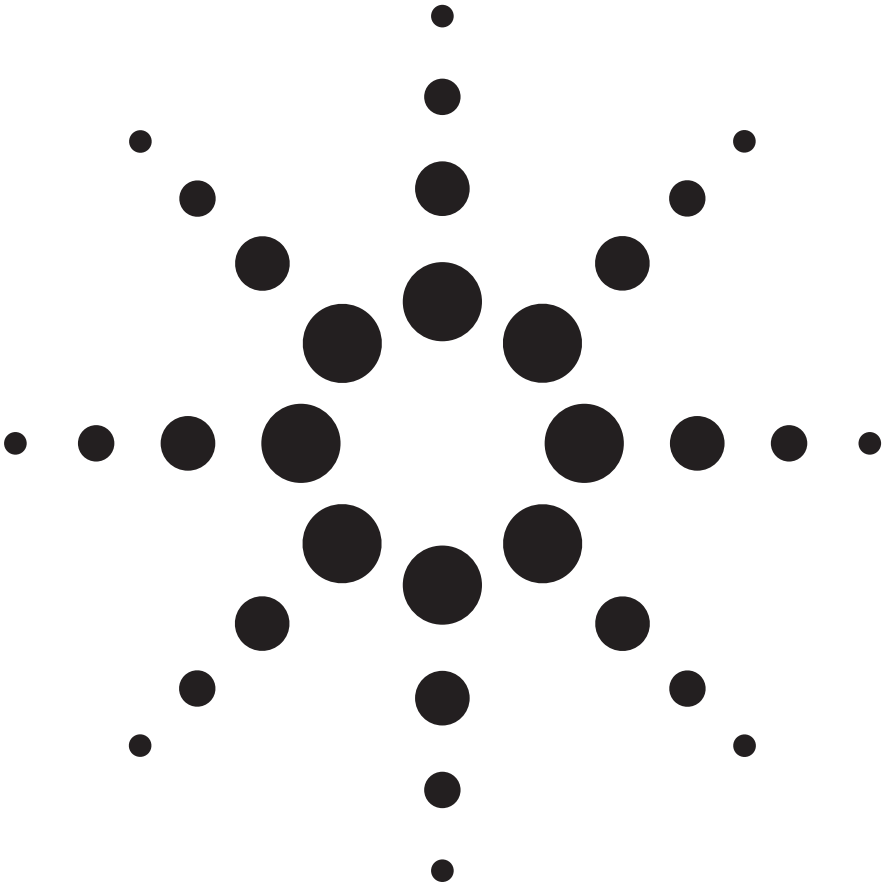
Bluetooth® EDR（エンハンスド・データ・レート）：仕様概説

Application Note



Agilent Technologies

目次

はじめに 1
概要 4
Bluetooth®のバージョン1.0からバージョン1.2へのバージョンアップ 6
Bluetooth®のバージョン1.2からバージョン2.0＋EDRへのバージョンアップ 7
Bluetooth EDRの利用例 8
パケット構造と変調方式 9
ベーシック・レートおよびEDRパケット・フォーマット 9
ベーシック・レートおよびEDR変調方式 10
EDRの新しいテスト手順 13
EDRの*Bluetooth*送信機のテスト 14
EDRの*Bluetooth*受信機のテスト 19
Bluetooth EDRの今後の動向 21
付録A：記号と略語 22
付録B：リファレンス 23

はじめに

Bluetooth®は、情報機器間の音声およびデータのコネクティビティを提供するための近距離通信システムです。当初は1 Mb/sのピーク・データ・レートで動作するよう設計されていましたが、EDR（エンハンスド・データ・レート）の導入により、*Bluetooth*コア仕様で2 Mb/sおよび3 Mb/sのピーク・データ・レートがサポートされるようになりました［1］。

EDRモードを含むRFレイヤのコンフォーマンス・テストのための仕様は、*Bluetooth* SIG（Special Interest Group）が策定しました［2］。このアプリケーション・ノートは、*Bluetooth* EDRの動作とテストのチュートリアルです。コア仕様のv1.0からv1.2へのバージョンアップとそれに続くv2.0＋EDRへのバージョンアップの推進力となった、市場のニーズについても簡単に説明します。送信機と受信機の暫定テストを含めた、*Bluetooth* EDR規格についても詳しく説明します。

概要

*Bluetooth*システムは、免許が必要のない2.4 GHzのISM（Industrial-Scientific-Medical）無線バンドで動作します。低電力のRF送信による、10～100 mの範囲のデバイス間での通信です。

*Bluetooth*を使用すると、本格的な無線インフラがなくても最大8台のデバイスをアドホック・ネットワークとして接続できます。*Bluetooth*では、干渉とフェーディングを軽減するために、FHSS（周波数ホッピング・スペクトラム拡散）を使用しています。FHSSにより、*Bluetooth*の多元アクセスや別のタイプの無線システムとの共存も容易になります。周波数ホッピングの基本パターンは、ISMバンド内の79個のチャネル周波数を擬似ランダムに切り替えるものです。またAFH（Adaptive Frequency Hopping）に対応することで、既知の干渉を持つチャネルを除去でき、性能を大幅に改善できます。ホッピング・レートは、1600ホップ/s（公称値）です。

*Bluetooth*システムは、ポイントツーポイント接続またはポイントツーマルチポイント接続を提供します。同じ物理チャネルを共有する2台以上のデバイスが、アドホック・ネットワーク（ピコネット）を形成します。ピコネットでは、1台のデバイスがマスタ、その他の最大7台のデバイスがスレーブとしてアクティブに動作できます。ピコネットのすべてのデバイスが、マスタによって提供される共通のクロック基準と周波数ホップ・パターンに同期します。*Bluetooth*デバイスは2つ以上のオーバラップするピコネットで動作することができ、これをスキャッタネットと呼びます。図1に、2個の個別のピコネットから構成されるスキャッタネットのネットワーク・トポロジーを示します。この図では、1台のデバイスが、一方のピコネットではマスタ、他方のピコネットではスレーブとして動作しています。ピコネット間の同期のために、1台のデバイスが複数のピコネットのマスタとなることはできません。仕様では、各ピコネットは、個別のホップ・パターンとマスタ・クロックを使って独立して動作する必要があります。

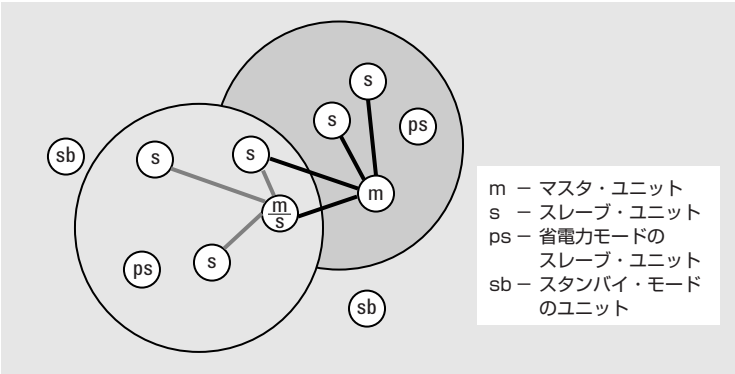


図1. 共通のデバイスを共有する2つのピコネットによって形成されたスキャッタネット・トポロジー

*Bluetooth*の物理チャネルはタイムスロットに分割され、TDD（時分割デュプレックス）を使って伝送が行われます。マスタは伝送に偶数番号のタイムスロットを用い、スレーブは奇数番号のスロットを用います。タイムスロット長は、周波数ホップ・レートの関数で、625 μs（公称長）となります。データは、タイムスロット内のパケットに入れて伝送されます。デバイスは、マスタが調整することにより、1つのパケットに対して1個、3個、または5個の連続するタイムスロットを使用できます。パケットには、アクセス・コード、ヘッダ、ガード・バンド、ペイロードが含まれています。ユーザ・データはペイロードに含まれ、複数の異なる変調方式のいずれか（*Bluetooth* v1.0およびv1.2仕様のGFSK、コア仕様のv2.0＋EDRで導入された*π*/4DQPSK、8DPSKなど）を使ってRF搬送波に変調されます。

*Bluetooth*チャネル内で、*Bluetooth*ピコネットでアクティブになっているマスタとスレーブ間に物理リンクが形成されます。音声用に主に使用されるSCO（同期コネクション）リンクとデータ用のACL（非同期コネクションレス・リンク）の、2種類の物理リンクがあります。SCOおよびeSCO（拡張SCO）リンクは、マスタとスレーブ間のポイントツーポイント・リンクで、回線交換接続と考えることができます。ACLリンクは、ピコネットのマスタとすべてのアクティブ・スレーブ間にパケット交換接続を提供します。マスタ・ユニットがピコネットのすべてのトラフィックを制御し、各種SCOリンクの容量を割り当て、ACLリンクのポーリング方式を処理します。

*Bluetooth*コア・システムのプロトコルは、RF（無線）、LC（リンク制御）、LM（リンク・マネージャ）、L2CAP（論理リンク制御／適応）から構成されています。RFは、プロトコル・スタックのレイヤ1です。

*Bluetooth*のバージョン1.0からバージョン1.2へのバージョンアップ

*Bluetooth*コア仕様バージョン1.2（v1.2）で実装された主要な変更の1つが、AFH（Adaptive Frequency Hopping）の導入です。変更が行われた理由の1つは、*Bluetooth*と802.11b/g 無線LANで衝突する可能性が発生したためです。2つの無線システムは、2.4 GHz ISMバンドで同じ周波数レンジを共有しています。無線LANシステムは、直接シーケンス・スペクトラム拡散（DSSS）またはOFDMテクノロジーを使用していて、最大チャネル帯域幅は22 MHzです。*Bluetooth*システムは、1 MHz間隔の79個のチャネルに対してFHSSテクノロジーを使用しています。両方のシステムが存在すると、2つのデバイス間に28パーセントの衝突の可能性が生じます（22/79）。v1.2で仕様化されたAFHを使用すると、*Bluetooth*システムが、無線LAN信号などの干渉を測定して、既知の干渉を持つこれらの周波数チャネルを回避できます。システムは、必要に応じて、使用可能なチャネルの数を20個まで減らすことができます［3］。

v1.2で義務付けられたもう1つの主要な改良により、接続時間が高速化しました。当初は、元のv1.0仕様に基づいた無線による4～5sの接続時間が一般的でした。v1.2で問合せとページング動作に関する変更が行われ、これにより接続時間が0.5s未満になりました。接続時間の高速化により、ユーザ体験が改善されただけではなく、製造テスト時間も短縮され、全体の生産コストが低下しました。

v1.2ではその他の機能も拡張されました。その結果、リンク品質が向上し、フロー制御が改善されました。例えば、v1.2ではeSCO論理トランスポート・リンクが追加されています。eSCOは、データ・ストリームでエラーが発生したときに、再送信を実行するSCOリンクです。元のSCO用の*Bluetooth*コア・システムでは、固定のタイム・インターバルとサイズのペイロードを使用し、固定レートで同期データを伝送していました。eSCOリンクでは、パケット・タイプと、選択したパケット内のデータ・コンテンツ、スロット周期をさまざまに組み合わせることができ、広範囲のビット・レートがサポートされ、データ伝送速度も向上します。当初、64 kb/sの音声伝送がサポートされていましたが、v1.2仕様での変更により、複数の新しいパケットが追加され、伝送レートが最大288 kb/sに増加しています。

v1.2準拠の*Bluetooth*デバイスは、いずれの場合にもv1.0との下位互換性を保持している必要があります。

*Bluetooth*のバージョン1.2からバージョン2.0＋EDRへのバージョンアップ

Bluetooth SIGでは、EDR機能の導入と、v1.2で発見されたエラーに対応するために、最新コア・システム仕様v2.0＋EDRを策定しました。この仕様では、v1.2のすべての機能に加えて、パケットのペイロード・セクションで2つの新しい変調方式が実装されています。これらのEDRパケット・タイプにより、2 Mb/sと3 Mb/sのピーク・データ・レートが可能になります。ベーシック・レートの1 Mb/sを超えるピーク・データ・レートを実現するために、PSK（位相シフト・キーイング）テクノロジーを使ってRF搬送波を変調しています。この結果、ビット数／シンボルが2～3倍に増加しました。2 Mb/sのEDRパケットはπ/4DQPSK変調を使用し、3 Mb/sのEDRパケットは8DPSK変調を使用します。EDR変調方式に関する追加情報が、このアプリケーション・ノートの「ベーシック・レートおよびEDRパケット・フォーマット」に記載されています。π/4DQPSK変調は、v2.0＋EDR準拠の無線機の必須機能です。8DPSK変調方式はオプションです。

v1.2との下位互換性を保持するために、すべての*Bluetooth* v2.0＋EDR準拠の無線機には、ベーシック・レートと呼ばれる必須モードが必要です。ベーシック・レートでは、前のバージョンのコア仕様に定義されているように、パケット全体でGFSK変調を使用して、1 Mb/sのピーク・データ・レートを実現します。重要な点は、ベーシック・レート・タイプとEDRパケット・タイプで1 Ms/sのシンボル・レートが保持されるので、3つの変調方式のいずれでもスペクトラム占有率がほぼ同じになることです。EDR変調を使用すると占有帯域幅がわずかに増加します。この理由は、ベーシック・レート・パケットに実装されている狭いガウシアン・フィルタではなく、ルート・ナイキスト・フィルタを使用するからです。FCCでは、*Bluetooth* EDR無線機を2.4 GHz ISMバンドで使用できるように、－20 dB占有帯域幅要件を1.0 MHzから1.5 MHzに緩めています。

Bluetooth EDRの利用例

*Bluetooth*は、パーソナル・デバイス、ポータブル・デバイス、ハンドヘルド・デバイス間の近距離無線接続を提供する手段として設計されました。*Bluetooth*デバイスは、最初はケーブルに代わるものとして使用されていましたが、現在では、無線ヘッドセットで使用されたり、PC、PDA、デジタル・カメラ、プリンタ間のデータ交換／同期用に使用されています。*Bluetooth*ピコネットのデバイスは、ユーザの周囲に自然発生的なパーソナル・エリア・ネットワーク（PAN）を形成します。ピコネットに入った*Bluetooth*デバイスは、PAN内の他のデバイスに接続できます。さらに、*Bluetooth*デバイスは、ネットワーク機能を持つパーソナル・ゲートウェイ・デバイスを経由してLAN（ローカル・エリア・ネットワーク）やWANに接続できます。例えば、*Bluetooth*対応PCは、WANデータ・サービスに接続されている*Bluetooth*対応携帯電話を経由してインターネットにアクセスできます。

*Bluetooth*テクノロジーがさまざまな民生製品に採用され、新たに用途を広げていくためには、データ・レートのさらなる増加とバッテリ寿命の延長が必要となります。例えば、近距離無線コネクティビティに対する消費者の要望は、単独のアプリケーションの実行から、同じPAN内での複数のアプリケーションの実行へと移っています。ステレオ・オーディオをマウス、キーボード、プリンタなどの無線入出力デバイスと同時に動作させる広帯域アプリケーションなどのマルチメディア／ゲーム・アプリケーションを実行する場合は、*Bluetooth*システムに高度な要求が課せられます。EDRの導入により、複数のアプリケーションが帯域幅をより効率的に利用できるようになり、全体の性能が向上しました。図2は、さまざまな高データ・レート・アプリケーションが同じPAN内で動作する、代表的なマルチ使用シナリオを示しています。EDRにより増えた容量により、これらの民生機器の同時操作が可能になります。EDR伝送によりデータ・レートが増加した結果、無線エレクトロニクスがオンになっている時間が短縮され、消費電力が大幅に減少し、無線機器のバッテリ寿命が伸びます。

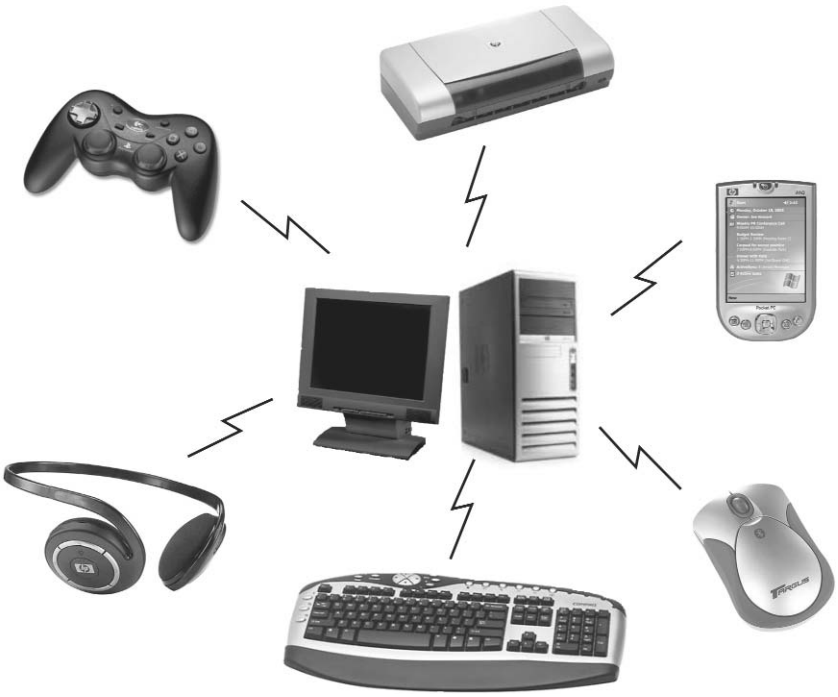


図2. パーソナル・エリア・ネットワークを形成する複数の*Bluetooth* EDR対応機器

パケット構造と変調方式

ベーシック・レートおよびEDRパケット・フォーマット

*Bluetooth*パケットは、アクセス・コードとヘッダから始まります。アクセス・コードは、物理チャネルのパケットの同期、DCオフセット補正、識別や*Bluetooth*システムでのページング、問合せ、パーク動作に使用されます。ヘッダには、パケット・タイプなどのリンク制御情報が含まれています。3つの異なる論理トランスポートをカバーする、15種類の異なるパケット・タイプがあります[1]。前述のように、3つの論理トランスポート、(リンク・タイプ)とは、ACL、SCO、eSCOです。リンク・タイプによって、アクセス・コードとヘッダに続くペイロードのフォーマットが決まります。ペイロードには、ユーザ情報や制御情報が含まれています。ユーザ情報は、データ、音声、または2つの組み合わせから構成されています。ペイロードには、デバイス識別用の制御データが含まれていて、リアルタイム・クロック情報を提供します。ペイロードには、CRC(巡回冗長検査)、FEC(誤り訂正)情報などのエラーの検出/リカバリ用の追加データも含まれています。図3に、通常のパケット・フォーマット(ベーシック・レート・パケット)のフォーマットを示します。通常パケットは、EDRパケットの導入後のv2.0+EDRでは、ベーシック・レート・パケットと呼ばれるようになりました。ベーシック・レート・パケットは、GFSK(ガウシアン周波数シフト・キーイング)によって伝送されます。

EDRパケットの主な特長は、パケット・ヘッダの後、変調がDPSK(差動位相シフト・キーイング)に変化することです。その結果、新しい変調方式に同期するために、追加のタイミング情報と制御情報が必要となります。EDRパケットは、変調方式を含めて、ベーシック・レート・パケットと同じアクセス・コードとヘッダを使用します。EDRパケットにはヘッダの後に、DPSKへの変調の変更を準備するための*Bluetooth*無線時間として、短い時間周期が含まれています。この短い時間(ガード・タイム)の仕様は、4.75 μs～5.25 μsです。ガード・タイムの後に、1個の基準シンボルと10個のDPSKシンボルを含む同期シーケンスが続きます。このシーケンスは、EDRパケットで使用される2つの変調方式のいずれかに対して、シンボルのタイミングと位相を同期するために必要になります。EDRパケットのペイロードには、伝送されるパケット・タイプに基づいたユーザ情報や制御情報が含まれています。図4に、EDRパケットのフォーマットを示します。

図3. *Bluetooth*ベーシック・レート・パケットのフォーマット

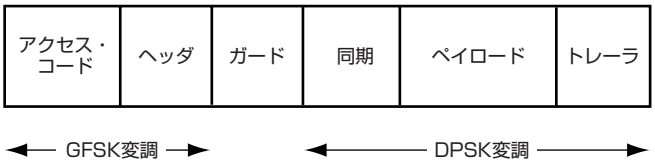


図4. *Bluetooth* EDRパケットのフォーマット

ベーシック・レートとEDR変調方式

通常（ベーシック・レート）変調はGFSKです。データは、データ・レート1 Mb/s、1ビット／シンボルで送信されます。したがってシンボル・レートは1 Ms/sです。データをRF搬送波に変調するには、115 kHz以上の搬送波周波数でのシフトまたは偏移を使用します。バイナリ1は正の周波数偏移、バイナリ0は負の周波数偏移で表します。FSK変調信号は固定エンベロープなので、送信アンプのパワー効率を向上できます。ガウシアン・パルス・シェイピングにより1 MHzの－20 dB帯域幅を保持することにより、*Bluetooth*信号に対する優れたスペクトラム効率が得られます。

EDR変調方式は、パケットのペイロード・セクションで2種類のDPSKのいずれかを使用します。図4に示すように、EDRパケットでは、パケットの始めにあるアクセス・コード部分とヘッダ部分にはGFSK変調が使用され、ガード・タイム後にDPSK変調に変化します。DPSKフォーマットに変化することにより、データ・レートが2 Mb/sまたは3 Mb/sに上がります。データ・レートを上げるために、仕様の1 Ms/sシンボル・レートを保持したままで、1シンボル当たり2または3ビットを送信します。

図5aは、アクセス・コードとヘッダにGFSK変調を使用し、ペイロードに8DPSK変調を使用したEDRパケットのパワー対時間測定を示しています。図5bは、同じパワー対時間測定で変調がGFSKからDPSKに変化する期間を、拡大したものです。この図には、5 μsのガード・タイムとEDRペイロードの先頭にある11個の同期ビットが示されています。興味深いことに、パケットのGFSK変調部分の振幅は比較的一定で、DPSK変調波形の振幅には大きな変動が見られます。スペクトラム効率を実現するために、1.5 MHzの－20 dB帯域幅が得られるルート・ナイキスト・フィルタによるパルス・シェイピングを使用しています。これは、GFSK変調方式の帯域幅よりわずかに大きなものです。

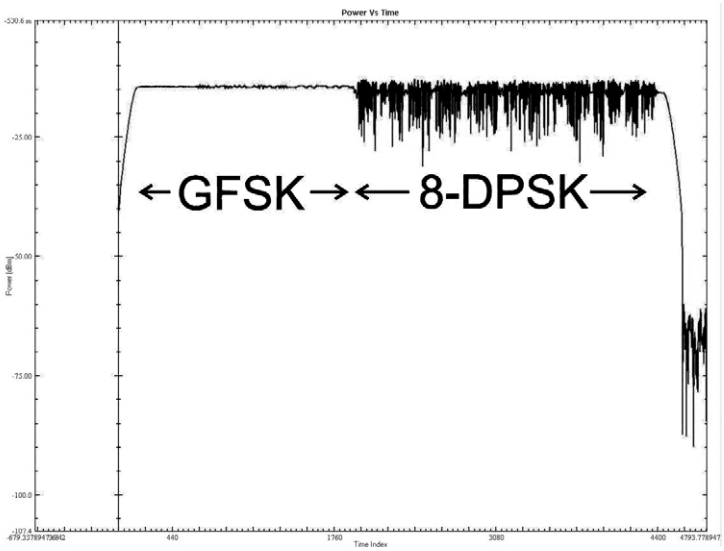


図5a. パケットのGFSK変調セクションと8DPSK変調セクションを示す、EDRパケットのパワー対時間測定（*Bluetooth* EDRテストのために、この波形は、オプション205付きAgilent N4017Aグラフィカル測定アプリケーション（GMA）を使用しています）

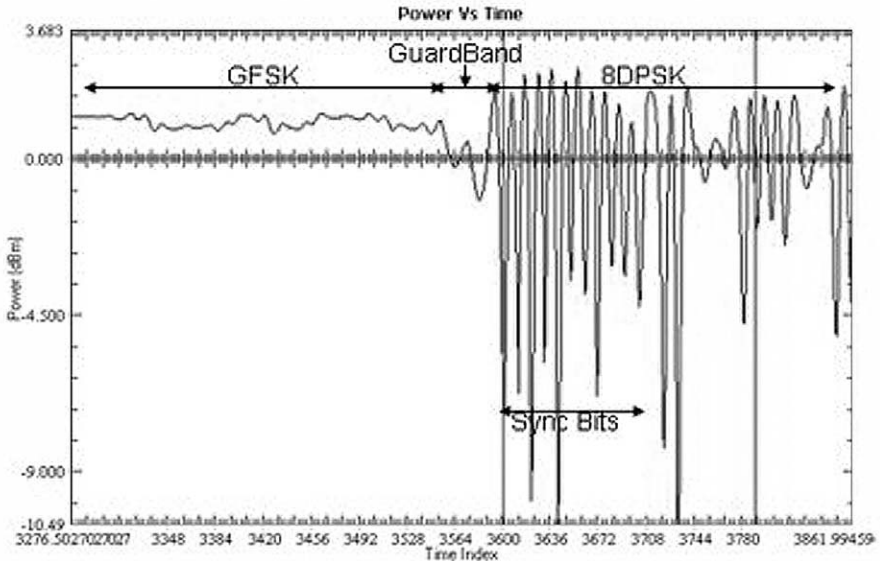


図5b. GFSK変調方式と8DPSK変調方式間の遷移を示すパワー対時間波形

2 Mb/s伝送に対して定義されたDPSK変調方式は、π/4DQPSK（π/4シフト差動四位相シフト・キーイング）です。差動位相変調信号には、搬送波位相を評価せずに信号を復調できるという利点があります。その代わりに、任意のシンボル時間の受信信号を、前のシンボルの位相と比較します [4]。位相偏移の量から、受信データを評価します。π/4DQPSKコンスタレーションは、互いを基準に45度だけオフセットされた2つのQPSKコンスタレーションの重ね合わせと考えることができます。各シンボル時間のシンボル位相が、一方のQPSKコンスタレーションと他方のQPSKコンスタレーションから交互に選択されます。結果として、連続するシンボルは、4つの角度±π/4と±3π/4のいずれかの相対位相差を持ちます。度単位では、これらの位相角度は、±45度と±135度です。4個の可能なコンスタレーション・ポイントにより、2ビット／シンボルの伝送レートとなります。このため、一般的なGFSK変調方式と比べてデータ・レートが2倍に増加します。1つのコンスタレーションから別のコンスタレーションへのシンボル偏移ではシンボル間に必ず位相の変化が生じるので、クロック・リカバリが容易になります [5]。

移動体アプリケーションで使用する場合、π/4DQPSK変調には、QPSK、OQPSK（オフセットQPSK）などの他のPSK変調に比べて複数の利点があります。π/4DQPSK方式では、差動検波器または弁別器とその後の積分／ダンプ・フィルタを用いた復調が可能です。これら2つの復調器タイプでは、コヒーレント検波が必要な復調器に比べて受信機アーキテクチャが簡単になります。また、π/4DQPSK波形の信号コンスタレーションにおける遷移は、原点を通過しないので、他のQPSK波形に比べてスペクトラム特性と消費電力が改善されます。図6に、*Bluetooth*パケットのEDR部分のπ/4DQPSKコンスタレーションを示します。1つのシンボル時間で、4個のコンスタレーション・ポイントまたは遷移だけを使用できます。この図は、互いを基準に45度だけ回転された2つの別のQPSKコンスタレーションの組み合わせを示しています。

3 Mb/s伝送用に定義された2番目のEDR変調方式は、8DPSK（8値差動位相シフト・キーイング）です。各シンボルに対してさらに4個のコンスタレーション・ポイントを追加することにより、データ・レートがさらに増加します。合計8個のコンスタレーション・ポイントにより3ビット／シンボルの伝送レートが可能なので、GFSK変調方式よりもデータ・レートが3倍向上します。このタイプの変調には、非コヒーレント復調方式など、π/4DQPSKと同じ利点が多くあります。8DPSKの復調を行うには、連続するシンボル間の相対位相差を調べます。位相角度は0、±π/4、±π/2、±3π/4、πです。データ・レートが増加しますがマイナス面もあります。8DPSK変調信号は、π/4DQPSK信号やGFSK信号と比べるとコンスタレーション・ポイント間の間隔が狭いので、ノイズの影響を受けやすくなります。また、原点を通る遷移が可能になるので、パワーアンプに優れたリニアリティが求められます。シンボル間のゼロ位相遷移が必要なステートがあると、π/4DQPSK復調器のようなクロック・リカバリの利点がなくなります。

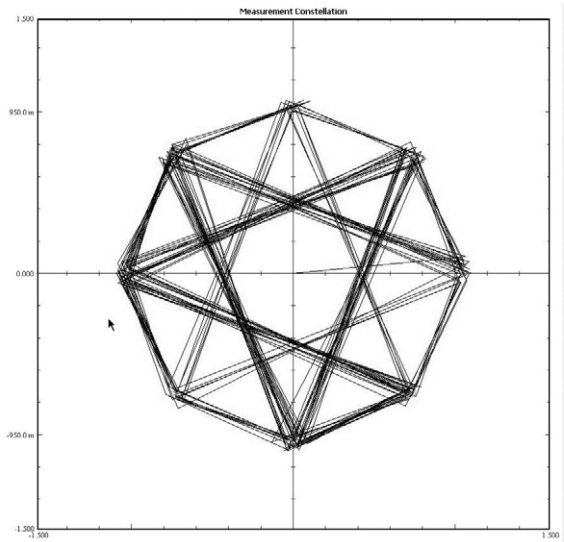


図6. π/4DQPSK変調を使用したEDRペイロードの実測コンスタレーション

EDRの新しいテスト手順

*Bluetooth*コア仕様にEDRが導入され、その他のEDR固有の測定が、RFレイヤのテスト手順と仕様（TSS/TP）に追加されました [2]。*Bluetooth* SIGでは、エア・インタフェースと*Bluetooth*デバイス間の相互運用性のコンフォーマンス・テストを提供するために、テスト仕様を作成しました。TSS/TPのRFテスト・ケースにより、非ループバック動作下での*Bluetooth*デバイスの暫定テストが可能になります。これは、無線機開発の初期段階で非常に有効です。送信機に固有のEDRテストとして、相対送信パワー、搬送波周波数安定度と変調精度、差動位相エンコードなどがあります。*Bluetooth*受信機固有のEDRテストには、EDR感度、EDRビット・エラー・レート（BER）フロア性能、EDR最大入力レベルがあります。

TSS/TP仕様では、各種テストの固有識別子を含む、TP（テスト目的）の用語が使用されています。例えば、TRMは送信機テストの識別子で、RCVは受信機テストの識別子です。CAは、主要デバイス機能のテストを識別するサブグループです。Cは、コンフォーマンス・テスト・タイプを示しています。TP番号を識別するための整数も含まれています。各関連セクションのTP識別子が示され、TSS/TPドキュメント内の追加情報を参照するために使用できます [2]。

測定は、ループバック・テスト・モードで*Bluetooth* EDR送受信テスト用のオプション107が搭載されたN4010A無線コネクティビティ・テスト・セットを使って行っています。測定結果は、N4010Aテスト・セットまたはオプション205付きのPCベースのN4017A *Bluetooth*グラフィカル測定アプリケーション（GMA）を使用して表示します。N4017A GMAには、N4010Aテスト・セットを直接制御する機能もあります。図7に、EDR対応*Bluetooth*無線機をテストするための代表的な測定構成を示します。この構成では、RF信号は、テスト機器と無線機間で同軸接続で送受信されます。無線テストの場合は、別の方法として、テスト・セットと無線機でアンテナを使用できます。N4010Aテスト・セットはN4017A GMAを使って制御され、無線機はPC内のデバイス・ドライバを使って制御されます。*Bluetooth* EDR送信機の測定例にはこの構成を使用します。

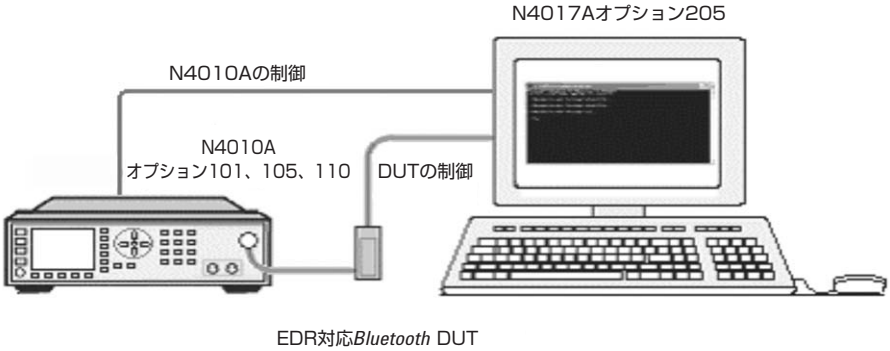


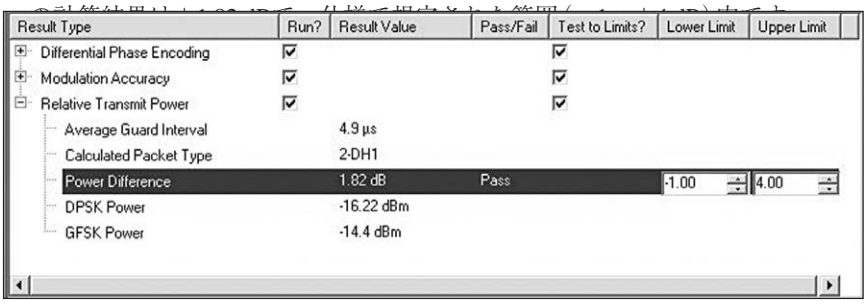
図7. Agilent N4010Aテスト・セットとN4017Aグラフィカル測定アプリケーションを使った*Bluetooth* EDR無線機のテスト構成

Bluetooth EDR送信機のテスト

Bluetooth EDR送信機テストでは、変調品質、搬送波周波数安定度、送信パケット内の各種コンポーネントのパワー・レベルを測定する必要があります。そのため、Agilent N4010Aテスト・セットなどのテスト機器には、EDR波形を復調し、DPSK信号の変調精度を測定するための機能が必要になります。*Bluetooth*送信機の開発時には、TSS/TPは、ループバック・テスト・モード、またはループバックを使用できない場合は、Tx（送信機）モードでの送信機性能のテストが必要です。オプション107搭載のAgilent N4010Aテスト・セットは、無線送信機のループバック・テスト用に構成されています。この場合、N4010Aテスト・セットは、EDRパケットをデバイスに送信し、PRBSシーケンスをEDRパケットに変調してテスト・セットに送り返すように*Bluetooth*送信機に命令します。次にテスト・セットが、バイナリ・シーケンスを復調し、送信されたEDR信号の変調精度と周波数安定度を測定します。測定例は、上の図7に示す機器構成で行っています。

EDR相対送信パワー（TRM/CA/10/C）

EDR相対送信パワーでは、GFSK変調時の平均送信パワーとDPSK変調時の平均送信パワーとの差が仕様のレンジ内にあることを検証します。*Bluetooth*コア仕様では、信号のGFSK部分の平均パワーは、DPSK信号の平均パワーから－1 dBと＋4 dBの間でなければなりません［1］。相対パワーを計算するには、DPSK部分の80パーセント以上で実行した平均パワー測定から、パケットのGFSK部分の80パーセント以上で実行した平均パワー測定を減算します。テスト条件は、送信機を最大出力パワーで動作させ、周波数ホッピングとホワイトニングをオフにすることです。測定は、ISMバンドの低／中／高周波で行います。これらの測定を、送信機の最小出力パワーを使って繰り返します。図8に、ミッドバンド周波数2441 MHzのRF搬送波によるπ/4DQPSK変調を使った、EDR信号の相対送信パワー測定を示します。図8に示すように、GFSK波形とπ/4DQPSK波形の平均パワー測定は、それぞれ－14.4 dBmと－16.22 dBmです。相対送信パワ



Result Type	Run?	Result Value	Pass/Fail	Test to Limits?	Lower Limit	Upper Limit
Differential Phase Encoding	☑			☑		
Modulation Accuracy	☑			☑		
Relative Transmit Power	☑			☑		
Average Guard Interval		4.9 µs				
Calculated Packet Type		2-DH1				
Power Difference		1.82 dB	Pass		-1.00	4.00
DPSK Power		-16.22 dBm				
GFSK Power		-14.4 dBm				

図8. π/4DQPSK変調を使ったEDRパケットの相対送信パワーの測定

EDR搬送波周波数安定度と変調精度（TRM/CA/11/C）

EDR搬送波周波数安定度テストでは、送信機のRF中心周波数搬送波の周波数安定度を検証します。EDR変調精度テストでは、差動変調の品質を検証します。テストの目的は、実際の差動受信機に対して問題を引き起こす誤差を明らかにすることです。変調精度は、DEVM（差動エラー・ベクトル振幅）測定を使ってテストします。DEVM測定は、他のデジタル通信システムで仕様化されている従来のEVM（エラー・ベクトル振幅）測定とほぼ同じです［5］。ベーシック・レートEVM測定では、理想信号と実際の受信信号間の誤差の大きさを測定します。*Bluetooth*コア仕様で定義されたDEVMでは、時間軸上で1シンボル離れた2つの受信信号間の誤差の大きさを測定します。誤差は、受信信号からすべてのリニア歪み（搬送波周波数ドリフトのトラッキングが含む）を除去した後に測定します。

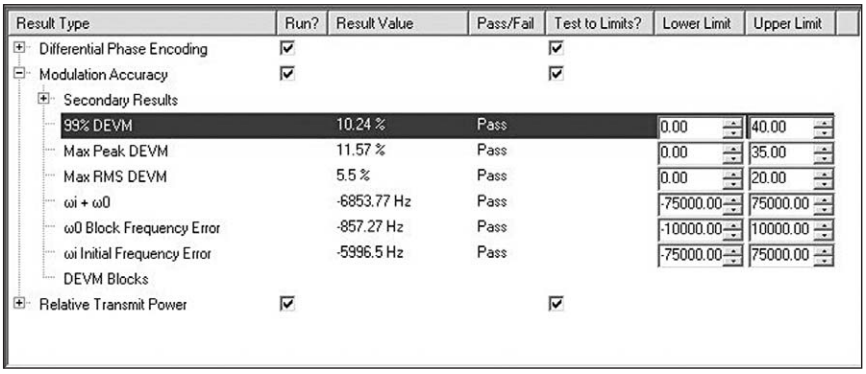
DEVM測定は、パケットの同期シーケンス部分とペイロード部分に対して行われます。テスト条件は、ホッピングとホワイトニングをオフにすることです。DEVM値を計算する前にサンプル・シーケンスを調整して、50個のシンボルから構成されるブロックの搬送波周波数ドリフトとサンプル・タイミング位相誤差を補正します。各搬送波周波数には、合計200個のオーバラップしないブロックが必要です。一定の周波数誤差以外の歪みのない送信機の場合は、差動誤差シーケンスはゼロになります。

変調精度は、3つの個別の値、99% DEVM、RMS DEVM、ピークDEVMとしてレポートされます。99% DEVMは、測定シンボルの99パーセントがπ/4DPSKの場合で0.3未満、8DPSKの場合で0.2未満となるDEVM値として定義されています。RMS値とピークDEVM値もこの同じ誤差シーケンスを使って計算されます。各ブロックの50個のシンボルに対してRMS DEVMを計算します。50個の差動誤差ベクトルを発生させるために、この計算にはブロックの直前のシンボルからの情報も含まれています。200個の測定ブロックに対するワーストケースRMS値が、RMS DEVMとしてレポートされます。π/4DQPSKと8DPSK変調方式のRMS DEVMの仕様はそれぞれ、最大値が0.2および0.13です。ピークDEVMは、測定ブロック内のすべてのシンボルに対するワーストケースDEVMとしてレポートされます。π/4DQPSKフォーマットと8DPSKフォーマットのピークDEVM測定リミットはそれぞれ0.35と0.25です。

表1に、2種類のEDR変調に対する3つのDEVM測定の仕様リミットを示します。表では、最大値が仕様リミットの％として示されています。図9に、π/4DQPSK変調を使用した*Bluetooth*パケットの変調精度を示します。このパケットの99％ DEVM値、ピークDEVM値、RMS DEVM値は、それぞれ10.24、11.57、5.5％として測定され、レポートされています。図に示すように、この波形のすべての実測DEVM値は、π/4DQPSK変調EDRパケット・タイプの必須仕様を満たしています。

表1. 最大DEVMリミット

DEVM測定	π/4DQPSK	8DPSK
99%	30%	20%
RMS	20%	13%
ピーク	35%	25%



Result Type	Run?	Result Value	Pass/Fail	Test to Limits?	Lower Limit	Upper Limit
Differential Phase Encoding	☑			☑		
Modulation Accuracy	☑			☑		
Secondary Results						
99% DEVM		10.24 %	Pass		0.00	40.00
Max Peak DEVM		11.57 %	Pass		0.00	35.00
Max RMS DEVM		5.5 %	Pass		0.00	20.00
ωi + ω0		-6853.77 Hz	Pass		-75000.00	75000.00
ω0 Block Frequency Error		-857.27 Hz	Pass		-10000.00	10000.00
ωi Initial Frequency Error		-5996.5 Hz	Pass		-75000.00	75000.00
DEVM Blocks						
Relative Transmit Power	☑			☑		

図9. *Bluetooth* EDRパケットのDEVM変調精度の測定。パケット全体に対する搬送波周波数安定度測定も表示されています。

周波数安定度の測定は、波形のGFSK部分とDPSK部分で行われます。テスト条件は、ホッピングとホワイトニングをオフにすることです。ペイロード・データは、PRBS9擬似ランダム・パターンを使用します。測定では最初に、符号間干渉の小さいビット・シーケンスを使ってGFSKヘッダの初期中心周波数誤差を求めます。ロジック1ビットとロジック0ビットの周波数偏移はそれぞれ、$\Delta\omega 1$と$\Delta\omega 2$として測定され、レポートされます。初期周波数誤差は、ロジック1ビットとロジック0ビット間の平均周波数誤差として計算され、初期周波数誤差ωi（$\omega i = [\Delta\omega 1 + \Delta\omega 2]/2$）としてレポートされます。初期周波数誤差の仕様は、±75 kHz内です。パケットのEDR部分の周波数誤差は、初期周波数誤差ωiを使って補正されます。補正済みの波形は、長さ50シンボルのブロックに分割されます。各ブロックの残りの周波数誤差が$\omega 0$としてレポートされます。測定が、200個のオーバラップしないブロックに対して連続して行われます。ワーストケース・ブロック周波数誤差$\omega 0$の仕様は、±10 kHz内です。*Bluetooth*仕様では、周波数誤差全体$\omega i + \omega 0$の最大値を±75 kHzに制限しています。この値は周波数誤差の最大偏差を表します。これには、アクセス・コードの初期誤差と、測定ブロックに対して発生する周波数ドリフトが含まれています。

図10に、EDRパケットのさまざまな部分に対する搬送波周波数の許容リミットを示します。±75 kHzの初期周波数誤差リミットは、パケットのアクセス・コード（GPSK）部分に対するものです。パケットの残りで、ヘッダ、同期、ペイロード、トレーラ・シンボルに対して初期誤差とブロック周波数誤差が補正され、リミットが±10 kHzに減少します。図には、誤差全体（最大偏差）のリミットも±75 kHzとして示しています。測定例として、EDR波形からの周波数安定度の結果が図9にも表形式で示されています。この場合、初期周波数安定度の測定値は−5.997 kHz、ブロック周波数誤差の測定値は−0.857 kHz、周波数誤差全体の測定値は−6.854 kHzです。これらの測定値はすべて、要求された仕様内です。

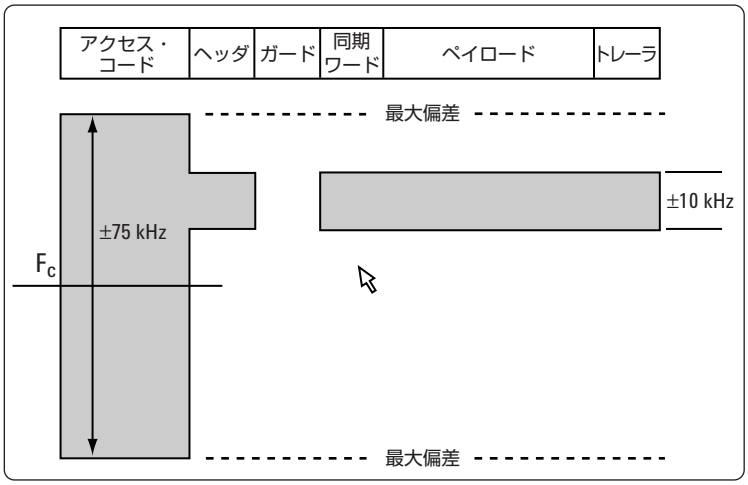


図10. シンボル位置の関数としての*Bluetooth* EDR搬送波周波数安定度のリミット

EDR差動位相エンコード（TRM/CA/12/C）

差動位相エンコード・テストでは、差動PSK変調器の動作を検証します。変調器には、EDRペイロードのバイナリ・データを、正しい位相角度にマッピングすることが求められます。テスト条件は、周波数ホッピングとホワイトニングをオフにし、送信機の出力パワー・レベルを最大値に設定することです。EDRペイロードがPRBS9シーケンスで変調され、100個のパケットに対してパケット・エラー・レートを測定します。

測定例として、Agilent N4010Aテスト・セットを使ってPRBS9ペイロードを復調し、テスト・セットまたはN4017Aソフトウェアを使って結果を表示します。図11に、N4017Aソフトウェアを使用した場合のπ/4DQPSK変調を使用したEDRパケットのパケット・エラー・レートを示します。この場合、ビット・エラーが検出されなかったので、パケット・エラー・レートは0パーセントです。N4017Aのデータ表示には、このテストの実測ビット数と関連するビット・エラー・レートも表示されます。1個のパケット・エラーがレポートされ、そのエラーがパケット内で発生する1個以上のビット・エラーに起因する場合は、ビット・エラー・レートから、復調パケットで発生するエラーの総数を示す追加情報も表示されます。

図11にガード・インターバルの測定も示します。この測定は、N4010AとN4017Aの両方で行えます。ガード・インターバルは、テスト中に測定されたすべてのパケットに対する最小値、最大値、平均値としてレポートされます。図11に示すように、100個のパケットに対して測定された平均ガード・インターバルは4.94 μsで、最小時間と最大時間はそれぞれ4.9 μsと5.0 μsです。

Result Type	Run?	Result Value	Pass/Fail	Test to Limits?	Lower Limit	Upper Limit
⊟ Differential Phase Encoding	☑			☑		
⊟ Secondary Results						
Min Guard Interval		4.9 µs				
Max Guard Interval		5 µs				
Average Guard Interval		4.94 µs				
⊟ Bit Error Rate		0 %				
Number of Bit Errors		0				
Number of Bits		43200				
⊟ Packet Error Rate		0 %	Pass		0.000000	1.000000
Number of Correct Packets		100				
Number of Packets		100				
⊞ Modulation Accuracy	☑			☑		
⊞ Relative Transmit Power	☑			☑		

図11. EDR波形のパケット・エラー・レートとビット・エラー・レートの測定

Bluetooth EDR受信機のテスト

Bluetooth EDR受信機テストでは、さまざまな周波数／タイミング劣化を含むテスト信号を使ってビット・エラー・レート（BER）性能を測定する必要があります。受信機のテストにダーティ・パケットを使用することにより、受信機は性能の低い送信機で動作します。こうした*Bluetooth*デザインのストレス・テストは通常、スループットや歩留まりの最適化に重点が置かれる量産ではなく、開発や統合段階で実行されます。TSS/TPは、受信機のテストにループバック・テスト・モードを使用するように命令しますが、テスト機器がループバック・テスト・モードに対応していない場合は、非ループバック・モードでの暫定テストを行ないます。オプション107搭載のN4010A無線コネクティビティ・テスト・セットでは、ループバック・テスト・モードは使用できません。テスト・セットがPRBSシーケンスをEDRパケットに変調し、被試験受信機がバイナリ・シーケンスを復調して、N4010Aテスト・セットに送り返します。次にテスト・セットは、受信したデータをテスト・セットが送信した元のPRBSシーケンスと比較して、受信機のBER性能を計算します。

EDR感度（RCV/CA/07/C）

受信機感度は、送信搬送波内のタイミング・エラーと周波数オフセットにより劣化したEDRパケットを使って測定します。これらのダーティ・パケットの条件は、*Bluetooth* TSS/TPドキュメント で仕様化されています [2]。テスト機器には、異なる信号劣化を含む20個のパケットから構成されたグループを3つ送信することが求められます[1]。第1グループのパケットには信号劣化は含まれていません。第2グループのパケットには、＋65 kHzの搬送波周波数オフセットと＋20 ppmのシンボル・タイミング・エラーが含まれています。第3グループのパケットには、－65 kHzの搬送波周波数オフセットと－20 ppmのシンボル・タイミング・エラーが含まれています。送信機で搬送波周波数安定度のワーストケース条件をシミュレートするには、同期した±10 kHzの正弦波を使用して、追加信号をDPSK同期ワードの先頭でEDRパケットに変調します。被試験デバイスが1,600,000ビットのデータを受信し、テスト・セットに送り返すまで、パケット・グループを繰り返します。

次にテスト・セットは、受信したデータを送信したPRBS9シーケンスと比較して、BERを計算します。BERが7×10^{-5}より大きい場合は、16,000,000パケットが返されるまで、テスト機器はパケットを送り続けます。16,000,000パケット受信後のBER性能は、1×10^{-4}でなければなりません。

1 オプション107搭載のN4010A無線コネクティビティ・テスト・セットは、EDR感度テスト用の信号劣化には対応していません。この機能は、今後のリリースでは無料で提供される予定です。

EDR BERフロア性能（RCV/CA/08/C）

受信機のフロア性能とは、受信パワー・レベルが－60 dBmのときのBERの指標です。このテストでは、実際の送信機と受信機間の物理的な距離が長いか、特定の見通せない動作条件にあるときの受信機性能をシミュレートします。例えば、最大仕様パワー・レベル＋20 dBmを送信可能なパワー・クラス1の*Bluetooth*送信機を使用したときに受信信号が－60 dBmであると、100 mの距離に相当する80 dBの理想自由空間損失があることを表します［6］。BERフロア性能測定では、テスト機器は、出力パワー・レベルが－60 dBmのPRBS9ペイロードを使ってπ/4DQPSKまたは8DPSK変調信号を送信する必要があります。受信機は、データ・シーケンスを復調してテスト・セットに送り返します。8,000,000ビットを受信すると、受信したデータと送信したPRBS9シーケンスを比較してBERが計算され、7×10^{-6}と比較されます。計算されたBERがこの値より大きい場合は、160,000,000ビット以上を受信するまでパケットがさらに送信されます。160,000,000ビット受信後に低／中／高の搬送波周波数で測定されたBER性能は、1×10^{-5}でなければなりません。

EDR最大入力レベル（RCV/CA/08/C）

最大入力レベル・テストでは、入力信号レベルが－20 dBmのときの受信機のBER性能を求めます。このテストでは、高入力パワー・レベルでドライブされ、フロントエンドが圧縮した状態の受信機性能を求めます。この測定では、テスト機器が出力パワー・レベル－20 dBmのPRBS9ペイロードを使ってπ/4DQPSKまたは8DPSK変調信号を送信する必要があります。受信機は、1,600,000ビットがテスト・セットに返されるまでデータ・シーケンスを復調して送り返します。その後、BERを計算するために、受信データを送信PRBS9シーケンスと比較します。低／中／高の搬送波周波数で測定されたBER性能の仕様は、1×10^{-3}です。

Bluetooth EDRの今後の動向

データ・レートの高速化、消費電力の改善、音声／ビデオ・ストリーミングなどのマルチメディア・アプリケーションに対する需要の高まりで、EDR対応デバイスへの移行が加速されることが期待されています。EDRの進化により、多数のデバイスが同じピコネット上で同時に動作できるようになり、パーソナル・エリア・ネットワークの概念が引き続き広がりを見せています。さらに、新しいポータブル・デバイスでは、複数のネットワークに対してシームレスな同時コネクティビティを提供するために、GPRS、WiFiなどのいくつかの無線インタフェースが*Bluetooth* EDRと組み合わされることが予想されています。

*Bluetooth*パーソナル・エリア・ネットワークの概念は、自動車の遠隔計測にも拡大しています。自動車関連のテレマティックとは、無線通信、自動運転補助、リモート診断、GPSナビゲーションを統合することです。調査によれば、携帯電話使用の20～30％は運転中に行われ、工場取り付け*Bluetooth*ハードウェアが2008年に2200万台に達すると予測されています。自動車メーカが携帯電話を直接自動車に設置する必要がなくなります。また、*Bluetooth*を使用することにより、自動車のオーディオ・システムを無線リンクでユーザが選択した携帯電話に接続することができます。さらに、ポータブル・ナビゲーション・デバイス、MP3デバイス、WANデバイスを、EDR対応デバイスで可能な高速データ・レートを使って自動車環境に統合することもできます。

Bluetooth v2.0＋EDRは、近距離テクノロジーの進化の1ステップにすぎません。2005年5月、*Bluetooth* SIGは、超広帯域（UWB）テクノロジーを必須機能として*Bluetooth*仕様に統合することを発表しました。UWBの追加により、*Bluetooth*が、ビデオの高品質ストリーミングや無線デバイス間の大量のデータ送信に対する今後の業界の要望に対応できるようになります。*Bluetooth* SIGは現在、v2.0＋EDRおよび前のバージョンのデバイスとの互換性を保持しながら、UWBを次世代システムに組み込むための詳細について作業を行っているところです。

付録A：記号と略語

8DPSK	8-ary differential encoded phase shift keying（8値差動位相シフト・キーイング）
ACL	Asynchronous connectionless link（非同期コネクションレス・リンク）
AFH	Adaptive frequency hopping（適応周波数ホッピング）
BER	Bit error rate（ビット・エラー・レート）
C	コンフォーマンス・テスト・タイプを示す識別子
CA	主要デバイスの機能を示す識別子
CRC	Cyclic redundancy check（巡回冗長検査）
dB	デシベル
dBc	搬送波周波数を基準としたデシベル
dBm	1mWを基準としたデシベル（10log（power/1mW））
DEVM	Differential error vector magnitude（差動エラー・ベクトル振幅）
DPSK	Differential phase shift keying（差動位相シフト・キーイング）
DSSS	Direct sequence spread spectrum（直接シーケンス・スペクトラム拡散）
eSCO	Extended SCO（拡張SCO）
EDR	Enhanced data rate（エンハンスド・データ・レート）
EVM	Error vector magnitude（エラー・ベクトル振幅）
FCC	Federal Communications Commission（米国連邦通信委員会 ）
FEC	Forward error correction（誤り訂正）
FHSS	Frequency hopping spread spectrum（周波数ホッピング・スペクトラム拡散）
GFSK	Gaussian frequency shift keying（ガウシアン周波数シフト・キーイング）
GMA	Graphical measurement application（グラフィカル測定アプリケーション）
GPRS	General Packet Radio Service（汎用パケット無線システム）
GPS	Global positioning system（全地球測位システム）
Hz	Hertzまたはサイクル/s
ISM	Industrial, Scientific, and Medical（産業、科学、医療用無線バンド）
L2CAP	Logical link control and adaptation（論理リンク制御／適合）
LAN	Local area network（ローカル・エリア・ネットワーク）
LC	Link control（リンク制御）
LM	Link manager（リンク・マネージャ）
MP3	Audio Layer-3圧縮方式
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing（直交周波数分割多重化）
OQPSK	Offset QPSK（オフセットQPSK）
PAN	Personal area network（パーソナル・エリア・ネットワーク）
PDA	Personal digital assistant（パーソナル携帯情報端末）
π/4DQPSK	π/4 rotated differential encoded quaternary phase shift keying（π/4差動四位相シフト・キーイング）
PRBS	Pseudo random bit sequence（擬似ランダム・ビット・シーケンス）
PSK	Phase shift keying（位相シフト・キーイング）
QPSK	Quaternary phase shift keying（四位相シフト・キーイング）
RCV	Receiver tests（受信機テスト）
RF	Radio frequency（無線周波数）
SCO	Synchronous connection-oriented link（同期コネクション指向リンク）
SIG	*Bluetooth* Special Interest Group
TP	Test purposes（テスト目的）
TRM	Transmitter tests（送信機テスト）
TSS/TP	Test suite structure and test purposes（テスト・スイート構造およびテスト目的）
TDD	Time division duplex（時分割デュプレックス）
UWB	Ultra wide band（超広帯域）
WAN	Wide area network（広域通信網）
WiFi	IEEE 802.11に基づいたWireless fidelity無線テクノロジー

付録B：リファレンス

［1］Specification of the Bluetooth System, Version 2.0＋EDR, Specification Volume 1 Architecture & Terminology Overview & Volume 2 Core System Package, November 4, 2004

［2］Radio Frequency Test Suite Structure（TSS）and Test Purposes（TP）System Specification 1.2/2.0/2.0＋EDR, March 21, 2005, Rev. 2.0.E.3, Document Number RFTS/2.0.E.3

［3］Philips Semiconductors White Paper, “How 802.11b/g WLAN and Bluetooth Can Play Together” Document 9397-750-13426, June 2004

［4］J.G. Proakis, “Digital Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill,1995, pg 274-275

［5］Digital Modulation in Communications Systems - An Introduction Agilent Application Note 1298, 5965-7160E, March 14, 2001

［6］J.G. Proakis, “Digital Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill,1995, pg 317

サポート、サービス、およびアシスタンス

アジレント・テクノロジーが、サービスおよびサポートにおいてお約束できることは明確です。リスクを最小限に抑え、さまざまな問題の解決を図りながら、お客様の利益を最大限に高めることにあります。アジレント・テクノロジーは、お客様が納得できる計測機能の提供、お客様のニーズに応じたサポート体制の確立に努めています。アジレント・テクノロジーの多種多様なサポート・リソースとサービスを利用すれば、用途に合ったアジレント・テクノロジーの製品を選択し、製品を十分に活用することができます。アジレント・テクノロジーのすべての測定器およびシステムには、グローバル保証が付いています。アジレント・テクノロジーのサポート政策全体を貫く2つの理念が、「アジレント・テクノロジーのプロミス」と「お客様のアドバンテージ」です。

アジレント・テクノロジーのプロミス

お客様が新たに製品の購入をお考えの時、アジレント・テクノロジーの経験豊富なテスト・エンジニアが現実的な性能や実用的な製品の推奨を含む製品情報をお届けします。お客様がアジレント・テクノロジーの製品をお使いになる時、アジレント・テクノロジーは製品が約束どおりの性能を発揮することを保証します。それらは以下のようなことです。

- 機器が正しく動作するか動作確認を行います。
- 機器操作のサポートを行います。
- データシートに載っている基本的な測定に係わるアシストを提供します。
- セルフヘルプ・ツールの提供。
- 世界中のアジレント・テクノロジー・サービス・センタでサービスが受けられるグローバル保証。

お客様のアドバンテージ

お客様は、アジレント・テクノロジーが提供する多様な専門的テストおよび測定サービスを利用することができます。こうしたサービスは、お客様それぞれの技術的ニーズおよびビジネス・ニーズに応じて購入することが可能です。お客様は、設計、システム統合、プロジェクト管理、その他の専門的なサービスのほか、校正、追加料金によるアップグレード、保証期間終了後の修理、オンサイトの教育およびトレーニングなどのサービスを購入することにより、問題を効率良く解決して、市場のきびしい競争に勝ち抜くことができます。世界各地の経験豊富なアジレント・テクノロジーのエンジニアが、お客様の生産性の向上、設備投資の回収率の最大化、製品の測定確度の維持をお手伝いします。

電子計測UPDATE

www.agilent.co.jp/find/emailupdates-Japan
Agilentからの最新情報を記載した電子メールを無料でお送りします。

Agilent Direct

www.agilent.co.jp/find/agilentdirect
測定器ソリューションを迅速に選択して、使用できます。

Agilent Open

www.agilent.co.jp/find/open
Agilentは、テスト・システムの接続とプログラミングのプロセスを簡素化することにより、電子製品の設計、検証、製造に携わるエンジニアを支援します。Agilentの広範囲のシステム対応測定器、オープン・インダストリ・ソフトウェア、PC標準I/O、ワールドワイドのサポートは、テスト・システムの開発を加速します。

アジレント・テクノロジー株式会社
本社〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口
受付時間 9:00-19:00（土・日・祭日を除く）
FAX、E-mail、Webは24時間受け付けています。

TEL ■■ 0120-421-345
(042-656-7832)
FAX ■■ 0120-421-678
(042-656-7840)
Email contact_japan@agilent.com

電子計測ホームページ
www.agilent.co.jp

● 記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2006
アジレント・テクノロジー株式会社

Agilent Technologies

September 19, 2006
5989-4204JAJP
0000-00DEP