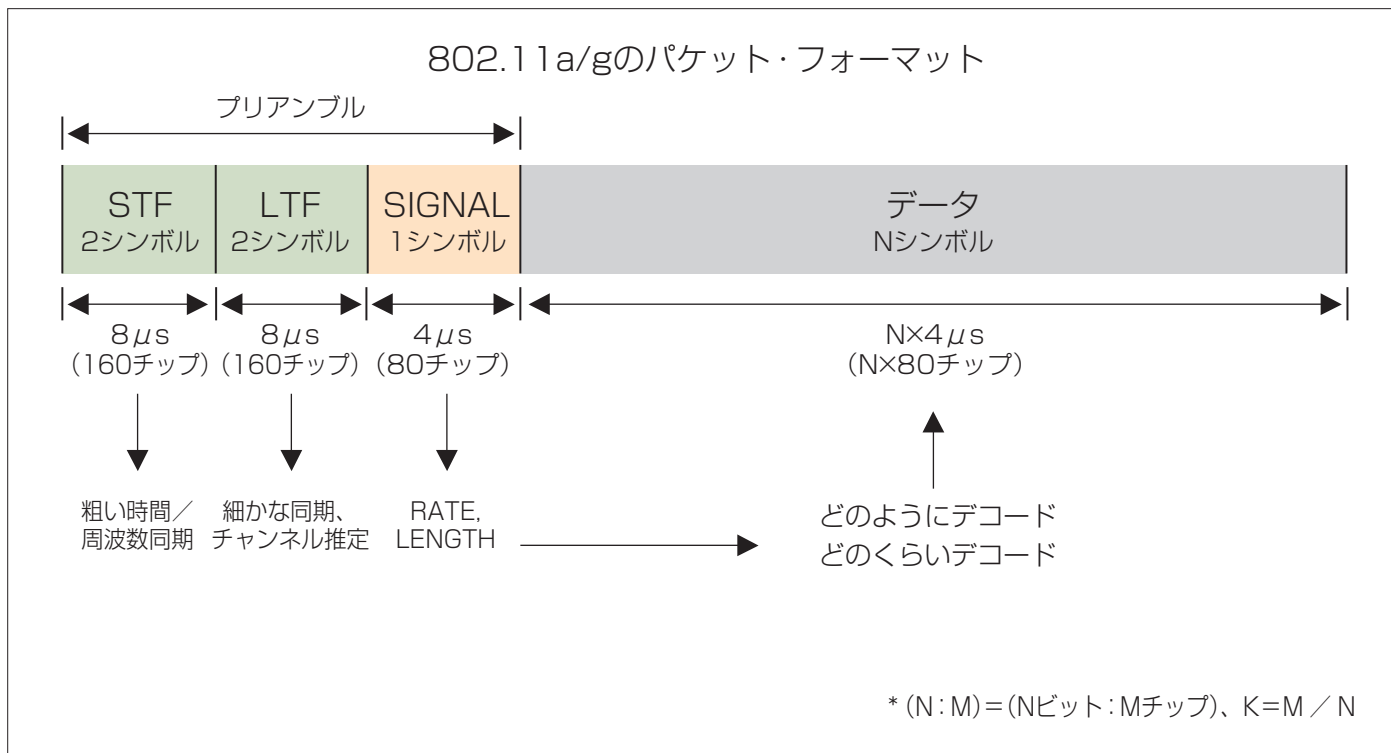
表5. データ・フレーム・タイプの分類

データ・フレーム

データ・フレームは、フレーム本体にハイレベルのプロトコル・データを含んで送ります。特定のデータ・フレームのタイプによっては、いくつかのフィールドは使用されない場合があります。機能によって、異なったデータ・フレーム・タイプに分類されます。コンテンションベースの（衝突が起きた場合に再送する）サービスで使用されるデータ・フレームと、コンテンションフリーの（衝突しないように制御された）サービスで使用されるデータ・フレームがその例です。コンテンションフリーの期間のみに現れるフレームは、IBSS (Independent Basic Service Set) では使用されません。別な区分としては、データを搬送するフレームと管理機能を実行するフレームです。フレームの区分を表5に示します。

802.11a/gの packets・フォーマット

802.11a/gの packets・フォーマット (下の図を参照)	
プリアンブル	<p>STF : ショート・トレーニング・フィールド (2シンボル)</p> <ul style="list-style-type: none"> - サブキャリアの1/4で使用。16チップを繰り返す - 初期のタイミング同期、周波数推定 <p>LTF : ロング・トレーニング・フィールド (2シンボル)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 52のすべてのサブキャリアを使用 (データ・シンボルと同じ) - 細かなタイミング/周波数同期、チャンネル応答推定 <p>SIGNAL : (1シンボル)</p> <ul style="list-style-type: none"> - データ・シンボルと同様に符号化、しかし常にBPSK変調を使用。24ビットのコンフィグレーション・データ - フィールド : <ul style="list-style-type: none"> - RATE (4ビット) : MCSとも呼ばれるデータFEC符号と変調 (8つの組合せ) を示す - LENGTH (12ビット) : ペイロードで搬送されるオクテット (バイト) の数 - PARITY (1ビット) : RATE+LENGTHデータの偶数パリティチェック - TAIL (7ビット) : SIGNALシンボルのFEC符号化で使用
ペイロード	<p>52のサブキャリア、48のデータ+4のパイロット</p> <p>データ・サブキャリアは、BPSK、QPSK、16QAMまたは64QAM変調を使用。すべてのシンボルで同じ</p> <p>パイロット・サブキャリア (BPSKのみ) は、バーストによる周波数/位相と振幅の変化をトラックするために使用される</p>



802.11nのパケット・フォーマット

802.11nには、グリーンフィールド (HT) とミックス (HT/Non-HT) の2つのモードがあります。グリーンフィールドは、レガシ・システムがないところでのみ使用できます。802.11nのシステムはグリーンフィールドとミックスを切り替えず、そのどちらかのみを使用します。

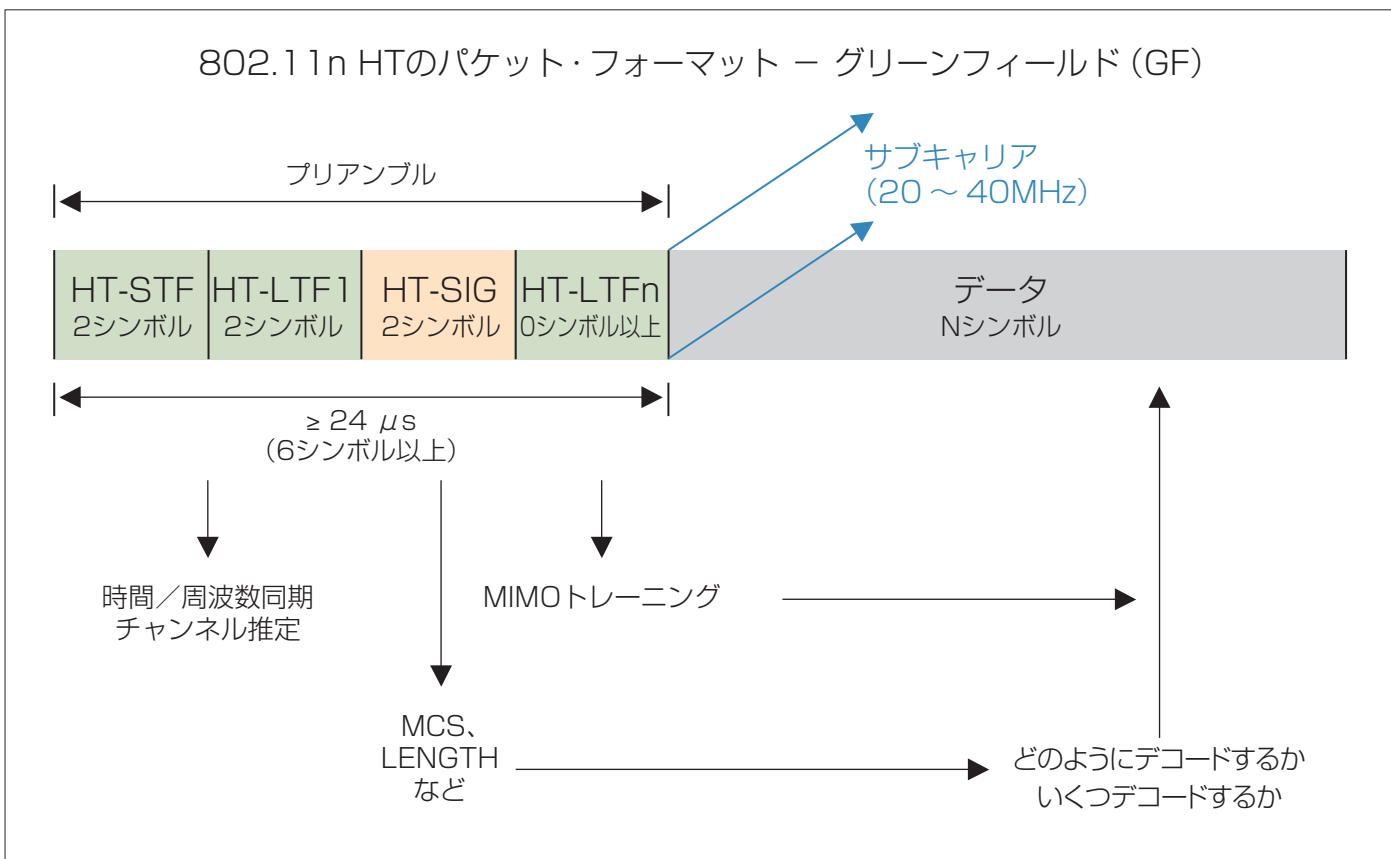
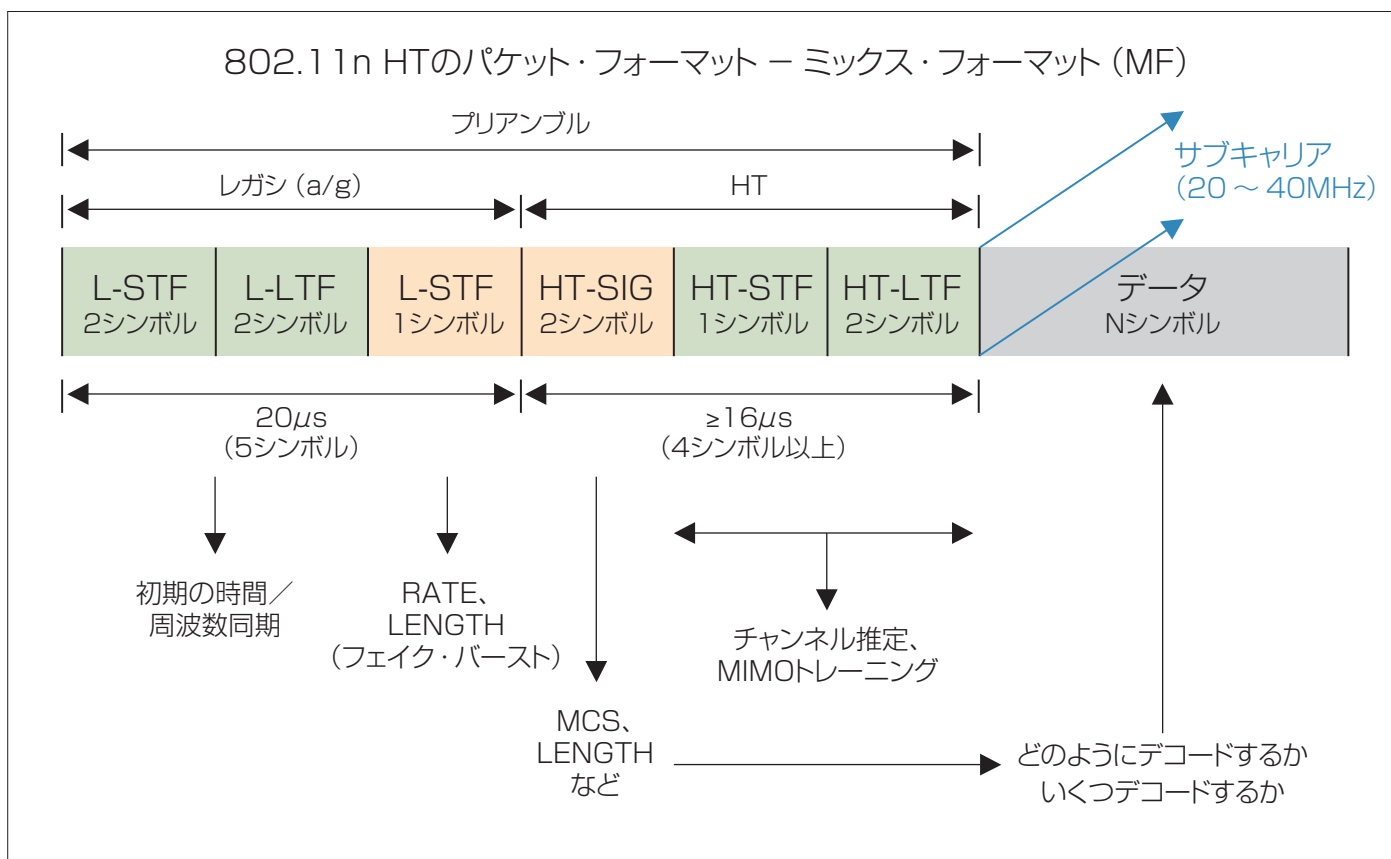
Non-HTモードを使用する802.11nのアクセス・ポイントは、すべてのフレームを古い802.11a/gのフォーマットで送るため、レガシ端末でも理解できます。アクセス・ポイントは20MHzのチャンネルを使用しなければならず、このアプリケーション・ノートで

説明する新しいHTの機能は使用できません。すべての製品は、下位互換性を持たせるためにこのモードをサポートする必要がありますが、Non-HTを使用する802.11nのアクセス・ポイントは、802.11a/g以上の性能にはなりません。

必須のHTミックス・モードは、802.11nのアクセス・ポイントで最も一般的な動作モードです。このモードでは、HTはレガシ端末との通信を可能にするHT保護メカニズムと共に使用されます。HTミックス・モードには下位互換性がありますが、グリーンフィールド・モードに比べると著しくスループットが落ちます。

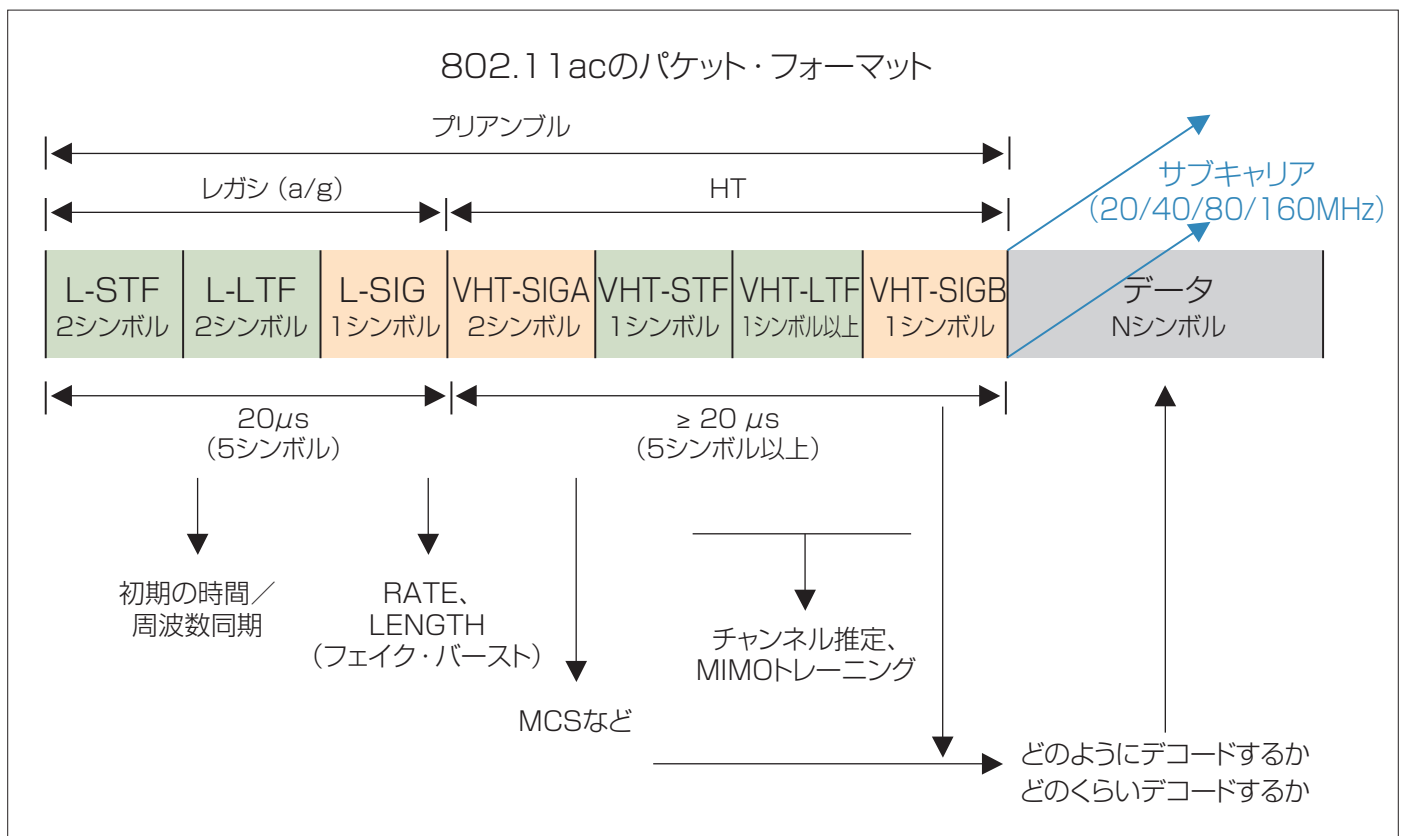
802.11nのパケット・フォーマット (23ページの図を参照)

802.11nのパケット・フォーマット (23ページの図を参照)	
<p>プリアンブル</p> <p>ミックス・モード</p> <p>グリーンフィールド・モード</p>	<p>Non-HTレガシ L-STF、L-LTF、L-SIGはa/gシステムとの下位互換性がある。 L-SIGは、RATEとLENGTHの値を含んでおり、レガシ・システムに対し、次の送信までどのくらい待つかを知らせる。</p> <p>HTミックス・モード HT-SIG (2シンボル) : MCS (Modulation and Coding Scheme)、長さ、その他のHT特有のパラメータを示す。 HT-STF (1シンボル)、HT-LTF (1シンボルより大きい) : HTの帯域幅で同期とチャンネル推定が可能 (L-LTFより多くのサブキャリア)。 MIMOモードには追加のHT-LTFシンボルが含まれており、複数のチャンネル (パス) を探す。</p> <p>L-STF、L-LTF、L-SIGがなくなり、代わりにHT-STF、HT-LTFに置き換わる。 その他は、ミックス・モードのプリアンブルと同様</p> <p>- フィールド :</p> <ul style="list-style-type: none"> - RATE (4ビット) : MCSとも呼ばれるデータFEC符号と変調 (8つの組合せ) を示す - LENGTH (12ビット) : ペイロードで搬送されるオクテット (バイト) の数 - PARITY (1ビット) : RATE+LENGTHデータの偶数パリティチェック - TAIL (7ビット) : SIGNALシンボルのFEC符号化で使用
<p>ペイロード</p>	<p>56 (20MHz) または114 (40MHz) のサブキャリア</p> <p>データ・サブキャリアは、BPSK、QPSK、16QAMまたは64QAM変調を使用。すべてのシンボルで同じパイロット・サブキャリア (BPSKのみ) は、バーストによる周波数/位相と振幅の変化をトラッキングするために使用される。マルチパス環境が許す場合は、オプションのショート・ガード・インターバルが使用可能</p>



802.11ac のパケット・フォーマット

802.11acのパケット・フォーマット (下の図を参照)	
<p>プリアンブル</p> <p>レガシ・モード</p> <p>VHTモード</p>	<p>1つのプリアンブル・フォーマット、グリーンフィールド版はない</p> <p>L-STF、L-LTF、L-SIGはa/gシステムとの下位互換性がある L-SIGは、RATEとLENGTHの値を含んでおり、レガシ・システムに対し、次の送信までどのくらい待つかを知らせる</p> <p>VHT-SIG (2シンボル) : MCS (Modulation and Coding Scheme)、長さ、その他のVHT特有のパラメータを示す VHT-STF (1シンボル)、VHT-LTF (1シンボルより大きい) : VHTの帯域幅で同期とチャンネル推定が可能 (L-STF/L-LTFより多くのサブキャリア)</p> <p>MIMOコンフィグレーションには追加のHT-LTFシンボルが含まれており、複数のチャンネル (パス) を探す VHT-SIGB (1シンボル) : Lengthパラメータ、MU-MIMOサポート</p>
<p>ペイロード</p>	<p>56/114/242/484 (20/40/80/160MHz) サブキャリア (データ+パイロット)</p> <p>データ・サブキャリアは、BPSK、QPSK、16QAM、64QAMまたは256QAM変調を使用。すべてのシンボルで同じ パイロット・サブキャリア (BPSKのみ) は、バーストによる周波数/位相と振幅の変化をトラッキングするために使用される マルチパス環境が許す場合は、オプションのショート・ガード・インターバルが使用可能</p>



物理層の変調形式

物理層の変調形式と符号化レートは、802.11のデータが空間をどのように送信されるか、どのデータ・レートで送信されるかを決めます。例えば、初期の802.11規格ではDSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) が使用されましたが、その後の主な規格ではOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が使用されています。新しい変調方法と符号化レートはより効率的に、より高いデータ・レートになっていますが、旧来の方法、レートは下位互換性のために今でもサポートされています。表6は、802.11の各規格の変調形式をまとめています。この章では、今日使用されている2つの主要変調形式であるDSSSとOFDMについて詳細に説明します。

DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum、直接スペクトラム拡散)

オリジナルのレガシ802.11と802.11bの規格では、DSSSの変調技術を利用しています。他のスペクトラム拡散技術では、送信される信号はキャリアまたは放送周波数を変調する情報信号よりも広い帯域幅を使用します。キャリア信号がデバイスの伝送周波数の全帯域 (スペクトラム) で発生することから、「スペクトラム拡散」という名前が付いています。

DSSSの伝送では、送信されるデータに“ノイズ”信号を掛け合わせます。このノイズ信号は1と-1の疑似ランダム信号であり、元の信号よりも十分に高い周波数になっています。

このような信号はホワイト・ノイズのようであり、オーディオ録音の雑音に似ています。このノイズのような信号は、受信端で同じ疑似番号 (PN) シーケンスを掛け合わせることで、元のデータを正確に再現できます ($1 \times 1 = 1$ 、 $-1 \times -1 = 1$ であるため)。逆拡散とも呼ばれるこの処理は、トランスミッタが使用したPNシーケンスとレシーバで使用するPNシーケンスの数学的な相関関係によって成り立っています。

802.11 規格で使用される変調技術	
レガシ	DSSS - DBPSK (1M) DSSS - DQPSK (2M)
802.11b	HR/DSSS - CCK (5.5M, 11M) HR/DSSS - PBCC (5.5M, 11M) (廃止)
802.11g	ERP - PBCC (22M, 33M) (廃止) DSSS - OFDM (6~54M) (廃止予定)
802.11a/g	OFDM (6~54M)
802.11n	HT20/40 (6.5~150M) (SISO 1x1:1) HT20/40 (13~600M) (MIMO、最大4x4:4)
802.11ac	VHT20/40/80/160 (6.5~867M) (SISO 1x1:1) VHT80+80 (58.5~867M) (SISO 1x1:1) VHT20/40/80/160 (13~6933M) (MIMO、最大8x8:8) VHT80+80 (117~6933M) (MIMO、最大8x8:8)

表6. 802.11 規格で使用される変調技術

チャンネルにおいて信号対ノイズ比を拡大した効果を、プロセス・ゲインと呼びます。長いPNシーケンス、より大きなチップ/ビットを採用することでより大きな効果が得られますが、PNシーケンスを発生するための物理デバイスには、達成可能なプロセス・ゲインに限りがあります。

望まれないトランスミッタが、同じチャンネルで異なったPNシーケンス (またはシーケンスなし) で送信すると、拡散プロセスによるプロセス・ゲインはありません。この効果がDSSSのCDMA (Code Division Multiple Access) 特性の基本であり、これにより、複数のトランスミッタがPNシーケンスの相互相関特性の制限内で同じチャンネルを共有することができます。

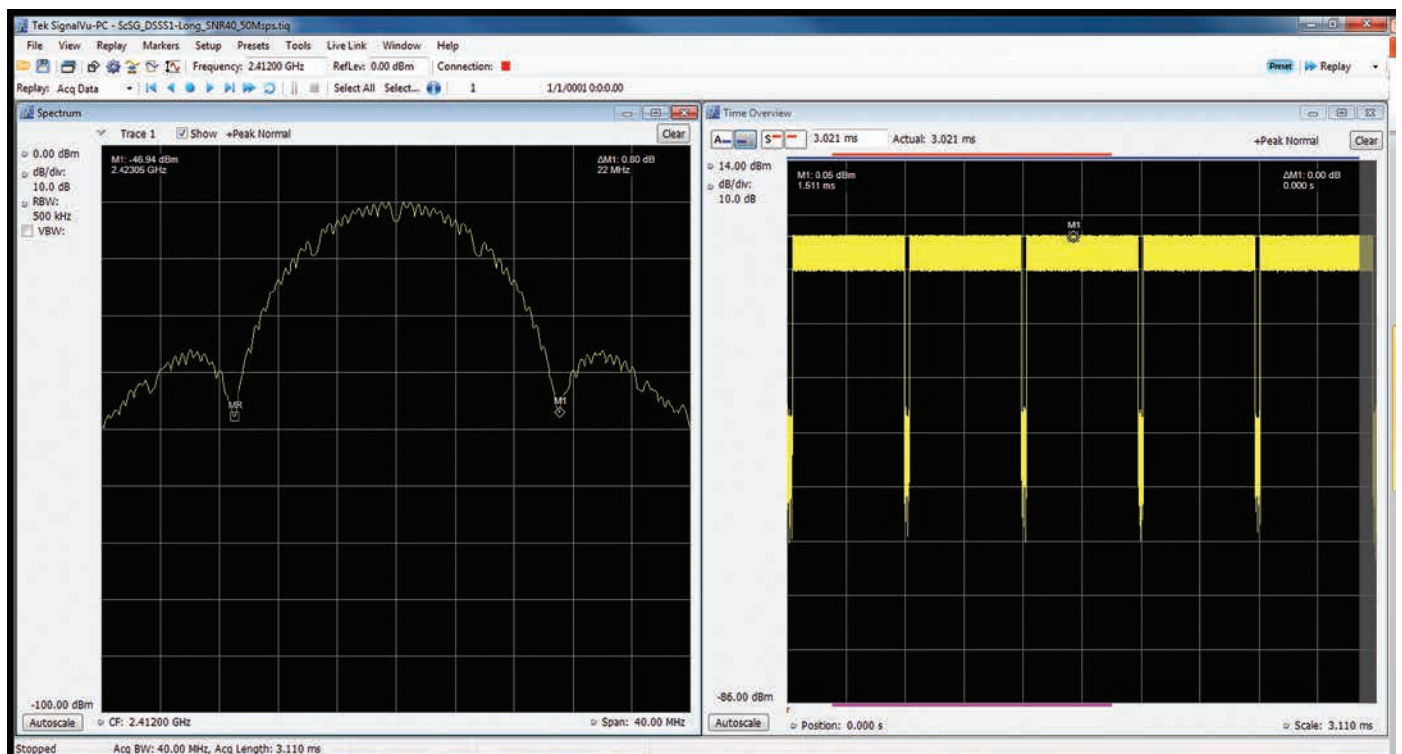


図12. 802.11bのDSSS伝送波形は、キャリア周波数を中心に釣鐘形状のエンベロープになっている

図12は伝送波形を示しますが、通常のAM伝送のような、キャリア周波数を中心に釣鐘形状のエンベロープになっています。ただし、ノイズはAM伝送のそれに比べてより広帯域に広がっています。

一方、周波数ホッピングによるスペクトラム拡散は、データに疑似ランダム・ノイズを付加する代わりに、疑似ランダムにキャリアを再同調させます。これにより、均一な周波数分布になります。分布幅は、疑似乱数発生器の出力レンジによって決まります。

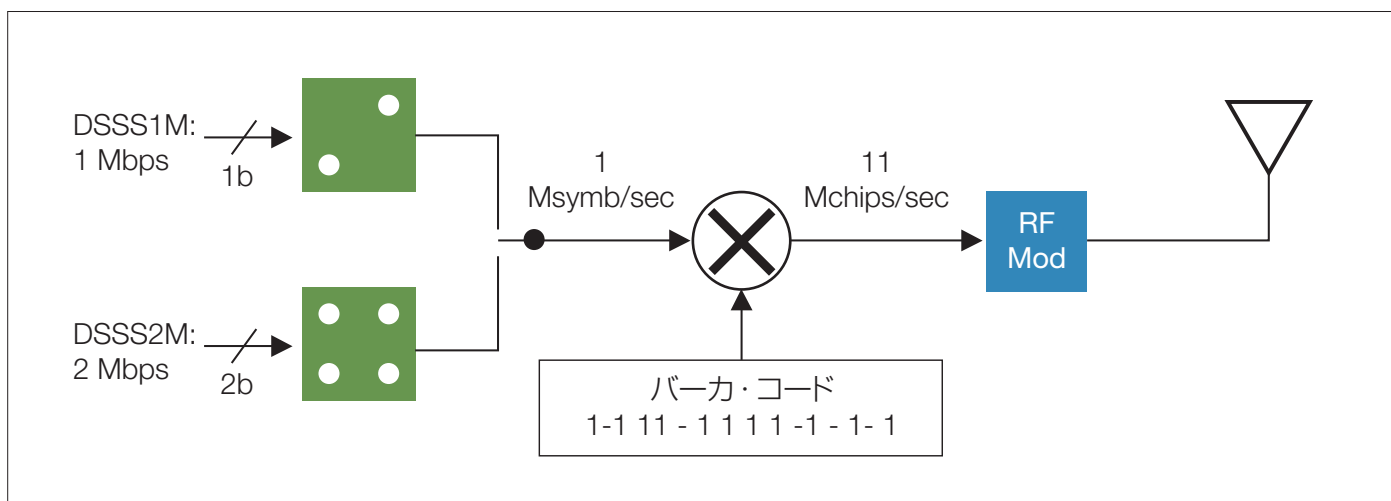


図13. 802.11b規格で使用されるBPSK/QPSK変調技術

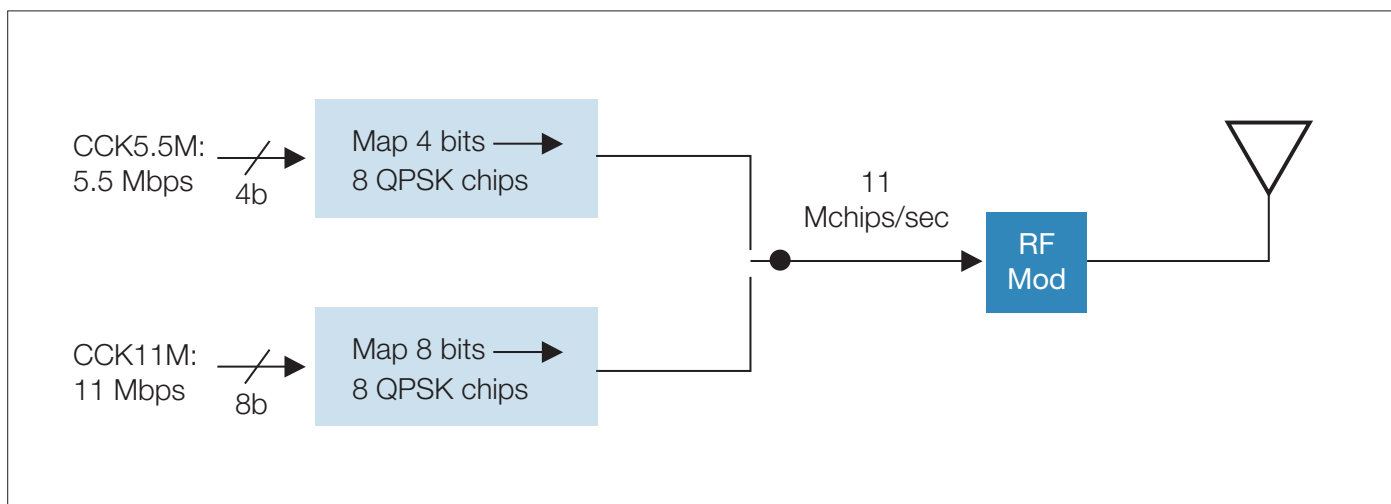


図14. 802.11b規格で使用されるQPSK/QPSK変調技術

802.11のDSSS変調は、2つのステップで処理します。最初のステップでは、差動BPSK (DBPSK) または差動QPSK (DQPSK) で1または2ビットのデータが符号化されます。どちらの符号化方法も1Mシンボル/sのレートの複素数IQシンボルを生成します。DBPSKは1ビット/シンボルを搬送するため1Mbpsのデータ・スループットになり、DQPSKは2Mbpsのスループットになり、効率的にはDBPSKの2倍の容量になります。DQPSKはより効率的にスペクトラムを使用しますが、ノイズや他の干渉に対する耐性が低下します。次の差動符号化では、11チップのバーカ・コード拡散が適用され、1Mシンボル/sを11Mチップ/sのチップ・シーケンスに変換します。これらのチップは、送信用にRFキャリアに変調されます (図13を参照)。

データ・レートを2Mbps以上にするため、802.11bでは5.5Mbpsと11Mbpsのデータ・レートを持つ、8チップ・コード・ワードからなるCCK (Complementary Code Keying) 技術を規定しています。CCKコード・ワードは独自の演算属性を持っており、大きなノイズやマルチパスによる干渉がある場合でも、レシーバによって正しく区別されます。CCKを使用すると、5.5Mbpsのレートは4ビット/シンボルに、11Mbpsのレートは8ビット/シンボルに符号化されます。どちらのスピードも変調技術としてQPSKを使用して高いデータ・レートに対応します。

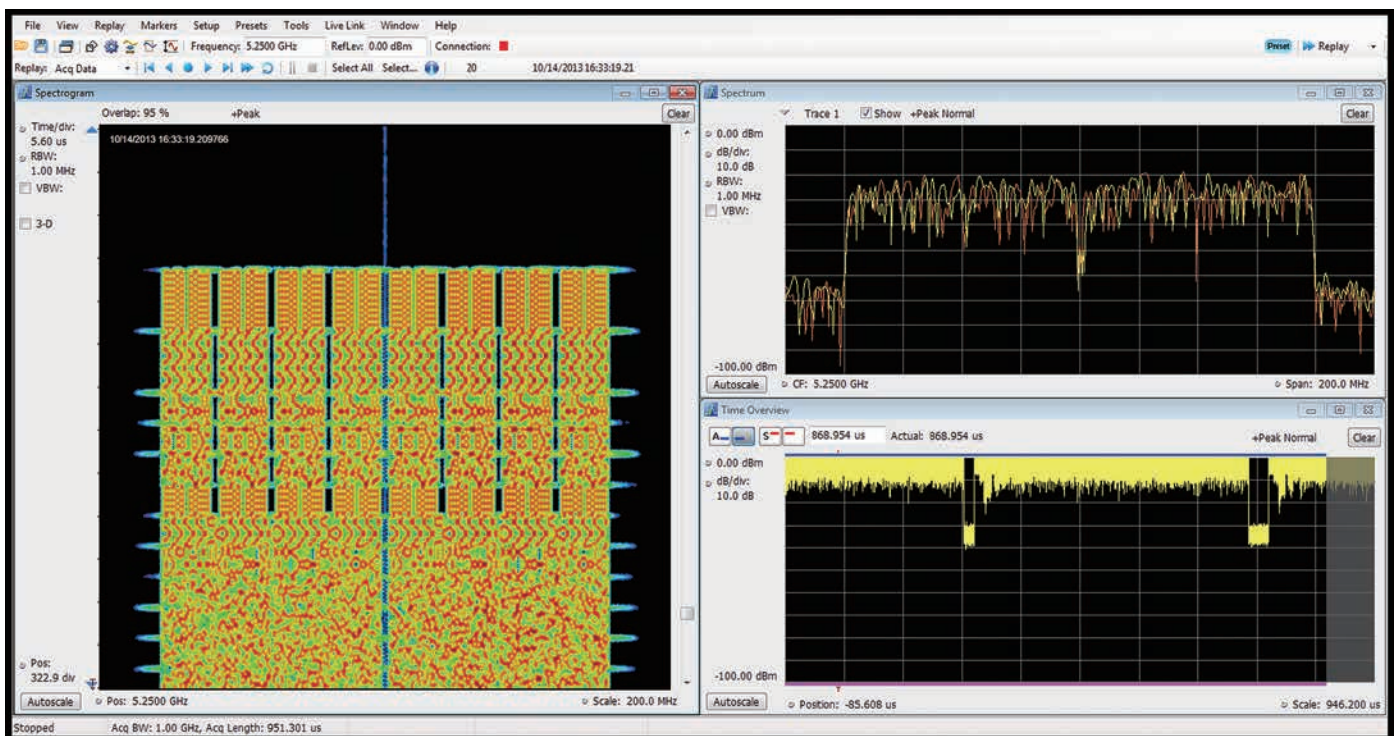


図15. OFDM変調技術は、現状の信号条件でシステムが最適なデータ・レートになるよう、さまざまな選択肢を提供する

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing、直交周波数分割多重)

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing、直交周波数分割多重) は、複数のサブキャリア周波数でデジタル・データを符号化する方法です。OFDMは、異なるサブキャリアで変調された、いくつかのインターリーブ/パラレル・ビット・ストリームにデータを分割することで、広帯域、高いデータ・レート情報を伝送します。この変調技術は、マルチパスによる伝搬遅延、ISI (シンボル間干渉) の影響に対処するための強力なソリューションです。さまざまな変調/符号化方式があるため、容易に対応してチャンネル品質を改善できます。数多くの選択肢があるため、現状の信号状態で最適なデータ・レートに適応させることができます。802.11acのOFDM信号の例を、図15に示します。

従来、スペクトラムのオーバーラップを防ぐため、チャンネル間のスペースはシンボル・レートよりも大きくとっていました。しかし、OFDMシステムではサブキャリアはオーバーラップします。これにより帯域幅を節約します。サブキャリアを互いに直交させることで、サブキャリアによる干渉をコントロールします。直交とは、サブキャリア間に演算的な関係があることを意味します。

OFDMでは、高いデータ・レートの信号はサブキャリア間で等分に分割されます。これにより、データ・レートが落ち、サブキャリアのシンボル間隔が増えます。結果として、マルチパスの遅延拡散による相対的な分散時間が減ります。位相ノイズと非直線性歪みが直交の損失を占め、結果としてICI (Inter-Carrier Interference、キャリア間干渉) になります。ICI、ISIを抑えるため、ガード・インターバルを付加します。マルチパスによるフェーディングと干渉には、遅いデータ・レートの信号の方が効果があります。

シングルキャリア方式に対するOFDMの大きな利点は、複雑なイコライゼーション・フィルタなしに厳しいチャンネル状態（マルチパスによる周波数選択フェーディングなど）に対処できることです。OFDMは、1つの急激に変調するワイドバンド信号ではなく、数多くのゆっくりと変調する狭帯域信号を使用していると見ることができ、チャンネル・イコライゼーションは簡素化されます。低速のシンボル・レートでは、利用可能なシンボル間でガード・インターバルを利用することでISIを抑えることができ、エコーと時間拡散を利用することで信号対ノイズ比などのダイバーシティ・ゲインを確保できます。

データ変調と符号化（FEC）の組合せ

FEC（Forward Error Correction、前方誤り訂正）またはチャンネル符号化は、信頼性の低い、またはノイズの多い通信チャンネルでデータを伝送する際に発生するエラーを制御するための技術です。その中心となる考え方は、送信側がECC（Error-Correcting Code、誤り訂正符号）を使用して冗長的にメッセージを符号化します。冗長性により、受信側はメッセージのどこかにある限られた数のエラーを検出でき、再送信することなくこのエラーを訂正できることもあります。FECにより、レシーバはリバース・チャンネルへの再送信のリクエストなしにエラーを訂正できますが、固定された冗長率（符号化レート）により高い伝送帯域を必要とします。

デジタル通信では、1つのチップはDSSSコードの1つのパルスです。コードのチップ・レートは、コードを送信（または受信）する1秒間あたりのパルス数（チップ/秒）です。チップ・レートはシンボル・レートより大きくなり、1つのシンボルは複数のチップで表わされます。

変調/符号化方法（MCS）: 変調方式（BPSK、QPSK、16QAM、64QAMなど）と自己誤り訂正（FEC）の符号化レート（1/2、2/3、3/4、5/6など）によるHT（ハイ・スループット）PHY（物理層）パラメータの仕様

802.11b		
変調	シンボル/チップ比	データ・レート (Mbps)
DBPSK	1/11	1
DQPSK	1/5	2
DQPSK	1/2	5.5
BPSK	1/2	5.5
DQPSK	1	11
QPSK	1/2	11
8PSK	1	22
8PSK	1	33

802.11a/g			
レート	変調	FECレート	データ・レート (Mbps)
1101 (13)	BPSK	1/2	6
1111 (15)	BPSK	3/4	9
0101 (5)	QPSK	1/2	12
0111 (7)	QPSK	3/4	18
1001 (9)	16QAM	1/2	24
1011 (11)	16QAM	3/4	36
0001 (1)	64QAM	2/3	48
0011 (3)	64QAM	3/4	54

802.11nのMCSとFECレート				
MCS	変調	FECレート	データ・レート	
			20MHz (Mbps)	40MHz (Mbps)
0	BPSK	1/2	7.2	15.0
1	QPSK	1/2	14.4	30.0
2	QPSK	3/4	21.7	45.0
3	16QAM	1/2	28.9	60.0
4	16QAM	3/4	43.3	90.0
5	64QAM	2/3	57.8	120.0
6	64QAM	3/4	65.0	135.0
7	64QAM	5/6	72.2	150.0

802.11acのMCSとFECレート						
MCS	変調	FECレート	データ・レート			
			20MHz (Mbps)	40MHz (Mbps)	80MHz (Mbps)	160MHz (Mbps)
0	BPSK	1/2	7.2	15.0	32.5	65.0
1	QPSK	1/2	14.4	30.0	65.0	130.0
2	QPSK	3/4	21.7	45.0	97.5	195.0
3	16QAM	1/2	28.9	60.0	130.0	260.0
4	16QAM	3/4	43.3	90.0	195.0	390.0
5	64QAM	2/3	57.8	120.0	260.0	525.0
6	64QAM	3/4	65.0	135.0	292.5	585.0
7	64QAM	5/6	72.2	150.0	325.0	650.0
8	256QAM	3/4	86.7	180.0	390.0	780.0
9	256QAM	5/6	N/A	200.0	433.3	866.7

無線LANの動作プロセス

無線LANネットワークに接続するためには、デバイスは無線ネットワーク・インタフェース・コントローラを装備する必要があります。コンピュータとインタフェース・コントローラの組合せを、端末(STA)と呼びます。すべての端末は、1つの無線周波数通信チャンネルを共有します。このチャンネルの伝送は、範囲内にあるすべての基地局によって受信されます。どの端末も無線周波数通信チャンネルに常に同調し、利用可能な伝送を受信します。

WiFi使用可能装置が接続を許可するように設定されている無線ネットワークの範囲内にある場合は、インターネットに接続できます。複数のアクセス・ポイントをインターコネクトすることにより、数部屋から数千平方メートルまでをカバー・エリアを広げることができます。広いエリアをカバーするためには、アクセス・ポイントのグループとオーバーラップによるカバーが必要になります。

アソシエーションを構成する無線端末 (STA) のグループを、BSS (Basic Service Set) と呼びます。BSSには、アドホックとインフラストラクチャの2種類のモードがあります。アドホックBSSでは、端末間で直接通信しますが中央制御は含みません。インフラストラクチャBSSでは、端末はAP (アクセス・ポイント) と通信を確立してネットワークに接続されます (図16を参照)。

この章では、802.11デバイス間における、通信リンクの確立とデータ転送のための無線LAN動作プロセスの概要を説明します。

無線 LAN デバイスの構造

802.11の初期は、専用のPCカードをデスクトップまたはノートPCに入れるのが一般的でした。今日では、すべてのコンピュータ、ほとんどの携帯電話にも組み込み型の無線LANモジュールが設計されています。さらに、これらの組み込みモジュールは、さまざまな家電製品や新たなコンピュータ内蔵機器などでも利用されるようになりました。このようなリアルタイム・オペレーティング・システムのおかげで、シリアル・ポートで通信を行うデバイスを無線で接続することを容易にしました。また、シンプルなモニタリング・デバイスの設計も可能になりました。その一例が、家庭にいる患者をモニタするポータブルECG (心電図) デバイスです。WiFi接続が可能なデバイスは、インターネットを介して通信することができます。

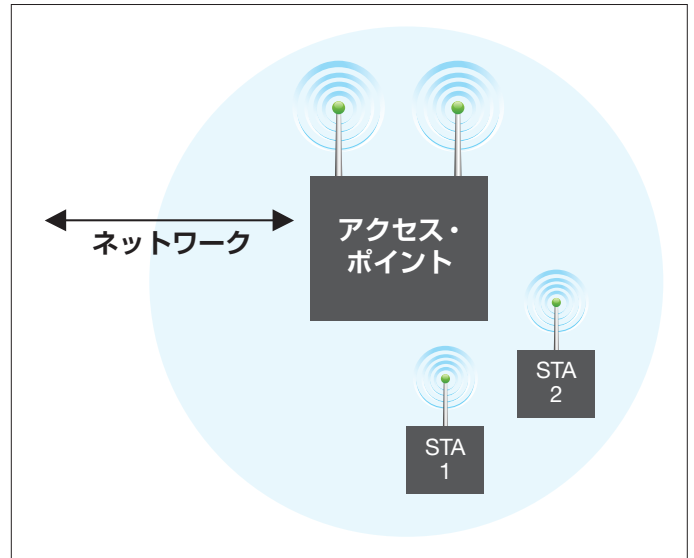


図16. BSS (Basic Service Set) はアソシエーションを構成するSTA (無線端末) のグループ

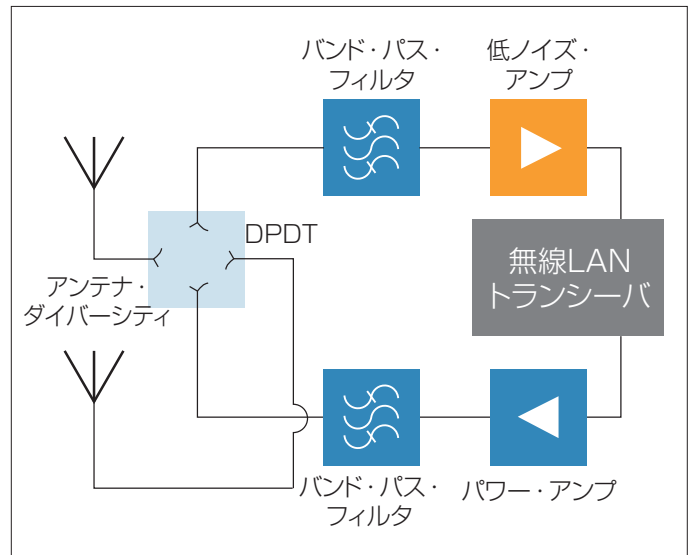


図17. 無線LAN設計の簡単な例

図17は、無線システムの無線LAN設計ブロック図の一例です。ほとんどの電子システムと同様、新しい無線設計は高い次元で統合されていますが、それに伴い性能のトレードオフもあります。

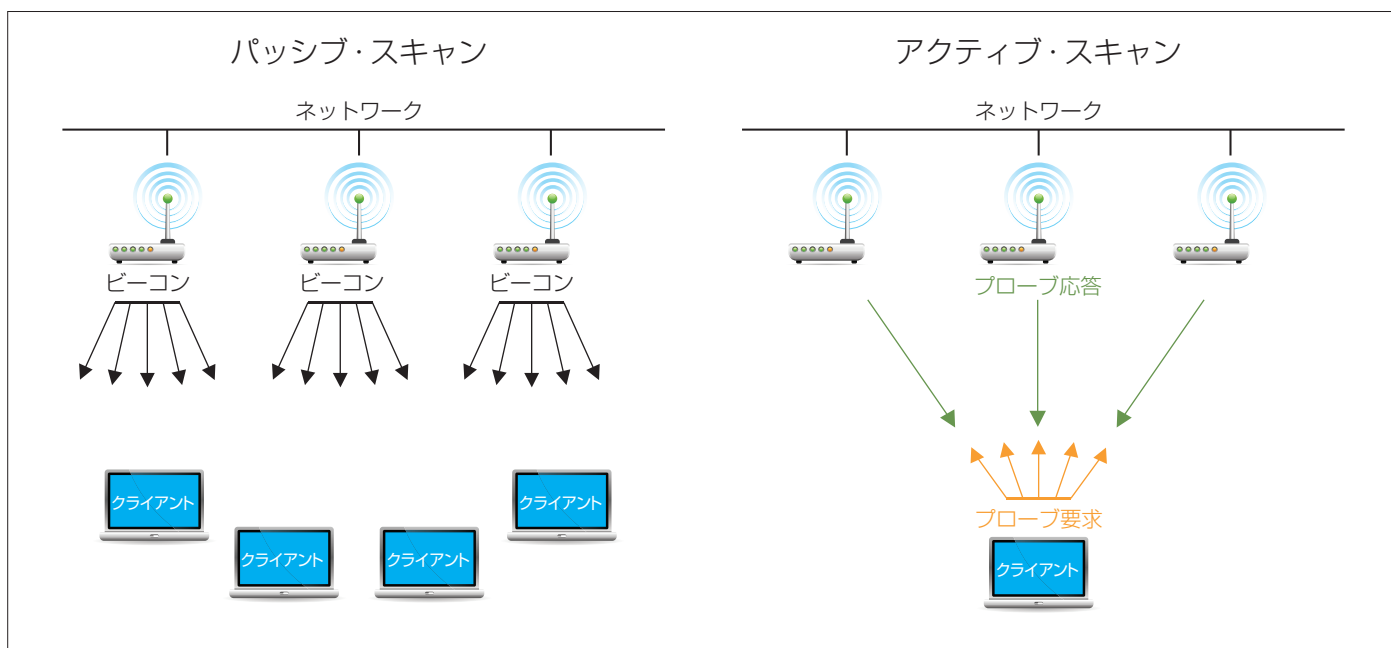


図18. デバイスは、パッシブ・スキャンまたはアクティブ・スキャンによって接続を確立する

受信感度によって無線LANのリンクが動作する最大範囲は決まるため、受信感度は重要になります。これには、副次的な効果もあります。あるリンクの packets エラー・レートが小さいために、他のリンクよりも早くリンク伝送が完了できれば、バッテリーの消費が抑えられ、他のユーザに対する干渉も少なくなります。現実の環境では、干渉の抑制とリニアリティは、無線の性能に直接影響します。短いトレーニング・シーケンスで実行されるRSSI (Receive Signal Strength Indication) テストでは、特定のバーストの受信用いどのの信号パスを使用するかを決定します。

送信側では、外部パワー・アンプ (PA) を含めなければならないことがあります。このPAを選択する場合、コスト、電流消費、直線性などを詳細に検討する必要があります。アナログのハードウェアは単体でテストできますが、トランシーバとして完成させるためには、ベースバンド回路のDSP (Digital Signal Processing) と組み合わせる必要があります。

接続の確立

デバイスに電源が入ると、MACレイヤより上のソフトウェアはデバイスをシミュレーションして接続を確立します。デバイスは、アクティブ・スキャンまたはパッシブ・スキャンを実行します。

IEEEの仕様ではさまざまな実装が認められているため、特性もデバイスによって異なります。

パッシブ・スキャンでは、Beacon (ビーコン) とProbe Requests (プローブ要求)を使用します。チャンネルを選択した後、スキャン・デバイスは他のデバイスからのビーコンまたはプローブ要求を聞きます。パッシブ・スキャンでは、クライアントはアクセス・ポイントからのビーコン・フレームを待ちます。ビーコンはアクセス・ポイントから送信され、アクセス・ポイントに関する情報とタイミング・リファレンスが含まれています。他の伝送と同様にチャンネルの空きを確認するため、遅れることがあります。デバイスは、適切なネットワークが見つかるまで、ビーコンを聞き続けてネットワークを探します。

アクティブ・スキャンでは、デバイスはアクセス・ポイントの特定のためにプローブ要求フレームを送信し、アクセス・ポイントからのProbe Response (プローブ応答)を待ちます。チャンネルの空きを確認して、接続を求めるデバイスはプローブ要求を送ります。プローブ要求のフレームは、直接またはブロードキャストによる要求のいずれかをとります。アクセス・ポイントからのプローブ応答は、ビーコン・フレームと似ています。アクセス・ポイントからの応答をもとに、クライアントはアクセス・ポイントとの接続を決定します。アクティブ・スキャンは迅速に接続を確立できますが、より多くのバッテリーを消費します。

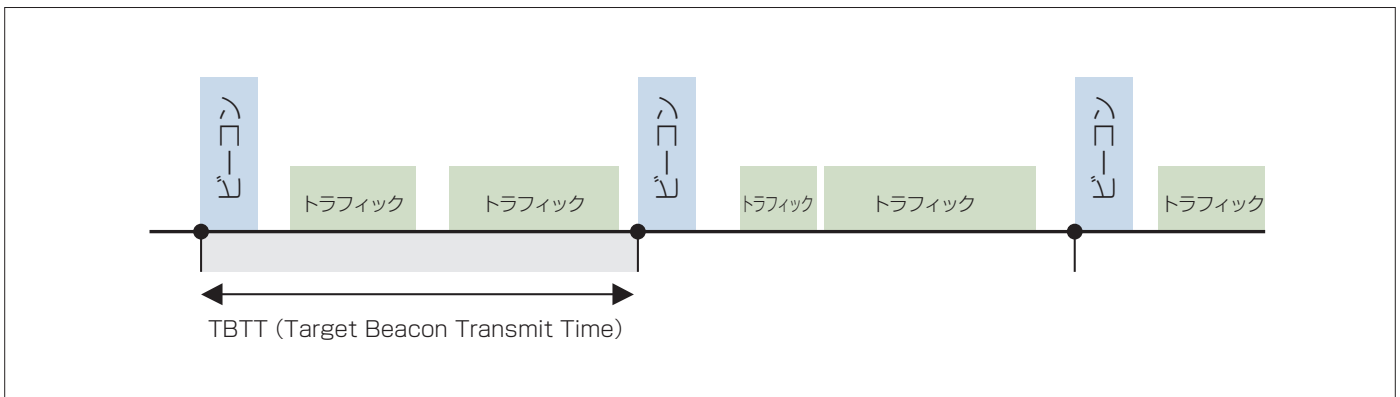


図19. アクセス・ポイントは定期的にビーコン・フレームまたはパケットをブロードキャスト送信してその機能を伝える

同期

アクセス・ポイントは、定期的に（通常は100msおきに）ビーコン・フレーム（パケット）をブロードキャスト送信します。これを、TBTT (Target Beacon Transmit Time) と呼びます。ビーコンには、以下の内容を含む、機能、BSS管理情報が含まれています。

- サポートするデータ・レート
- SSID - サービス・セットID (アクセス・ポイントのニックネーム)
- タイムスタンプ (同期)

アクセス・ポイントはビーコンを使用してその機能を伝え、この情報はパッシブ・スキャンするクライアントによって使用され、アクセス・ポイントとの接続を決定します。これは、すべてのクライアントがアクセス・ポイントと同期し、クライアントがパワーセーブなどの機能を実行するために必要になります。

Authentication (オーセンティケーション)

次に端末は、アクセス・ポイントのネットワークに接続するために、アクセス・ポイントによって認証される必要があります。オープン・ネットワークでは、デバイスは認証要求を送り、アクセス・ポイントは結果を送り返します。セキュアなネットワークでは、より公式な認証プロセスがあります。802.1Xの認証は、アクセス・ポイント、デバイス、認証サーバ（通常は、必要なプロトコルをサポートするソフトウェアが実行するホスト）の3部門で構成されます。アクセス・ポイントは、ネットワークを保護するセキュリティを提供します。デバイスは、デバイスのIDが検証され、認証されるまではアクセス・ポイント経由でネットワークの保護された側にアクセスすることはできません。認証サーバが認証情報を有効と判断すると、サブリカント（クライアント・デバイス）はネットワークの保護サイドにあるリソースにアクセスすることができます。

Association (アソシエーション)

オーセンティケーションの次のステップがアソシエーションであり、デバイスとアクセス・ポイント間でのデータ転送を可能にします。デバイスはアクセス・ポイントにアソシエーション要求を送り、アクセス・ポイントはクライアントに対し、アソシエーションの許可または拒否の応答フレームを応答します。アソシエーションに成功すると、アクセス・ポイントはクライアントに対してアソシエーションIDを発行し、接続されたクライアントのデータベースにそのクライアントを追加します。

データの交換

データ転送は、オーセンティケーションとアソシエーションの後でないと許可されません。正しいオーセンティケーションとアソシエーションなしにアクセス・ポイントにデータを送ると、アクセス・ポイントはディオーセンティケーション・フレームで応答することになります。データ・フレームは、常にアクノレッジされます。デバイスがデータ・フレームをアクセス・ポイントに送ると、アクセス・ポイントはアクノレッジを送らなければなりません。アクセス・ポイントがデータ・フレームをデバイスに送ると、デバイスはアクノレッジを送らなければなりません。アクセス・ポイントは、クライアントから受信したデータ・フレームを、有線ネットワークの必要とされる宛先に転送します。有線ネットワークからクライアントに、データを直接転送することもあります。アクセス・ポイントは2つのクライアント間でトラフィックを転送することもあります。一般的ではありません。

トランスミッタ測定

トランスミッタに障害があると、無線LANシステムの性能が低下したり、RFデバイスが互いに動作しないこともあります。送信出力を解析することですぐに見つかるトランシーバの問題もあるので、トランスミッタ・テストは重要です。ローカル・オシレータ(LO)は送受信の両側で共有されているため、レシーバに影響を及ぼすLOの問題はトランスミッタ・テストで観測できます。

ここでは、802.11規格のデバイス・コンプライアンス、性能で規定されているテストについて説明します。

トランスミッタのテスト条件

IEEE 802.11規格では、トランスミッタ・テストの条件を規定していますが、無線によるテスト・モードの制御機能は含んでいません。テストは、無線LANデバイスまたはモジュールでアクセス可能なテスト・ポートで行います。

デバイスのテストでは、他の無線LANデバイスに干渉しないか気になります。また、テストする規格(a、b、gなど)も制御する必要があります。デバイス独自または専用のソフトウェアも、特定のテスト・モードでは必要になることがあります。規格では、無線の動作状態とトランスミッタのパラメータを制御する、さまざまなテスト・モードが規定されています。個別のテスト機器、ソフトウェアでデバイスを制御する場合は、測定におけるトリガとタイミングに特に注意を払う必要があります。

トランスミッタ・テスト

トランスミッタ・パワー

フレームの公称送信パワーは、FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) PHY (14.7.14.2) のPMD Transmit仕様の一部で規定されています。最大出力パワーは、地域の規制団体で規定されている方法にしたがって測定します。その他については、信号の種類に関わらず、すべてのパケットの平均パワーを測定します。

送信スペクトラム・マスク

送信スペクトラム・マスクは、規格ごとに規定されています。このマスクは、チャンネルで分布が許されている信号パワーのリミットを規定しています。DSSS PHYでは、送信されるスペクトラム成分は、 -30dB 未満 (SINx/xピークに対するデシベル) ($f_c - 22\text{MHz} < f < f_c - 11\text{MHz}$, $f_c + 11\text{MHz} < f < f_c + 22\text{MHz}$)、 -50dB 未満 ($f < f_c - 22\text{MHz}$, $f > f_c + 22\text{MHz}$)、(f_c はチャンネルの中心周波数) となります。送信スペクトラム・マスクを図7に示します。測定は、100kHzの分解能帯域幅、30kHzのビデオ帯域幅で行います。OFDM PHYでは、送信スペクトラム・マスクも規制団体によって規定されています。行政による規制が追加されている場合は、デバイスはその規制とIEEE規格で規定されるマスクの両方に適合する必要があります。デバイスの放射については、任意の周波数オフセットにおいて、規制およびデフォルトのマスクで規定されている値の最小値よりも小さいことが求められます。送信信号の送信スペクトラム密度は、図8に示すスペクトラム・マスクの中に入っている必要があります。スペクトラム・マスクは、圧縮など、信号に現れる歪みや、隣接するチャンネルの信号品質に影響を及ぼすことがある、隣接チャンネルへのリークなどの診断に使用できます。

スペクトラム・フラットネス

スペクトラム・フラットネスは、OFDM信号サブキャリアのパワー変動の測定です。チャンネル全体にわたって均一にパワーが分散していることを確認し、出力フィルタ性能の問題検出で使用します。スペクトラム・フラットネスは、802.11n (HT PHY) で規定されています。20MHzチャンネルおよび40MHzチャンネルの20MHz送信では、 $-16 \sim -1$ 、 $+1 \sim +16$ のインデックスの各サブキャリアにおけるコンスタレーションの平均エネルギーの偏移は、 $\pm 4\text{dB}$ 以内であることが求められます。 $-28 \sim -17$ 、 $+17 \sim +28$ のインデックスの各サブキャリアにおけるコンスタレーションの平均エネルギーは、 $-16 \sim -1$ 、 $+1 \sim +16$ のインデックスのサブキャリアの平均エネルギーに対して $+4/-6\text{dB}$ 以内であることが求められます。

40MHz送信 (MCS 32フォーマット、非HTデュプリケート・フォーマットを除く) では、 $-42 \sim -2$ 、 $+2 \sim +42$ のインデックスの各サブキャリアにおけるコンスタレーションの平均エネルギーの偏移は、 $\pm 4\text{dB}$ 以内であることが求められます。 $-43 \sim -58$ 、 $+43 \sim +58$ のインデックスの各サブキャリアにおけるコンスタレーションの平均エネルギーは、 $-42 \sim -2$ 、 $+2 \sim +42$ のインデックスのサブキャリアの平均エネルギーに対して $+4/-6\text{dB}$ 以内であることが求められます。

MCS 32フォーマット、非HTデュプリケート・フォーマットでは、 $-42 \sim -33$ 、 $-31 \sim -6$ 、 $+6 \sim +31$ 、 $+33 \sim +42$ のインデックスの各サブキャリアにおけるコンスタレーションの平均エネルギーの偏移は、 ± 4 dB以内であることが求められます。 $-43 \sim -58$ 、 $+43 \sim +58$ のインデックスの各サブキャリアにおけるコンスタレーションの平均エネルギーは、 $-42 \sim -33$ 、 $-31 \sim -6$ 、 $+6 \sim +31$ 、 $+33 \sim +42$ のインデックスのサブキャリアの平均エネルギーに対して $+4/-6$ dB以内であることが求められます。スペクトラム・フラットネス要件のテストは、空間マッピングで実行することができます。

送信中心周波数の許容度

送信中心周波数の許容度は、5GHzバンドで最大 ± 20 ppm、2.4GHzバンドで最大25ppmです。異なる送信チェーンの中心周波数（LO）と各送信チェーンのシンボル・クロック周波数のすべては、同じリファレンス・オシレータからのものであることが求められます。

送信中心周波数のリーク

トランスミッタに障害があると、中心周波数成分のリークの原因となることがあります。このようなキャリア・リークは、DCオフセットがあるトランスミッタで発生することがあります。この問題は、受信側で送信中心周波数のエネルギーとして観測されます。OFDMベースのレシーバ・システムでは、キャリア・リークを除去する方法を利用しています。IEEEでは、送信中心周波数のリークは、送信パワー全体に対して -15 dBを越えないこと、または等価的に、20MHzチャンネル幅の送信では他のサブキャリアの平均エネルギーに対して $+2$ dBを越えないことと規定されています。40MHzチャンネル幅の送信では、中心周波数のリークは、送信パワー全体に対して -20 dBを越えないこと、または等価的に、他のサブキャリアの平均エネルギーに対して 0 dBを越えないことと規定されています。40MHzチャンネルの20MHz以上/以下の送信では、中心周波数のリーク（40MHzチャンネルの中心）は、送信パワー全体に対して -17 dBを越えないこと、または等価的に、他のサブキャリアの平均エネルギーに対して 0 dBを越えないことと規定されています。802.11acでは、RFのLOが両方の周波数セグメントから外れる、隣接しない80+80MHzを除く、すべてのフォーマットと帯域幅は次の要件を満たす必要があります。

- RFのLOが送信帯域幅の中心にある場合、312.5kHzの分解能で送信帯域の中心で測定されるパワーは、送信されるバーストのサブキャリアごとの平均パワーより大きくなることはできません。

- RFのLOが送信帯域幅の中心にない場合、312.5kHzの分解能でRFのLOの位置で測定されるパワーは、トータルの送信パワーおよび -20 dBmに対して最大で -32 dB大きくなることはできません。

RFのLOが両方の周波数セグメントの外にある場合の80+80MHz送信では、RFのLOは規格で規定されるスペクトラム・マスクの要件にしたがう必要があります。送信中心周波数リークは、アンテナごとに規定されます。

送信コンスタレーション・エラー

送信変調テストでは、コンスタレーション・ダイアグラムの検証とEVM (Error Vector Magnitude) 測定を行います。このテストでは、信号品質に影響を及ぼす可能性のある、送信チェーン全体の歪みの種類に関する重要な情報が得られます。

EVM RMSとも呼ばれる送信コンスタレーション・エラーは、コンスタレーション・ダイアグラムの理想的なエラーのない位置からの、実際のコンスタレーション・ポイントの実効値平均偏移（単位は% RMSまたはdB）です。実効値エラーは、サブキャリア、OFDMフレーム、パケットで平均化されます。この測定により、圧縮、ダイナミック・レンジ、I/Qエラー、干渉、位相ノイズなどの不具合が検出できます。IEEEでは、このテストは最低でも20フレーム（Nf）、各フレームは最低でも16 OFDMシンボル長で行うように規定されています。シンボルでは、ランダム・データが使用されます。

送信変調確度（EVM）テスト

このテストは、基本的に送信コンスタレーション・エラーの繰り返しになります。

シンボル・クロック周波数の許容度

シンボル・クロック周波数の許容度は、5GHzバンドで最大 ± 20 ppm、2.4GHzバンドで ± 25 ppmです。送信中心周波数とすべての送信アンテナのシンボル・クロック周波数は、同じリファレンス・オシレータからのものであることが求められます。

802.11と802.11bのトランスミッタ要件

802.11と802.11bのトランスミッタ要件*1			
DSSS (802.11-2012, Section 16)			
スプリアス表示	16.4.6.6 17.4.6.9	Tx & Rx Inband & OOB Spurious EM	仕様なし (“規制団体によって規定されるインバンドおよびアウトオブバンドのスプリアス放射にしたがうこと”)
チャンネル・パワー表示	16.4.7.2 17.4.7.2	Transmit Power Levels	仕様なし (“規制団体で規定されている方法にしたがって測定すること”)
スペクトラム・エミッション・マスク (SEM)	16.4.7.5 17.4.7.4	Transmit Spectrum Mask	dBrスペクトラム・マスク
サマリ表示キャリア周波数誤差	16.4.7.6 17.4.7.5	Transmit Center Frequency Tolerance	±25ppm
サマリ表示シンボル・クロック誤差	16.4.7.7 17.4.7.6	Chip Clock Frequency Tolerance	±25ppm
パワー・オン/パワー・オフ	16.4.7.8 17.4.7.7	Transmit Power On / Power Off	2μs以下 (10~90%)
サマリ表示IQオリジン・オフセット	16.4.7.9 17.4.7.8	RF Carrier Suppression	sin(x)/xのカーブに対して-15dB
サマリ表示 - EVM	16.4.7.10 17.4.7.9	Transmit Modulation Accuracy	ピークEVM (1000サンプル) : 0.35未満

*1 IEEE 802.11 - 2012の規格改定による

802.11aのトランスミッタ要件

802.11aのトランスミッタ要件*1					
OFDM ("a") (802.11-2012, Section 18)					
スプリアス表示	18.3.8.5	Tx & Rx Inband & OOB Spurious EM	仕様なし ("規制団体によって規定されるインバンドおよびアウトオブバンドのスプリアス放射にしたがうこと")		
チャンネル・パワー表示	18.3.9.2	Transmit Power Levels	仕様なし ("規制団体で規定されている方法にしたがって測定すること")		
スペクトラム・エミッション・マスク (SEM)	18.3.9.3	Transmit Spectrum Mask	dBrスペクトラム・マスク		
スプリアス表示	18.3.9.4	Transmit Spurious	仕様なし ("規制に準拠すること")		
サマリ表示キャリア周波数誤差	18.3.9.5	Transmit Center Frequency Tolerance	±20ppm (20MHz、10MHz)、±10 (5MHz)		
サマリ表示シンボル・クロック誤差	18.3.9.6	Symbol Clock Frequency Tolerance	±20ppm (20MHz、10MHz)、±10 (5MHz)		
サマリ表示IQオリジン・オフセット	18.3.9.7.2	Transmitter Center Frequency Leakage	-15dBcまたは+2dB (平均サブキャリア・パワーによる)		
スペクトラム・フラットネス	18.3.9.7.3	Transmitter Spectral Flatness	±4dB (SC=-16...16)、+4/-6dB (その他)		
サマリ表示 - EVM	18.3.9.7.4	Transmit Constellation Error	許容相対コンスタレーション誤差対データ・レート		
			変調	符号化率 (R)	相対コンスタレーション誤差 (dB)
			BPSK	1/2	-5
			BPSK	3/4	-8
			QPSK	1/2	-10
			QPSK	3/4	-13
			16-QAM	1/2	-16
16-QAM	3/4	-19			
64-QAM	2/3	-22			
64-QAM	3/4	-25			

*1 IEEE 802.11 - 2012の規格改定による

802.11gと802.11nのトランスミッタ要件

802.11gと802.11nのトランスミッタ要件*1																											
ERP (802.11-2012, Section 19)																											
スプリアス表示	19.4.4	Tx & Rx Inband & OOB Spurious EM	仕様なし (“規制団体によって規定されるインバンドおよびアウトオブバンドのスプリアス放射にしたがうこと”)																								
チャンネル・パワー表示	19.4.8.2	Transmit Power Levels	仕様なし (“規制団体で規定されている方法にしたがって測定すること”)																								
サマリ表示キャリア周波数誤差	19.4.8.3	Transmit Center Frequency Tolerance	±25ppm																								
サマリ表示シンボル・クロック誤差	19.4.8.4	Symbol Clock Frequency Tolerance	±25ppm																								
スペクトラム・エミッション・マスク (SEM)	19.5.5	Transmit Spectrum Mask ERP-OFDM ERP-DSSS	18.3.9.3に準拠 17.4.7.4に準拠																								
OFDM/HT ("n") (802.11-2012, Section 20)																											
スペクトラム・エミッション・マスク (SEM)	17.4.7.4	Transmit Spectrum Mask	dBrスペクトラム・マスク																								
スペクトラム・フラットネス	20.3.20.2	Spectral Flatness	±4dB、+4/-6dB																								
チャンネル・パワー表示	20.3.20.3	Transmit Power	仕様なし (“規制団体で規定されている方法にしたがって測定すること”)																								
サマリ表示キャリア周波数誤差	20.3.20.4	Transmit Center Frequency Tolerance	±20ppm (5GHzバンド)、±25ppm (2.4GHzバンド)																								
サマリ表示シンボル・クロック誤差	20.3.20.6	Symbol Clock Frequency Tolerance	±20ppm (5GHzバンド)、±25ppm (2.4GHzバンド)																								
サマリ表示IQオリジン・オフセット	20.3.20.7.2	Transmitter Center Frequency Leakage	20MHz : 18.3.9.7.2に準拠 40MHz : -20dBcまたは0dB (平均サブキャリアパワーによる)																								
サマリ表示 - EVM	20.3.20.7.3	Transmit Constellation Error	許容相対コンスタレーション誤差対データ・レート																								
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>変調</th> <th>符号化率 (R)</th> <th>相対コンスタレーション誤差 (dB)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BPSK</td> <td>1/2</td> <td>-5</td> </tr> <tr> <td>QPSK</td> <td>1/2</td> <td>-10</td> </tr> <tr> <td>QPSK</td> <td>3/4</td> <td>-13</td> </tr> <tr> <td>16-QAM</td> <td>1/2</td> <td>-16</td> </tr> <tr> <td>16-QAM</td> <td>3/4</td> <td>-19</td> </tr> <tr> <td>64-QAM</td> <td>2/3</td> <td>-22</td> </tr> <tr> <td>64-QAM</td> <td>3/4</td> <td>-25</td> </tr> <tr> <td>64-QAM</td> <td>5/6</td> <td>-27</td> </tr> </tbody> </table>	変調	符号化率 (R)	相対コンスタレーション誤差 (dB)	BPSK	1/2	-5	QPSK	1/2	-10	QPSK	3/4	-13	16-QAM	1/2	-16	16-QAM	3/4	-19	64-QAM	2/3	-22	64-QAM	3/4	-25
変調	符号化率 (R)	相対コンスタレーション誤差 (dB)																									
BPSK	1/2	-5																									
QPSK	1/2	-10																									
QPSK	3/4	-13																									
16-QAM	1/2	-16																									
16-QAM	3/4	-19																									
64-QAM	2/3	-22																									
64-QAM	3/4	-25																									
64-QAM	5/6	-27																									

*1 IEEE 802.11 - 2012の規格改定による

802.11acのトランスミッタ要件

802.11 acのトランスミッタ要件*1					
OFDM/VHT ("ac") (802.11-2012, Section 22)					
スペクトラム・エミッション・マスク (SEM)	22.3.18.15	Transmit Spectrum Mask	dBrスペクトラム・マスク		
スペクトラム・フラットネス	22.3.18.2	Spectral Flatness	±4dB、+4/-6dB (さまざまな帯域幅、20~160MHz)		
サマリ表示キャリア周波数誤差	22.3.18.3	Transmit Center Frequency Tolerance	±20ppm		
サマリ表示 - EVM クロック・エラー		Symbol Clock Frequency Tolerance	±20ppm		
サマリ表示IQ オリジン・オフセット	22.3.18.4.2	Transmitter Center Frequency Leakage	20、40、80、160MHz、CFでは中央サブキャリアごとの平均パワー未満 20、40、80、160MHz、CFでは中央ではない((トータルパワー) -32dBまたは-20dBmのどちらか大きい値) 未満 80+80MHz : スペクトラム・マスクに適合		
サマリ表示 - EVM	22.3.18.4.3	Transmit Constellation Error	許容相対コンスタレーション誤差対データ・レート		
			変調	符号化率 (R)	相対コンスタレーション誤差 (dB)
			BPSK	1/2	-5
			QPSK	1/2	-10
			QPSK	3/4	-13
			16-QAM	1/2	-16
			16-QAM	3/4	-19
			64-QAM	2/3	-22
			64-QAM	3/4	-25
			64-QAM	5/6	-27
256-QAM	3/4	-30			
256-QAM	5/6	-32			

*1 IEEE 802.11 - 2012の規格改定による

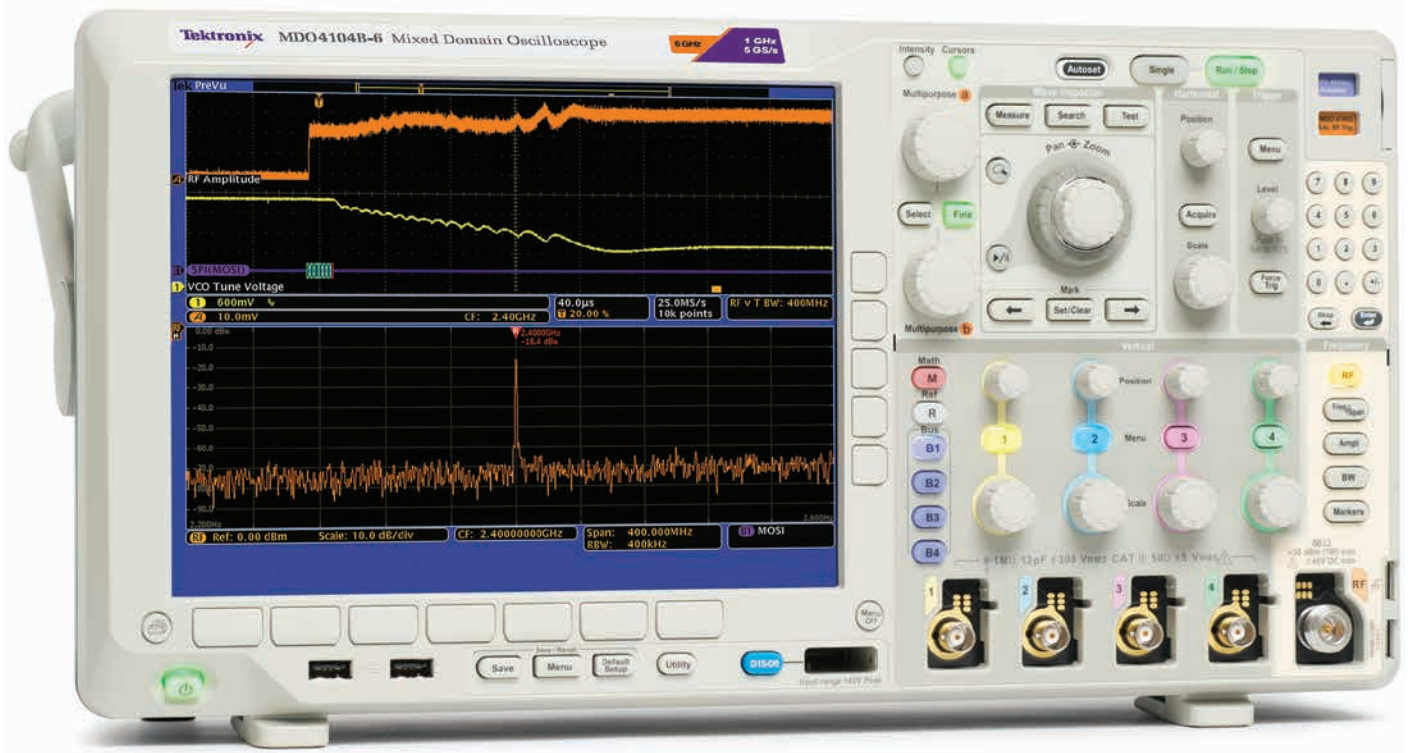


図20. MDO4000Bシリーズは、時間相関のとれたアナログ信号、デジタル信号、RF信号が同時に取込み、デバイスのシステム動作の観測が可能になる

まとめ

現在、および将来の802.11仕様に対するテスト・ニーズに応えるため、テクトロニクスは独自のニーズに対応するさまざまなツールを提供しています。

RSA5000シリーズ、RSA6000シリーズ・リアルタイム・スペクトラム・アナライザは、802.11acのようなRF信号をすばやく検出し、取込み、特性することができます。当社は、20年以上も前にリアルタイム・スペクトラム解析を発明しました。無線信号をこれほど確実にテストできるスペクトラム・アナライザ・ファミリは他にありません。ワイドバンド信号を高い検出確率でサーチします。

MDO4000Bシリーズは、スペクトラム・アナライザ機能を組込んだ、世界で初めてのオシロスコープであり、アナログ信号、デジタル信号、RF信号を、時間相関をとりながら取込むことができるため、デバイスのシステム観測が可能になります。時間ドメインと周波数ドメインが一目で同時に観測でき、任意の時間におけるRFスペクトラムを観測することで時間またはデバイスの状態におけるRFスペクトラムの変化の様子を観測できるため、複雑な設計問題をすばやく、効率的に解決することができます。

スペクトラム・アナライザとアナログまたはデジタルのチャンネルの両方がオンの場合、オシロスコープには2つの波形が分割表示されます。ディスプレイの上半分には、時間ドメインによる従来のオシロスコープ波形が表示されます。また、ディスプレイの下半分には、スペクトラム・アナライザ入力の周波数ドメインの波形が表示されます。

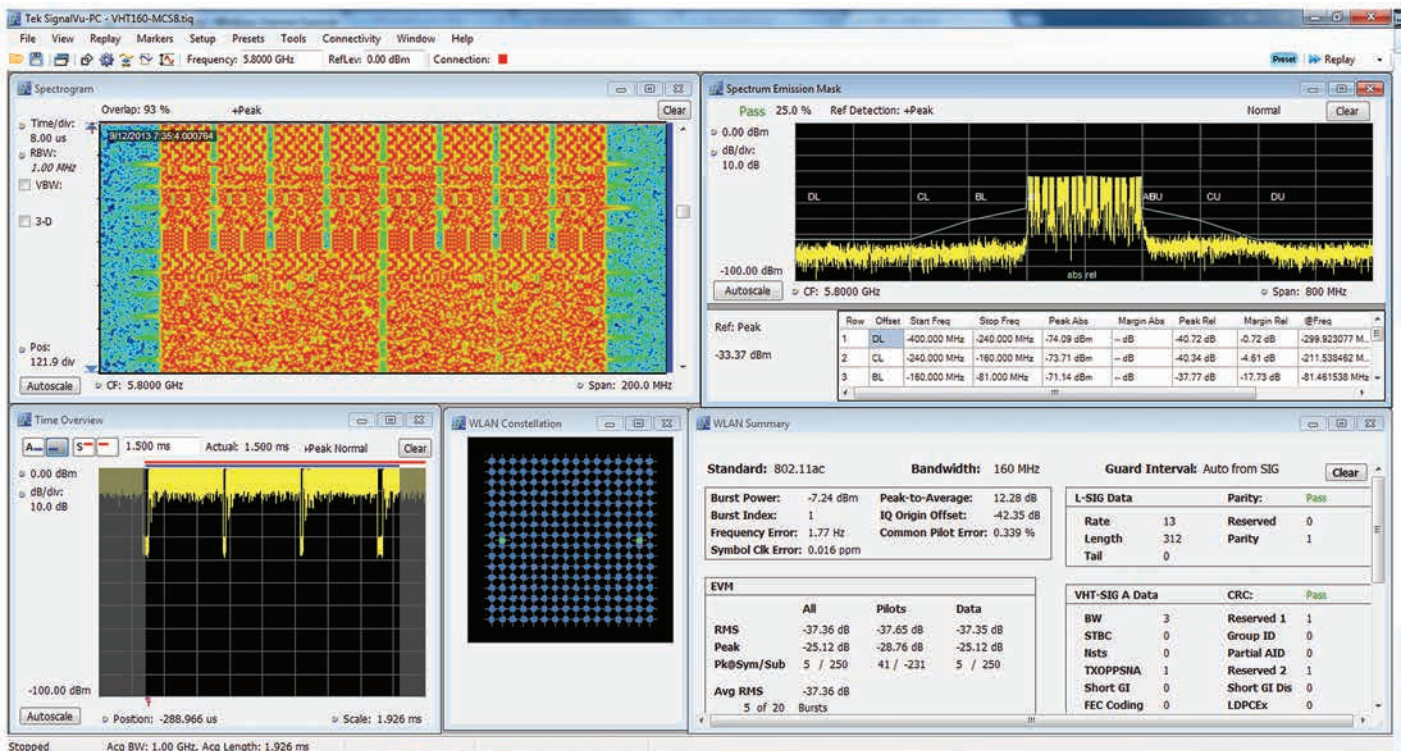


図21. SignalVu-PCを使用することで、1回の取込みですべての802.11ac測定が可能になる

周波数ドメインの波形は、単にアナログまたはデジタル・チャンネルのFFT波形ではなく、スペクトラム・アナライザ入力から取込まれたスペクトラム表示です。

従来のオシロスコープのFFTでは、一度に表示するのはFFT表示または他の時間ドメインの信号のいずれかで、同時に両方は表示できません。一方、MDO4000Bシリーズは、アナログ/デジタルのアクイジション・システムから独立し、このアクイジション・システムと時間相関がとれているスペクトラム・アナライザ入力のためのアクイジション・システムを装備しています。これにより、各ドメインは最適に設定され、すべてのアナログ、デジタル、RFの信号がシステムレベルで完全に時間相関のとれた状態で表示されます。

また、MDO4000BシリーズとSignalVu-PCのライブ・リンク機能により、時間ドメインと周波数ドメインにおけるRF信号の位相と振幅が解析でき、さらに復調することもできます。さらに、RF信号品質を定量化し、シンボル情報を抽出することもできます。WiFi信号を解析する専用オプションも用意されており、IEEE 802.11ac信号の広帯域にも対応できます。MDO4000Bシリーズは1回の取込みで1GHzの取込みが行えるため、すべてのスペクトラム、時間ドメイン、変調が同時に測定できます。他の狭帯域シグナル・アナライザでは、掃引することでスペクトラム・エミッション・マスクを取込む必要があるため、この測定には160MHz以上の帯域幅が必要になります。

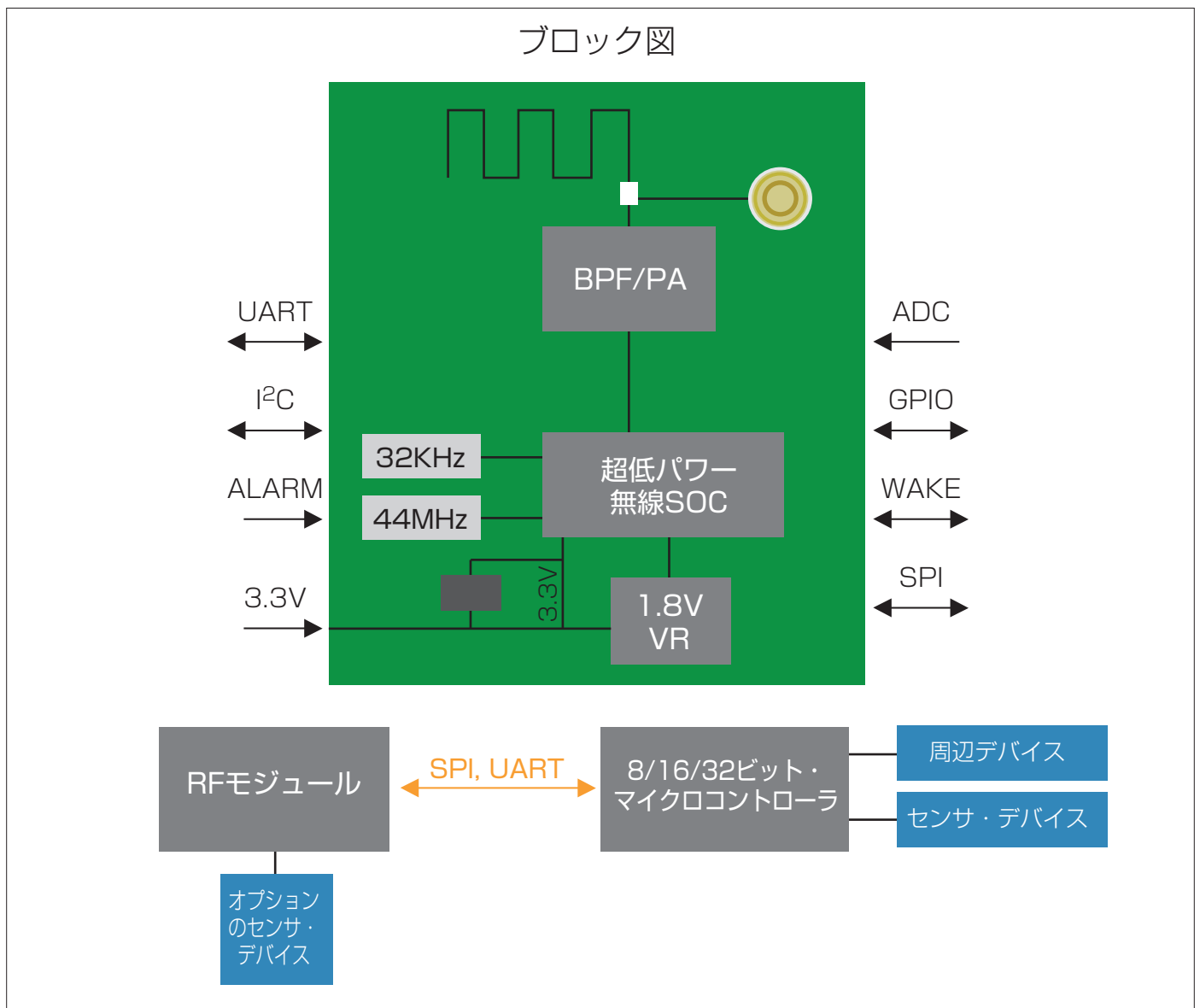


図22. RFモジュールとその使用に関するハイレベルなブロック図

組込みアプリケーションで使用されるほとんどのRFモジュールは、シリアル・データ・バス・タイプのインターフェースによるマイクロコントローラで制御されます。スペクトラム・アナライザはRFモジュール、マイクロコントローラ間のインターフェースのデバッグには使用できません。SPIまたはUARTバスの制御信号を観測し、同時に、RF無線放射の影響が把握できる、新しいタイプのツールが必要になります。MDO4000BシリーズとSignalVu-PCを組み合わせることにより、1台のお求めやすいツールで、このシステムレベルのデバッグ機能が実現できます。

RFモジュールに入力される制御信号とRF出力が1台で観測できる計測器は、MDO4000Bシリーズだけです。

詳細については、当社ウェブ・サイトをご覧ください。
www.jp.tektronix.com/oscilloscope/mdo4000-mixeddomainoscilloscope

ASEAN/オーストラリア・ニュージーランドと付近の諸島 (65) 6356 3900
ベルギー 00800 2255 4835*
中央/東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
フィンランド +41 52 675 3777
香港 400 820 5835
日本 0120 441 046
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
中国 400 820 5835
韓国 001 800 8255 2835
スペイン 00800 2255 4835*
台湾 886 (2) 2722 9622

オーストリア 00800 2255 4835*
ブラジル +55 (11) 3759 7627
中央ヨーロッパ/ギリシャ +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835*
インド 000 800 650 1835
ルクセンブルク +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835*
ポーランド +41 52 675 3777
ロシア / CIS +7 (495) 7484900
スウェーデン 00800 2255 4835*
イギリス/アイルランド 00800 2255 4835*

バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他SE諸国 +41 52 675 3777
カナダ 1 800 833 9200
デンマーク +45 80 88 1401
ドイツ 00800 2255 4835*
イタリア 00800 2255 4835*
メキシコ、中央/南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
ノルウェー 800 16098
ポルトガル 80 08 12370
南アフリカ +41 52 675 3777
スイス 00800 2255 4835*
アメリカ 1 800 833 9200

* ヨーロッパにおけるフリーダイヤルです。ご利用になれない場合はこちらにおかけください。+41 52 675 3777

Updated 10 February 2011



37Z-29447-0
2013年12月

Tektronix[®]

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階
テクトロニクス お客様コールセンター TEL:0120-441-046
電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00(土・日・祝・弊社休業日を除く)

jp.tektronix.com

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX およびTEK はTektronix, Inc. の登録商標です。記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。