Bluetooth® 製造テスト 入門ガイド

Application Note 1333-4

Agilent Technologies

このアプリケーション・ノートは、*Bluetooth*無線技術を使用した製品の製造を計画しているデザイン・エンジニア、テスト・エンジニア、管理者のために作成されたものです。本書は、異なるレベルの技術的スキルと知識を持つ読者を対象にしているため、無線周波数（RF）技術に対して特別な知識は必要ありません。本書に記載されている内容をさらに深く掘り下げたい読者のために、付録に追加の参考文献が記載されています。

目次

1. はじめに 3
2. *Bluetooth*製造の概要 4
   2.1 製造環境 4
   2.2 大量のテスト 4
   2.3 低コスト化 4
   2.4 テストを行う理由 5
3. テスト・プロセス 6
   3.1 事業戦略と手法の検討 6
   3.2 製造テスト・プロセス 7
4. *Bluetooth*テスト・プランの因子 8
   4.1 テスト・プラン作成における因子 8
   4.2 *Bluetooth*の製造ステージ 9
   4.3 テスト・プランの要素 10
   4.4 製造チェーンでの製品のテスト 10
   4.5 テスト・プランの調査 10
5. *Bluetooth*テスト 11
   5.1 送信機テスト 11
   5.2 EDR送信機テスト 13
   5.3 受信機テスト 13
   5.4 EDR受信機テスト 14
   5.5 その他の*Bluetooth*テスト 14
   5.6 *Bluetooth*テストの優先度 14
6. テスト・プランの作成 15
   6.1 *Bluetooth*規格およびEDRテストの統合 15
   6.2 *Bluetooth* 2.0 EDRデバイスのためのテスト・プランの選択 15
   6.3 *Bluetooth* 1.2デバイスのためのテスト・プランの選択 16
   6.4 周波数ホッピング 16
   6.5 変調方式 17
   6.6 テストの順序 17
   6.7 テスト・パラメータ 17
   6.8 BER測定 18
   6.9 ファンクション・テスト 18
7. その他の重要な製造上の問題 19
付録A：測定セットアップ 20
付録B：*Bluetooth*無線機のトポロジー 21
付録C：テスト・ライン・リミット 22
付録D：*Bluetooth*無線テクノロジーのためのAgilentのソリューション 24
付録E：参考資料 25

1. はじめに

*Bluetooth*は、コンピュータ、ラップトップ、携帯情報端末（PDA）、デジタル・カメラ、携帯電話、無線ヘッドセットなど広範な電子デバイスを無線接続するという画期的な技術です。パーソナル分野のネットワークは現在、ケーブルやコネクタを使わずに、最小限のネットワーク管理だけでアドホック・ベースまたは半永久的に構築できます。

*Bluetooth*は、2.4 GHz ISM（産業、科学、医療用）帯域を占有しますが、この帯域は、無線スペクトラムの免許が不要で、電子レンジや他のRF技術によりますます過密になっています。この帯域でもっともよく知られているのは、IEEE 802.11bです。ISM帯域が広く用いられるにつれて、無線干渉が増加するのは間違いありません。これに対処するため、*Bluetooth*はいくつかの革新的な技術を用いて、安定したリンクを提供できるようにしています。これらの技術には、巡回冗長エンコーディング、デ―タ・パケットの再送信、1秒あたり最大1600回の周波数ホッピングなどがあります。*Bluetooth*デバイスは、*Bluetooth* 1.2規格では最高1 Mb/sのデータ・レート、*Bluetooth* 2.0規格では最高3 Mb/sのデータ・レートを実現しています。*Bluetooth*はもともと、ケーブルに代わるものとして作成されたものですが、それ以上のものとなってしまいました。ユ―ザは、職場や家庭でますます無線機能を求めるようになっています。

エンジニアにデザインやテストの制約が課されなければ、製品化される*Bluetooth*対応製品のテスト・システムを構築することは容易です。しかし、現実の世界では、製品のサイズ、（商品化に要する時間に影響を与える）スループット、コストなどの問題に対処する必要があります。アプリケーションに対して効率的で費用効果の高いテスト・システムとテスト・プランを作成するには、これらの問題に取り組み、自社が採用する事業戦略を知ることが必要です。

このアプリケーション・ノートでは、まず*Bluetooth*の製造環境を紹介します。次に、テストを行う根拠を数多く例証し、上位レベルのビジネス上の検討事項について述べ、*Bluetooth*テスト・プランの作成方法について順を追って紹介します。付録には、テスト方法と条件、*Bluetooth*無線機デザインの意味するもの、重要な製造課題、*Bluetooth*テストに関するアジレント製品の説明などが記載されています。本書に記載されている原理と手順を学び、これを用途に合わせてカスタマイズすることにより、お客様の会社、製品、目標市場にもっとも適したテスト・プランを立てることができます。

製品開発とテストに役立てていただくために、*Bluetooth* SIGが、公式*Bluetooth* Webサイト**www.bluetooth.com**を管理しています。このサイトは定期的に更新され、新しい有用な情報を提供しています。Agilent自身の*Bluetooth* Webサイトは、**www.agilent.com/find/bluetooth**にあり、技術情報と製品カタログの両方を提供しています。様々な記事、プレス・リリース、アプリケーション・ノートなどの情報もこのWebサイトで入手することができます。

2. *Bluetooth*製造の概要

*Bluetooth*は、製造メーカにとっては大きな挑戦です。*Bluetooth*には、有線システムにはない無線媒体としてのRFの複雑さと問題が含まれています。*Bluetooth*は、無線周辺機器からLANや携帯電話に至るまで様々な形で販売されています。市場の現実は、ほとんどの*Bluetooth*デバイスを、大量かつ低コストで製造することを要求しています。これらの因子はすべて、製造のみならずテストの手法についても明らかに影響を与えることになるでしょう。

2.1 製造環境

*Bluetooth*を製品に付加するには、いくつかの方法を利用することができます。

1. 最初から*Bluetooth*機能を含む全体の設計を行う。
2. *Bluetooth*のIC/チップを購入してこれを製品に組み込むようデザインする。
3. 他のベンダが既に製造し既にテストした*Bluetooth*モジュールを取り付ける。
4. *Bluetooth*機能付きのハードウェアを購入し、独自のデザインを補って完全なものにする。

テストの観点からは、これらのアプローチにはかなりの共通部分があります。*Bluetooth*モジュールを製造していようと、*Bluetooth*機能を備えたより大きなサブアセンブリを製造していようと、エンド・ユーザ向けのフル機能製品を製造していようと、デバイス検証やデザインと性能の予想を含めて、テストに関する同じ問題のうちの多くのものを適用できます。どの案を選択したらよいかを断言することは不可能です。これは、スケール・メリット、外部製品の可用性、プロセス・エラーの可能性と種類、RFに関する専門知識のレベルなど多くの因子によって異なるためです。

2.2 大量のテスト

量産品については、*Bluetooth*デバイス・テストの自動化を強力に検討すべきです。テスト接続を自動的に行うことができるように、自動化には通常カスタム・フィクスチャと高度な部品操作システムの開発が必要になります。量産テストの第1の成功因子は、短いテスト時間（すなわち高スループット）であり、妥当な目標は、製造ユニットあたり10秒未満です。少量生産品については、（自動テストあり／なしの）手動接続にしてもよいでしょう。この場合結果を出すのに数秒ではなく1～2分かかります。

大量のテストを行う際にもう1つの決定すべき事柄は、シングルサイト（同時に1個）で製品をテストするのか、マルチサイト（同時に複数個）で製品をテストするのかということです。マルチサイトでは、テストをシーケンシャルに行うのかパラレルに行うのかという問題が生じます。量産品の場合は、いくつかの被試験デバイス（DUT）を同時にテスト・ステーションに置き、ほとんどいつもマルチサイトでテストされます。これらをパラレルでテストする場合にはより複雑なフィクスチャが必要になります。またシーケンシャル・テストを行う場合には、必要なリソースは少なくなりますが、より多くの校正が必要となり、スイッチングが複雑になります。もう1つの検討事項は、テスト・ステーションで扱う製品やフィクスチャの種類と汎用性です。すなわち、将来様々な種類と複雑さを持つ製品が現れて、テスト環境にいっそうのストレスを与えるようになるのか、それとも製品が現在とほとんど変わらないままであるのかという問題です。

要約すると、テスト・システムとテスト・スイートが時間的要件を満たし、品質目標と利益目標をサポートした場合に、そのテスト・システムとテスト・スイートが成功であると考えることができるのです。

2.3 低コスト化

ある製品を製造するには､製品を組み立てるための部品とプロセスの両方が必要です。

ある製品の製造目標は、利益目標とバランスする必要があります。そのためには、製品あたりの製造コストが、製品の価格よりも十分に低くなるように努力する必要があります。利益については、部品、製造プロセス、テスト、そして顧客サポート（返品、修理、保証など）にかかるコストを考慮に入れなくてはなりません。

デザイン・エンジニアやテスト・エンジニアは、これらの大半についてほとんど何もできません。しかし、テスト・コストを極力抑えることによって製造コストを最小にすることは、変わることのない第1の目標です。もちろんこれは、製品品質の信頼性とバランスのとれたものでなくてはなりません。

2.4 テストを行う理由

*Bluetooth*製品をテストしなくてはならない理由は数多くありますが、主なものを以下に挙げます。

2.4.1 製品機能の完成

*Bluetooth*製品は、製品の動作を制御する複雑なソフトウェアを備えた高度なRF通信デバイスです。ソフトウェアの1つの要素は「プロトコル・スタック」で、これは通常製造中にダウンロードされます。例えば製品ごとに一意の*Bluetooth*識別子などの「ソフトな」コンポーネントも機能を完成するのに必要なものです。このソフトウェアは、製造プロセス中のテスト・アプローチ全体にもっとも有効な時点でインストールする必要があります。

2.4.2 コンポーネントまたはサブシステムの調整

*Bluetooth*などの通信システムは通常完全なユニットとして稼働させる前に、出力周波数の確度を高めるための水晶調整、バッテリの寿命を長くするための出力パワーの調整、仕様に合わせるためのパワー・ステップの調整、受信信号強度の校正などのコンポーネントまたはサブシステムを調整する必要があります。これらはすべて、全体のRFリンク特性を動的に調整するもので、これがなければユニットは現場で正しく稼働することができません。

2.4.3 性能検証

*Bluetooth*システムは、ある時点で*Bluetooth*の仕様に適合しているかどうかを測定する必要があります。そのためには、どのようなテストが必要かをメーカが決める必要があります。これにより、*Bluetooth*デバイスを柔軟にテストできます。しかし*Bluetooth*デバイスのテストは、そのデザインが*Bluetooth*の標準を満たすような高い信頼性が必要です。測定されるパラメータには、変調精度、感度、パワー出力、そして様々なスペクトル測定などがあります。テストは、全体的な品質（プロセスと部品）の信頼度とともに、当該製品が高い信頼性を持ち、正しい動作レンジを持ち、顧客を満足させることを保証するのに役立つものでなくてはなりません。

2.4.4 プライマリ・ユース・ケース

電子製品が、少なくても顧客が使おうとするように動作すること、すなわち「プライマリ・ユース・ケース」を検証することは、その製品の最終的な成功にとって極めて重要です。*Bluetooth*対応製品の場合、このことは当該製品がマスタ・ユニットとして、スレーブ・ユニットとして、またはその両方としての通常の役割でピコネット（相互接続した2～8個の*Bluetooth*デバイス）に参加しなくてはならないことを意味します。これはまた、*Bluetooth*対応製品は、ピコネット内において完全に機能し、期待通りに動作するということです。全体の性能を検証するには、フル・ファンクション・テスト（このうちの多くは非*Bluetooth*）を行うしかありません。

2.4.5 部品不良およびプロセス・エラーの選別

部品不良とプロセス・エラーの選別とは、部品変更が原因の性能異常、コンポーネントの長期にわたるドリフト、プロセス許容値のエラーなどによるデバイス不良を識別することです。不良がコンポーネントの供給メーカ（およびその特定のプロセスの偏差）によるものであっても、その責任は製造テスト・エンジニアにあります。これらの不良に対しては対策を講じて取り除かなくてはなりません。

2.4.6 品質保証

品質保証テストは以下の目的で行われます。

- 製造プロセスの品質管理と改善。これには、データ収集や統計的プロセス管理を含みます。
- テスト・プランの仮定を確認し、新しい相関関係を導き出すための相関性能の継続的な検証。
- 製品が*Bluetooth*標準またはFCC/ETSI規制に準拠しているかどうかについての継続検証。

テストを行う理由の最後4つ、すなわち性能検証、製品機能、部品とプロセスの不良、品質保証は、前述したコスト最小化プロセスを推進するものです。最初の2つ、すなわち製品機能の完成と製品の調整は、部品組み立てプロセスに似た価値を付加するという点で、「テスト」プロセスと考えられます。たとえば不良選別は、より高い品質レベルへ移行することのできる部品またはプロセスなので、常に一時的なものと見なすべきです。品質保証にはいくつかの方法がありますが、1つはフル・サンプリング・テストであり、製造ラインの中または外で行われます。これは、すべてのプロセス、部品、設計が正常に制御されていることを保証するために行われます。

3. テスト・プロセス

3.1 事業戦略と手法の検討

戦略目標と事業目標は、「製造プロセス」で行われるすべてのものに影響を与えます。したがって、事業環境と目標を十分に理解することは、テスト・システムとプロセスを作成する上での前提条件となります。事業環境はそれぞれが独自のものであるため、ここでは詳細に論じません。

しかし、ほとんどのデザイン・エンジニアとテスト・エンジニアは、いくつかの共通因子を考えるでしょう。製品の種類、目標市場、部品の自動化、テスト時間、テスト予算、生産量、床面積、意思決定支援のためのデータ処理、顧客サービスのためのデータ処理、オペレータ要件（ユーザインタフェース、人間工学、安全など）、会社のインフラ、事業目的と目標などです。

これらの各因子は、テスト・エンジニアに対しては言うまでもなく、テスト環境やプロセスに対しても制約を与えます。例えば、量産が必要な一般的なデバイスを販売している会社の場合には、テスト速度が最優先事項となります。装置のコストが重要事項である場合は、機能とテスト・コストの兼ね合いが鍵となります。信頼性の高い性能が重要事項である場合は、証明できるテスト性能が目標となります。これらの目標のうちもっとも一般的で重要なものは、速度とコストです。

3.2 製造テスト・プロセス

図1は、上位レベルでの製造テスト・プロセスのフローを示したものです。この図は、複雑なテスト・プロセスを理解し、より詳細な事項へ移行するためのスタート地点を提供します。この図には、部品が投入され、接続され、テストされ、（ベンチマークとの比較で）検証され、次にテスト結果がデータベースに保存された後で出荷されるという工場レベルでの発生事項が示されています。この方法でテスト・プロセスに取りかかった場合、最初の目標であるテスト・プランやテスト・ステーションのデザインだけでなく、テスト・ステーションまでの製品の搬入、テスト・ステーションとの相互接続の方法（図にはありません）、仕様との比較、データ保管、製品出荷なども検討する必要があります。この図では、テスト・プランはさらに製品の電源投入、初期化、校正、パラメトリック／ファンクション・テストにまで拡張されています。製品の校正と測定についての検討課題は、テスト・システム全体の主要な決定因子となります。表に明示されてませんが、暗示されているものとして、テスト・ステーションのデザイン、ソフトウェア・ドライバ、フィクスチャなどのテスト環境の問題があります。

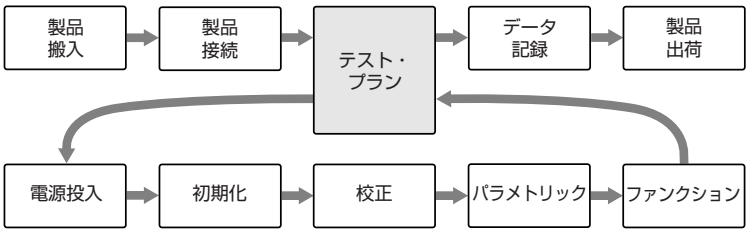

図1. 製造テスト・プロセスの概要

3.2.1 テスト・システムへの製品接続（フィクスチャの作成）

テスト・システムには、スティミュラス／レスポンス測定器とサポート部品（ケーブル、インタフェース、スイッチなど）が含まれているため、DUTをシステムに接続する機構が必要です。これがテスト・フィクスチャです。製品の複雑さおよび機能によって、フィクスチャは非常に単純なものであったり、テスト・システム自体と同じぐらい高度なものであったりします。フィクスチャのデザインは、2つの因子によって決定されます。第1の因子は入出力（IO）です。電源、制御、RF信号にはIO接続が必要です。第2の因子はスループットです。ここでは、テストをマルチアップ法で行うかどうかの決定が鍵となります。スイッチングがテスト・ステーションまたはフィクスチャにあるかどうか、接続速度、自動または手動送り、IOライン間のアイソレーション、フィクスチャ保守などの問題が、この決定に影響を与えます。

メーカにとって、製造ラインのテスト・セットアップ内の損失係数を認識しておく必要があります。高レベルの損失があるとテスト結果に影響を与えるため、損失に対する補正が必要になります。RFケーブル・コネクタは約2 dBの損失があり、他の損失があると、製造歩留まりが大幅に減少します。

量産時に一般的に使用される別のセットアップでは、RFリンクを使用してデバイスをテストします。このときテスト環境内の干渉が原因で、問題が発生する場合があります。このため、テスト・ケージを適切にシールドしてテスタとテスト・セットとの間で適切なRFリンクを確立する必要があります。このセットアップではRicianチャネルをモデル化するので、テスト中に干渉が発生しますが、通常の動作環境では、Ricianチャネルはデバイスが正常に動作する干渉です。

3.2.3 結果比較

各テストの数値結果と事前に決められたテスト・ライン・リミット（TLL）とを比較して、合否のテスト判断が行われます。TLLは、テスト・プランの一部と考えられます。これは独立したプロセスで設定されるため、別に説明します（付録C）。TLLを設定するプロセスでは、製造統計、必要な歩留まり、測定の不確かさ、温度または湿度に対する変動などのデザイン特性が考慮されます。

4. *Bluetooth*テスト・プランの要素

顧客は、レンジ、転送速度、動作の信頼性など観点から*Bluetooth*製品の性能を判定します。製造中に最適化テストを行うことにより、顧客の期待が満たされることを保証することができます。このセクションでは、製造中に実行できるテストの範囲を決定し、その重要性の評価方法とそのテストを実行する際の最良の条件を議論します。これらのテストの多くはテスト・モードで実行できます。このモードでは、RFまたはホスト・コントローラ・インタフェース（HCI）で*Bluetooth*デバイスを初期化／制御します。

4.1 テスト・プラン作成における要素

ここまでは、主に工場の視点からテスト・プロセスを説明してきましたが、テストは、長期にわたる開発プロセスの到達点に過ぎません。図2は、効果的なテスト・プランの作成と実施に影響を与える因子を示しています。

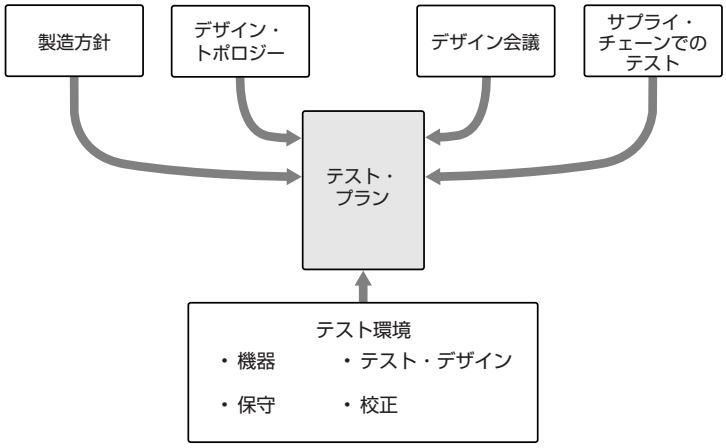

図2. *Bluetooth*テスト・プランの作成と実施に必要な因子

図2は、テスト・プランが、幅広い製造方針と戦略、デザイン・トポロジー、能力、制限、コンポーネントの特性、そしてテストされるパラメータとサプライ・チェーンに至るまでのテスト・カバレッジとの間の相関に基づいていることを示しています。詳細に検討すると、どの製品やテスト環境も、歩留まり、測定の不確かさ、スループットなどとのトレートオフが潜在的に存在し、全体の望ましい結果をサポートしていることが明らかになります。インフラ、フィクスチャの作成法、複数のDUTテストの使用または不使用、サンプリングの厳密性などのテスト環境における特定の要素もテスト・プランに影響を与えます。これらの分野で意思決定を行うのに十分な情報を得るのに、繰り返し実験を行う必要がある場合もあります。

4.2 *Bluetooth*の製造ステージ

*Bluetooth*の製造テスト全体は主に5つのステージがあります。テストのスタート地点は、製品やテストのステージによって異なります。

1. 電源投入

テストの最初のステージで、電源を供給して電流ドレイン、接続のための出力ラインのインテグリティ、重大な回路故障をチェックします。

2. 初期化

このステージには*Bluetooth*チップ制御用のファームウェアのロード、*Bluetooth*アドレスおよびDUT機能の設定があります。通常チップセット・ベンダからの制御ソフトウェアで初期化します。プロトコル・スタックを検証することが製造テストの目的ではありませんが、デバイスが適切に動作するようにロードされることが必要です。量産環境では多くの場合、*Bluetooth*アドレスは製造テストの最後に書き直され、一意のアドレスの被試験デバイスになります。

3. 校正

このステージではチップの水晶発振器のチューニングとパワー校正を行います。これらの校正は、N4010A無線コネクティビティ・テスト・セットとチップ制御ソフトウェアを組み合せて行います。設定内容をデバイス・メモリに永久保存するために、校正後にリセットが必要なデバイスもあります。このステージのテストとしてRSSI校正およびIQ変調器の校正が含まれる場合があります。

4. パラメトリック・テスト

このステージが*Bluetooth*製造テストの主要部分です。デバイス間でのデータ送信を可能にするために、リンクの確立／維持に重要なパラメトリック測定により被試験デバイスを検証します。検証が必要なデバイスの動作により、テスト手法が異なります。

5. ファンクション・テスト

ファンクション・テストにより、*Bluetooth*デバイスの適切な動作をシミュレートし、検証することができます。オーディオおよびプログラム可能なIOポートなどのさまざまな機能をテストできます。

4.3 テスト・プランの要素

量産環境でのテスト・プランの目標は、可能な限り短時間で*Bluetooth*デバイスの弱点をテストすることです。EDR（拡張データ・レート）の登場によって、*Bluetooth*チップがさらに複雑になったため、高速で効率の良いテストの必要性が高まっています。理想的なテスト・プランとは、最短時間で実装でき、*Bluetooth*チップ・デザインのあらゆる側面に対応してデバイスが適切に動作することを確認できるプランです。

4.4 製造チェーンでの製品のテスト

*Bluetooth*デバイスは、チップ・ファンダリから完全に統合されたデバイスまで、さまざまな製造ステージでテストされます。サプライ・チェーンで、さらにテストが実行されることをメーカが知っている場合は、そのデザインに対する複雑なテストを回避することもできます。例えば、チップ・メーカはデバイスの全機能をテストするのではなく、基本ICレベルの不具合にテスト範囲を絞るべきです。デバイス製造のさまざまなレベルでテストが実行されるので、水晶発振器、キャパシタ、プロトコル・ソフトウェアなどの新しい要素がシステムに搭載される際に、*Bluetooth*デバイスがテストされます。デバイスが適切に動作することが重要なので、前のステージで実行されたテストに関係なく、すべての校正テストを実行する必要があります。

テストはさまざまな製造ステージで行われるので、冗長になります。チップセット・デザインが部分的に性能を保証する場合も、冗長なテストとなります。冗長なテストを削除すれば、製造テスト時間を短縮できます。

4.5 テスト・プランの調査

主要なシリコン・ベンダのチップを使用する場合、テスト・プランを構築する前にデータ・シートを調査しておくと役に立ちます。チップセットのデータ・シートは、デザインの利点や弱点を判断でき、製造環境のデバイスのリミット値をテストする際に重要な情報が得られます。テスト・プランを組み立てる前に、包括的なテストを複数の*Bluetooth*デバイスに対して行い、テスト中にデバイスに与える影響の一般的な傾向を知ることも重要です。包括的なテストは、表1に示す*Bluetooth* SIGで定義されたテスト仕様のテストから検討すると楽になります。

表1. この表は、Agilent N4010A無線コネクティビティ・テスト・セットで実行可能な*Bluetooth*テスト仕様に準拠したすべてのテストのセットアップです。

テスト	パケット／ビット	チャネル／ホッピング	パワー・レベル	パケット・タイプ
EDR相対送信パワー	1	L、M、H		2-DH1
EDR差動位相エンコード	100	L、M、H		2-DH1
EDR CFSMA	4	L、M、H		2-DH5
EDR BERフロア性能	8,000,000	L、M、H	−60	2-DH5
EDR最大入力レベル	1,600,000	L、M、H	−20	2-DH5
EDR感度	1,600,000	L、M、H	−70	2-DH5
出力パワー	1	ホッピング	−40	DH5
パワー制御	1	L、M、H	−40	DH1
変調特性	10	L、M、H	−40	DH5
ICFT	10	ホッピング	−40	DH1
搬送波ドリフト	10	ホッピング	−40	DH135
シングル・スロット感度	1,600,000	ホッピング	−70	DH1
マルチ・スロット感度	1,600,000	ホッピング	−70	DH5
最大入力パワー・レベル	1,600,000	L、M、H	−20	DH1

テスト・プランの作成前にデバイスをテストする別の方法として、図3のAgilent N4017A グラフィカル測定アプリケーションなどのテスト・プログラムを使用する方法があります。他のツールを使用して*Bluetooth*デバイスの特性を測定することも可能です。例えば、Agilent ESAスペクトラム・アナライザやAgilent 89601Aベクトル・シグナル・アナライザなどのソフトウェア・ツールがあります。

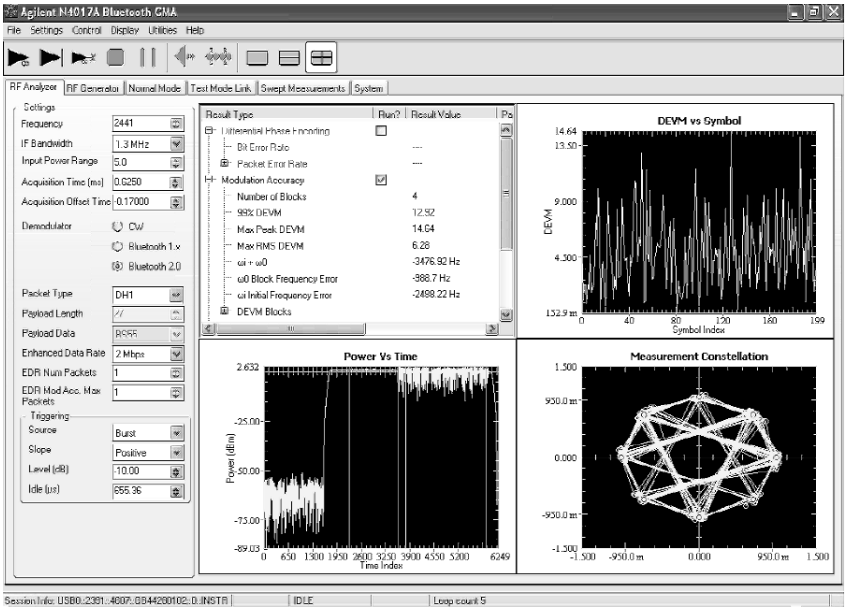

図3. Agilent N4017A GMAでの*Bluetooth* EDR波形の表示

包括的なテストが完了すると、結果が解析されてデバイス間のどこに主な違いが生じているかが表示されます。すべての被試験デバイスが同様の結果を示す場合は、チップ・デザインに共通の利点と弱点をテストでき、デザインの効率的なテスト・プランを作成できます。テスト・プランの各テストはセクション4の製造テスト・リストから選択できます。この表は、デザインの既知の弱点とどのようなテストが適しているかの判断に便利です。

5. *Bluetooth*テスト

*Bluetooth*デバイスはさまざまなパーツで作られているので、どの領域のテストをするかによって、その領域に最適なテストを選択します。このセクションでは、*Bluetooth* SIGがバージョン2.0＋EDRのテスト仕様で定義しているすべてのテスト・ケースのリストを説明します。各テストに対して、その機能の簡単な説明とテストされる*Bluetooth*デバイスの対応項目を示します。各テスト内容が詳細に説明されているので、テスト・プランの作成に便利です。付録Bに*Bluetooth*デバイスのダイアグラムがあります。

5.1 送信機テスト

TRM/CA/01/C：出力パワー

*Bluetooth*パケットをテストしてバーストの最大／平均パワー・レベルを求めます。このテストは高速に実行でき、送信機パワーの情報を収集します。リンク・バジェット／バッテリ寿命／故障発生率に影響を与える重要な回路部分であるパワーアンプの動作をチェックできます。ホッピング信号を使用してテストするので、ホッピング回路もチェックできます。メイン・テスト・シーケンスの前にパワー調整を行う場合は、この出力パワー・テストを代わりに使用できます。

TRM/CA/02/C：パワー密度

100 kHz帯域幅測定を実行することにより、パワー密度を周波数ドメインでテストします。パワーアンプ／変調器／ホッピング回路をテストします。パワー密度テストは実行に時間がかかるので、テスト・プランへの採用には適していません。

TRM/CA/03/C：パワー制御

パワー・レベルとパワー制御のステップ・サイズが仕様レンジ内に入るように、パワー制御の校正をテストします。デバイスがパワー制御をサポートしていない場合は、このテストを実装する必要はありません。パワーアンプの制御は、バッテリ寿命のテストに必要です。

TRM/CA/04/C：周波数レンジ

周波数レンジをテストするために、*Bluetooth*スペクトラムの最大および最小バンドでパワー密度をテストします。テストの対象範囲はデバイスのホッピング・シンセサイザと水晶のチューニングです。－20 dB帯域幅または変調指数テストと項目が同じなので、これらの代わりにこのテストを使用できます。

TRM/CA/05/C：－20 dB帯域幅

デバイスの帯域幅をテストします。出力スペクトラムの－20 dBポイントを測定します。波形が合格するには、－20 dBポイントは標準の*Bluetooth*では1 MHz以内、EDRでは1.5 MHz以内であることが必要です。このテストは*Bluetooth* RFテスト仕様の標準動作に対してのみ仕様化されていますが、EDR波形のテストにも適しています。このテストはチップ・テストでも使用できますが、変調器の品質制御にも適しています。

TRM/CA/06/C：隣接パワー帯域幅

このテストは、テスト送信が実行されるチャネルの隣接チャネル内のパワーを測定します。帯域外送信用の変調器をチェックできます。デザインのチェックにも適していますが、テストに時間がかかります。製造環境では、代わりにスペクトラムのサンプルを取得してテスト時間を短縮することができます。

TRM/CA/07/C：変調特性

このテストは信号の周波数偏移をテストします。波形の変調品質に対するテストなので、製造テスト・プランのもっとも重要なテストの1つです。変調品質が低いと、感度が低下します。変調品質が高いと、スペクトラム拡散が小さくなります。このテストで対応できる回路は、変調前のフィルタおよび変調器の性能です。また、局部発振器回路の安定度もチェックできます。

TRM/CA/08/C：初期搬送波周波数の許容値

送信機の搬送波周波数の確度を検証します。送信バースト機能およびシンセサイザのセトリング時間もテストできます。このテストで回路内の水晶発振器の確度をチェックできます。

TRM/CA/09/C：搬送波周波数ドリフト

このテストは、パケット送信の中心周波数のドリフトをチェック／検証します。アナログ・ デザインでは、周波数ドリフトが大きく変動する場合があり、このテストが重要になります。IQ変調器を使用したデジタル・システムの場合は、デザイン上、チップは搬送波周波数のドリフトの影響を受けません。しかし、外部回路から電圧がプリングされる場合は、搬送波周波数に影響が出ることがあります。

5.2 EDR送信機テスト

TRM/CA/10/C：EDR相対送信パワー

このテストでは2種類の変調方式のパワー分布の違いをチェックします。パワー制御／増幅器回路および異なる変調間のスイッチングをテストします。

TRM/CA/11/C：EDR搬送波周波数の安定度と確度

このテストは変調精度と周波数安定度が、テスト仕様で設定したリミット値に入っているかをチェックします。デバイスの変調品質全体をテストする場合に適しています。シンボル間干渉からの影響がなくなり、デバイス評価に最適です。このテストを使用して水晶発振器の確度もテストできます。

TRM/CA/12/C：EDR差動位相エンコード

このテストでは、*Bluetooth*チップ内の変調器が確実かつ適切にデータをエンコードしているかを評価します。このテストは、製造現場でのデザイン検証でよく使用されますが、チップ・デザインの特定の項目のチェックに適しています。

TRM/CA/13/C：EDR 帯域内スプリアス・エミッション

*Bluetooth*チップからの不要な信号が、使用されている変調方式によつて決まるリミット値を超えていないかをテストします。チップ内の変調器およびフィルタをテストします。

5.3 受信機テスト

RCV/CA/01/C：シングルスロット感度

このテストは、ワンスロット・パケット送信時の最大許容BER（ビット・エラー・レベル）を得るために必要な最小信号レベルを求めます。このテストは環境内の雑音によって制限されるので、製造テストの構築時にテスト条件を考慮する必要があります。受信機の変調器性能および信号受信用のホッピング回路をテストします。

RCV/CA/02/C：マルチスロット感度

RCV/CA/02/Cは、マルチスロット・パケット送信時の最大許容BERレベルを発生させるのに必要な最小信号レベルをテストします。シングルとマルチスロット感度テストは類似していて、送信パケットの数のみが異なります。シングルとマルチパケット・テストの結果に大きな違いがある場合は、テスト・プラン用としていずれか一方のテストのみを選択します。一般的にマルチスロット・テストはより多くの不良結果が生じるので、より適切な品質管理を行うにはマルチスロット・テストを使用します。

RCV/CA/03/C：C/I（Carrier to. Interference：搬送波対干渉雑音）性能

C/I性能は、受信信号に対して*Bluetooth*信号を同時に同一チャネルまたは隣接チャネルに送信した後、受信機のBERを測定します。テスト対象はフィルタおよび変調器回路です。多くの機器が必要なので、複雑なテストの1つです。テスト構成が複雑になるので、このテストが製造テストで使用されることは通常ありません。感度測定と似ているので、C/I性能テストの代わりに感度測定が使用される場合があります。

RCV/CA/04/C：ブロッキング性能

このテストは、連続干渉波を送信して受信機のブロッキング性能を測定します。C/I性能テストと類似したセットアップを使用する複雑な測定です。受信機のブロッキング性能は無線機のデザインで保証されるので、製造環境ではこのテストは推奨しません。

RCV/CA/05/C：相互変調性能

このテストでは、非線形デバイスを通過する複数の信号の相互作用に起因する不適切な周波数成分を測定します。この特性はデバイスのデザインで保証されるので、製造環境ではこのテストは推奨しません。

RCV/CA/06/C：最大入力レベル

このテストは入力信号が最大パワー・レベルに設定されているときの受信機のBER性能を測定します。動作時にデバイスの基本機能が過負荷状態にならない場合は、テスト・プランにこのテストを含めてはいけません。テストは高速なので、最大パワーに関する問題がある場合はテスト・プランに含めます。

5.4 EDR受信機テスト

RCV/CA/07/C：EDR感度

この測定ではBERの最大値を得るために必要な最小信号レベルをテストします。このテストは環境内の雑音によって制限されるので、製造テストの構築時にテスト条件に注意する必要があります。EDR信号用のフィルタおよび変調器の性能をテストします。

RCV/CA/08/C：EDR BERフロア性能

このテストは通常のテスト条件で、受信機がBERの最大リミット値を超えないことを検証します。一般的なエラー条件に対して受信機回路をテストするので、EDRデバイスの標準的な動作に対する最適なテストです。ファンクション・テストが製造テストで実施される場合、このテストは不要です。

RCV/CA/09/C：EDR C/I性能

このテストは標準のC/I 性能テストと似ています。同一および隣接チャネルの干渉がどのように信号に影響を与えるかをテストします。さまざまな複数の機器が必要なので、この測定は複雑です。また、感度テストでもチップの同じ項目をテストします。そのため、このテストは、製造 テスト・プランの一部として推奨しません。

RCV/CA/10/C：EDR最大入力レベル

このテストは標準の*Bluetooth*の最大入力レベル・テストと似ています。入力信号が最大パワー・レベルのときの受信機のBER性能を測定します。

5.5 その他の*Bluetooth*テスト

Bluetooth SIGテスト仕様で規定されていないテストにEDRガードバンド測定があります。これはガードバンド時間が4.75～5.25 μsに収まっていることをチェックする重要な測定です。ガードバンドは*Bluetooth*デバイスが標準のGFSK変調方式からEDR変調方式への切り替えるための時間です。他のEDR テストと同時に実行できるので、測定時間が延びることはありません。

5.6 *Bluetooth*テストの優先度

表2は、23種類すべての*Bluetooth* SIGクオリフィケーション・テストとその優先度を高、中、低で示しています。この優先度は、製造環境テストでの一般的な必要性と有用性の指標になります。このリストを、テスト・プランを開発するためのガイドとしてご使用ください。各テストの詳しい説明はセクション5を参照してください。付録Cに、各テストに必要なテスト機器が記載されています。

表2. 製造テストの優先度

*Bluetooth*テストの種類	優先度
TRM/CA/01/C：出力パワー	高
TRM/CA/02/C：パワー密度	低
TRM/CA/03/C：パワー制御	中/低
TRM/CA/04/C：周波数レンジ	低
TRM/CA/05/C：−20 dB帯域幅	中
TRM/CA/06/C：隣接パワー帯域幅	低
TRM/CA/07/C：変調特性	高
TRM/CA/08/C：初期搬送波周波数の許容値	高
TRM/CA/09/C：搬送波周波数ドリフト	高
TRM/CA/10/C：EDR相対送信パワー	高
TRM/CA/11/C：EDR搬送波周波数の安定度と変調精度	高
TRM/CA/12/C：EDR差動位相エンコード	高
TRM/CA/13/C：EDR帯域内スプリアス・エミッション	低
RCV/CA/01/C：シングルスロット感度	高
RCV/CA/02/C：マルチスロット感度	高
RCV/CA/03/C：搬送波/干渉性能	中
RCV/CA/04/C：ブロッキング性能	低
RCV/CA/05/C：相互変調性能	低
RCV/CA/06/C：最大入力レベル	中
RCV/CA/07/C：EDR感度	高
RCV/CA/08/C：EDR BERフロア性能プラン	高
RCV/CA/09/C：EDR C/I性能	中
RCV/CA/10/C：EDR 最大入力レベル	中

6. テスト・プランの作成

6.1 *Bluetooth*規格およびEDRテストの統合

*Bluetooth*デバイスをテストする際、チップの異なる項目をテストする必要があり、EDRと標準の*Bluetooth* 1.2の両方に対してテストします。8種類の*Bluetooth* EDRテストではホッピングのテストを行わないので、標準の*Bluetooth*テストで*Bluetooth*デバイスのホッピングに関するテストを行います。EDRデバイスのテスト時に、標準の*Bluetooth*モードとオーバラップするテストがあります。つまり、1つのテストで、*Bluetooth* 2.0規格で規定された3種類すべての変調方式をチェックできます。セクション5に、*Bluetooth* SIGの各認定テストの説明があります。製造テスト・プランに含めるテストを説明に基づいて選択できます。

6.2 *Bluetooth* 2.0 EDRデバイスのためのテスト・プランの選択

テスト・プランは*Bluetooth*デバイスのデザインによって異なります。下の表3は*Bluetooth* 2.0 デバイスの製造テスト・プランの例です。このテスト・プランでは、可能な限り高速に*Bluetooth*チップの主な機能ブロックすべてをテストすることが目的です。

表3. *Bluetooth* EDRテスト・プランの例

テスト	パケット／ビット	チャネル／ホッピング	パワー・レベル	パケット・タイプ
EDR相対送信パワー	1	L、M、H		2-DH1
EDR差動位相エンコード				
EDR CFSMA	1	L		2-DH1
EDR BERロア性能	300,000	M	−60	2-DH1
EDR最大入力レベル				
EDR感度				
出力パワー				
パワー制御				
変調特性				
ICFT	1	ホッピング	−40	DH1
搬送波ドリフト				
シングルスロット感度				
マルチスロット感度	10,000	ホッピング	−70	DH5
最大入力パワー・レベル				

テスト・プランを構築する場合は、テスト範囲が広いEDRテストを最初に選択し、テスト・プラン内の抜けを標準の*Bluetooth* 1.2から選択します。

EDR相対送信パワーではパワーアンプおよび変調方式間の切り替えの有効性をテストします。このテストはEDRの重要なテストなので、ほとんどのテスト・プランに含まれています。

EDR搬送波周波数の安定度と変調精度では、水晶発振器と復調器をテストします。

ホッピング回路もテストする必要がありますが、EDRテストにはホッピングは含まれていません。このため、4種類の標準の*Bluetooth* 1.2送信機テストから1つを選択してホッピング回路をテストします。この4種類のテストとは、出力パワー、パワー密度、ICFT、搬送波周波数ドリフトです。どのテストにするかを決める際に、デバイスのどのパーツの故障が最も発生しやすいかを理解しておくことが重要です。詳細は、セクション5を参照してください。各テストを実行することは有用ですが、EDRテストとオーバラップするテストもあり、どのテストを行うか慎重に選択してください。

受信機回路はEDR BERフロア性能テストまたはEDR感度テストのいずれかによってテストされます。しかし、EDR受信機テストではホッピングをオンにしてテストしないので、標準の*Bluetooth*テストを含めて、受信機のホッピング回路のテストが必要です。受信機のホッピングをチェックする標準的なテストは、シングルまたはマルチ感度テストです。上記のテスト・プランの例では、マルチスロット感度テストが選択されています。EDR感度テストは、標準の*Bluetooth* 1.2 感度テストと似ているため、選択されていません。

6.3 *Bluetooth* 1.2デバイスのためのテスト・プランの選択

EDR機能を使用しない標準の*Bluetooth* 1.2デバイスをテストする場合は、15種類のテストから選択します。

この15種類のテストのうち、6種類のテストの優先度が高くなっています。この6つのテストを下記に示します。これらすべてのテストをAgilent N4010A無線コネクティビティ・テスト・セットで実行することができます。テストの優先度は、表2を参照してください。

表4. 標準の*Bluetooth* 1.2用のテスト・プランの例

テスト	パケット／ビット	チャネル／ホッピング	パワー・レベル	パケット・タイプ
出力パワー	1	ホッピング	−40	DH1
変調特性	5	M	−40	DH1
ICFT	1	ホッピング	−40	DH1
搬送波ドリフト	5	M	−40	DH1
シングルスロット感度				
マルチスロット感度	10,000	ホッピング	−70	DH5

表4は、EDRを使用しない標準の*Bluetooth*デバイス用の一般的なテスト・プランの例です。このテストは*Bluetooth*デバイスの主な部分すべてを短時間にテストできるようにデザインされているので、テスト・プランの参考にしてください。各テストをカスタマイズする際には、テスト変数に注意してください。各テストの詳細は、セクション5を参照してください。

6.4 周波数ホッピング

Bluetooth 2.0デバイスで使用されるすべての変調方式で周波数ホッピングが採用されています。周波数ホッピングの効果は、変調方式のスペクトラム密度を広げられることです。このためスペクトラム測定への影響は明らかです。

すべてのEDRテストおよびほとんどの*Bluetooth* 1.2テストは、周波数ホッピングをオフにして行います。オフにするのは、チップの特定の部分が適切に動作することを保証するためです。このため、周波数ホッピングを含むテストを行ってRFシンセサイザをテストすることが推奨します。

*Bluetooth*システムの周波数ホッピングは、ホッピング・レートがシンボル・レートよりも低いので、低速ホッピング・システムとして定義されています。この低速ホッピングにより、デバイスはスペクトラムを80 MHzのレンジに渡って拡散できます。つまり、信号がスペクトラムのフル・レンジに対してフェール・オーバすることが難しくなります。ホッピングがオンの場合は、パワー対チャネル測定により、図4に示すように、テスト・プランの構築時にどのチャネルをテストすれば良いのかの指標が提供されています。周波数特性がフラットでないため、周波数応答は常に変動しています。テストの目的のために、最大および最小の変動があるチャネルをテスト・チャネルとして選択します。

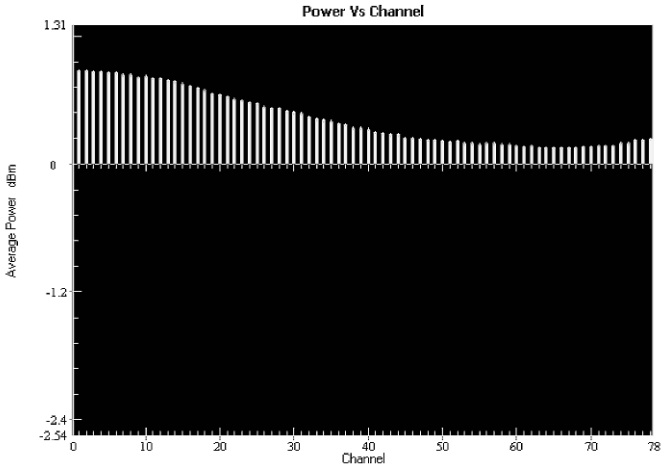

図4. Agilent N4017A GMAによるパワー対チャネルのグラフの表示

6.5 変調方式

Bluetooth 2.0 EDR規格では2種類の変調方式が新たに採用されました。この2種類はπ/4 DQPSKと8DPSKで、標準のGFSK変調方式に追加されました。この変調方式の追加により、チップ・デザインはさらに複雑化しました。GFSK変調とは異なり、π/4 DQPSKおよび8DPSKは送信エンベロープが一定でないため、これらの方式は非線形性の影響が現われます。*Bluetooth* SIGはこの新しい変調方式に対応するために8種類のテストを2.0のテスト仕様で新たに定義しました。

EDRテストで使用される変調方式は、被試験デバイスによって異なります。*Bluetooth*規格では8DPSK変調方式を*Bluetooth*規格に対するオプションの拡張として定義しているので、製造するデバイスがこの方式をサポートしている場合のみ、テスト・プランで使用します。両方の変調方式がサポートされている場合は、最高データ・レートを備えた8DPSK変調方式を使用します。8DPSKを使用して、テストに合格すれば、他の変調方式でも機能するはずです。

6.6 テストの順序

テスト・プランのテストを選択した後、テストする順序を決定する必要があります。理想的なテスト・プランでは、不具合検出率が高いと予想されるテストを最初に行います。不具合のある*Bluetooth*デバイスを製造ラインから除去して、次のテストを実行することで時間を節約するためです。

テストの順序を決める際に考慮すべきもう1つのことは、共通の信号を使用して、同時に測定できるテストです。例えば、出力パワーと変調特性は、Agilent N4010Aテスト・セットを使用して同時に測定できます。可能な限り複数のテストを同時に実行することにより、製造プロセスの時間を大幅に削減することができます。

6.7 テスト・パラメータ

個々のテストが決まると、テスト・パラメータを選択します。テスト・パラメータはテスト時間を大幅に変化させる重要な要素です。テスト時間に影響を与える主な因子はテストで処理されるビット数またはパケット数です。*Bluetooth*クオリフィケーション・テストでは、1つのテストで処理されるビット数は最大8百万ビットです。処理に時間がかかり過ぎるため、8百万ビットの使用は製造環境では現実的ではありません。

製造テストでは、テストとテスト結果のデバイス情報の信頼性との間でバランスをとることが重要です。パラメータを計画する場合は、デバイスに対する調査を再確認して弱点を認識することが重要です。デザインのある部分の不良率が高い場合は、デザイン・プランのこの段階で詳細にテストする必要があるためです。テスト・プランでビット数を減らす場合は、テストのパラメータも変更して可能な限り正確な結果を得るようにします（テスト・ライン・リミット（TLL）については付録Cを参照）。

使用するパケット・タイプを決める際に、プラン内の各テストを個別に検討する必要があります。最高速の送信時間が達成されることを確認するために、多くの場合、ワンスロット・パケットがテストで使用されます。

ホッピング・スイッチをオフでテストをする場合は、標準的な方法として*Bluetooth*バンドの最低、中間、最高の周波数でテストします。それぞれ、2402、2441、2480 MHzです。製造テスト・プランでは、最も多くのエラーが発生すると予想されるバンドをこの中から1つ選択して、テストするのが一般的です。

6.8 BER測定

受信機回路のテストでは、品質の主な指標はBERです。BERはデザインから動作環境までの多くの問題の影響を受けます。テスト・プランのパラメータを選択する際に、データによって発生するエラー・レベルが異なるので、パケットで送信されるデータ・タイプを知っておくことが重要です。このため、*Bluetooth*テスト仕様のクオリフィケーション・テストで使用するデータ負荷と同じものを使用するのが最適です。

BERは送信精度の統計的な解析で、サンプリングされるビット数によって結果が大きく異なります。製造テストの計画時にこれが大きな問題となり、テスト時間とテスト結果の確度との間でバランスを取るのが困難になります。適切にデザインされた*Bluetooth*チップにも、BERの原因となるランダム雑音は常に存在します。これらのエラーはランダムなので、BERの合格レベルを変更せずにテストするビット数を減少させることは困難です。

比率を使用して、*Bluetooth* SIGのBERテスト・パラメータを減少させて測定時間を短縮するメーカもあります。この手法はBER低減手法の中で最も基本的なもので、エラーの原因でもあります。他の複雑なBER テスト時間の短縮手法を使用して、より高確度の測定も行えます。この手法では下の式を利用します。この式により、しきい値の通過率がわかります。エラーが少ない場合はデバイスがテストに迅速に合格し、デバイスが不合格のしきい値に近い場合はより多くのビットでテストして正確に結果を得ることができます。これらのリミット値は製造プログラムに書き込むことができ、Agilent N4010Aテスト・セットなどのテスト・セットを使用して測定できます。

$$N = \frac{1}{BER}\left[-\ln(1-CL) + ln\left(\sum_{k-0}^{E}\frac{(N\,X\,BER)^k}{k!}\right)\right]$$

この式を使用して、適切に送信されるビット数から合格として設定するBERレベルを求めます。この式はコンピュータを使って解くことができます。Eはエラー値を求める際のエラー・ビットの総計です。データにエラーがない場合は、第2項は0となって式が大幅に単純になります。Nはシステムが送信するビット数です。Kはエラー数のレンジで式の第2項が何回計算されるかを決定します。CLは、テスト結果の適切さを％で示すテストの信頼度レベルです。以下の式は信頼度レベルを計算する式です：

$$CL = \mathrm{PROB}\,[BER_T < R]\ （E\ と\ N\ が与えられた場合）$$

この式は送信済みのBER_TがBERリミット値のRよりも小さくなる確率です。テスト時のデバイスの適切な信頼度レベルはメーカの責任で選択します。

6.9 ファンクション・テスト

ファンクション・テストを使用して、データ・リンク接続からオーディオ品質テストをテストします。ファンクション・テストを決定する際に、テスト・エンジニアがデバイスの主な機能を認識していれば、適切なテストをテスト・プランに盛り込むことができます。また、ファンクション・テストを構築してデバイス動作をシミュレートできます。多くのシンプルなファンクション・テストはBluetooth SIGテスト・ケースの対象になっており、一般に追加のファンクション・テストは必要ありません。データ接続およびオーディオ・ファンクション・テストのセットアップ情報は付録1に記載されています。

7. その他の重要な製造上の問題

テスト・プランを選択した後、製造エンジニアはテスト・システム全体のデザインに必要なテスト機器を決定します。ほとんどの*Bluetooth*の校正および製造テストは、N4010Aテスト・セットを使用して行えますが、スペクトラム・アナライザおよびパワー・メータなどの測定器が必要なテストもあります。テスト・エンジニアが責任を持って、システムをデザインし、テスト・ニーズに最適な機器を選択します（*Bluetooth*クオリフィケーション・テスト用のAgilentの測定器リストは、付録Cを参照してください）。

製造中にデバイスがテストに合格しない場合は、製造ライン以外でより包括的なテスト・プランを実行してください。この2次テストでは、故障箇所を見つけるためにデバイスを総合的にテストします。故障箇所を検出した後、デバイスを修理して、量産テスト・ラインの初めに戻します。

付録A：測定セットアップ

このアプリケーション・ノートでカバーする*Bluetooth* SIG テストの詳細については、アプリケーション・ノート1331-1「*Bluetooth* Measurement Fundamentals」を参照してください。この付録では、製造時に実施する、*Bluetooth* SIGで詳細に定義されていない一般的なテストおよび校正の測定セットアップを説明しています。

校正テスト

多くはベンダ固有のものですが、さまざまな校正テストがあります。下記に、最も一般的な2つのパラメータの校正手法を説明します。

水晶のチューニング

適切な周波数で送信するようにデバイスの動作周波数を設定するために、水晶のチューニングは回路動作に不可欠です。これは、N4010Aテスト・セットを使用して実行します。N4010AをRFアナライザ・モードに設定し、周波数オフセットと平均パワーを測定します。

パワー校正

パワー校正は、水晶のチューニングと同様に、N4010AテストセットをRFアナライザ・モードに設定して使用します。

ファンクション・テストのセットアップ

データおよびオーディオ接続を行うには、HCIループバックによる方法とオーディオ・プロファイルを使用する方法の2つの方法があります。オーディオ接続は同期接続オリエンティッド（SOC）ステートで確立されます。データおよびオーディオ・ルーティングはHCIループバックを使用してN4010A テスト・セットで確立できます。このモードがオンの場合は、*Bluetooth*デバイスのオーディオ品質は、オーディオ・アナライザ・プログラムを使用してテストできます。図5に示すように、テスト・セットアップはテスト・モード用の標準の*Bluetooth*のテスト・セットアップと似ています。

N4010A *Bluetooth*テスト・セットには2種類のHCIループバック・モードがあります。ローカル・ループバックでは、ホスト・コントローラでデータを変えることなく、任意のデータおよびコマンド・パケットをデバイスに送信して戻します。このテストにより、*Bluetooth*デバイスのオーディオ・インタフェースをチェックできます。リモート・ループバックは送信されるすべてのデータを戻して送信し、アナログ信号は復元されません。このため、信号はDUTによってのみ劣化します。

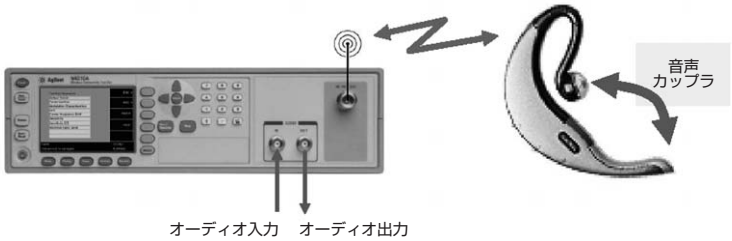

図5. HCIループバックを使用するBTオーディオ・テスト

*Bluetooth*オーディオをテストするもう1つの方法は、手順を記述したプロファイルを使用する方法です。このプロファイル・テストのセットアップを図6に示します。

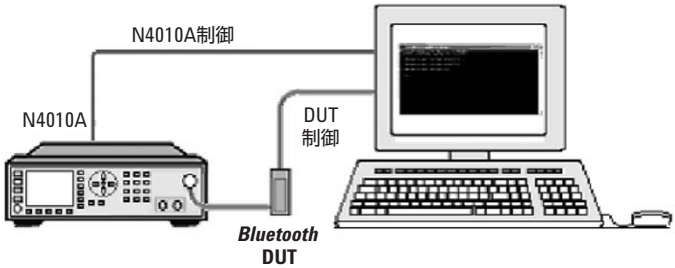

図6. オーディオ・プロファイルを使用したBTオーディオ・テストのためのセットアップ

付録B：*Bluetooth*無線機のトポロジー

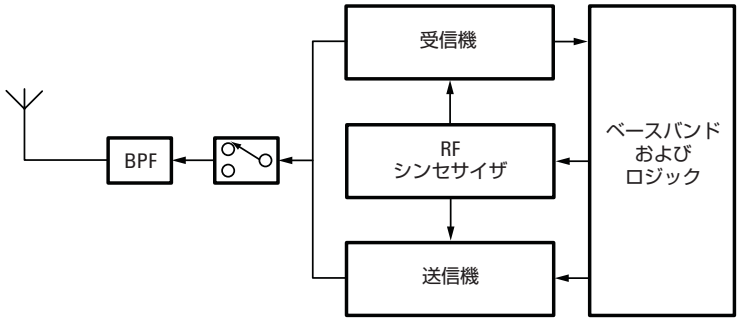

図7. *Bluetooth*デバイスのブロック図

付録Bでは、*Bluetooth*チップのトポグラフィーを図7に示すようにブロック図レベルで説明します。*Bluetooth*チップのトポロジーから、特定のデザインの要件が決まります。デザインのトポロジーにより、ある条件下での無線機の応答が決まります。デザインが異なると、無線機は故障などの影響を受けやすくなる場合があります。デザインの弱点に基づいて、テスト・プランの基本を作成します。

旧タイプの*Bluetooth*無線機は、アナログを使用してデザインを実装しています。アナログ・デザインでは、フェーズ・ロック・ループ、フィルタ、増幅器を使用して*Bluetooth*無線機の機能を実現しています。アナログ・デザインは、パラメータの不確かさのために、現在ではあまり使用されていません。

最新の*Bluetooth*チップはデジタル・デザインです。図8に回路図の例を示します。デザインは、送信機および受信機回路用の共通の周波数シンセサイザを備えています。アナログ・デザインからの主な変更点は信号がIQ変調されることです。

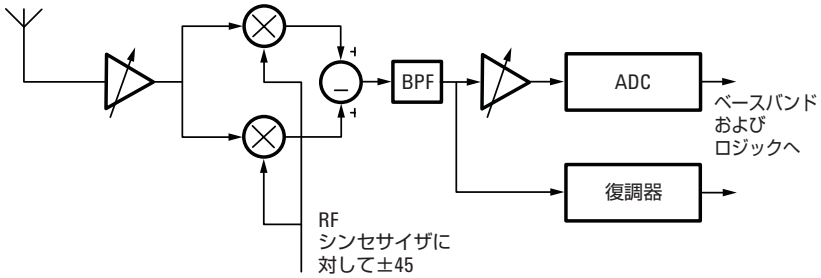

図8. *Bluetooth*無線機の受信機部分のブロック図の例

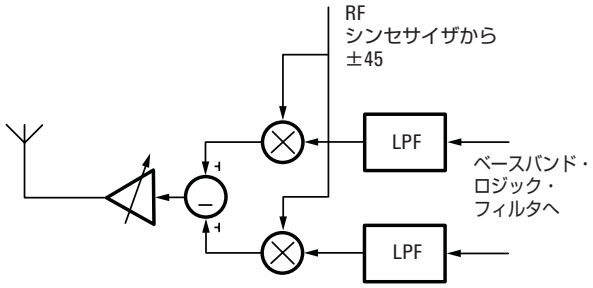

図9. *Bluetooth*無線機の送信機部分のブロック図の例

付録C：
テスト・ライン・リミット

テスト結果判定

テストを別の数字と比較して合否を判定するテスト・ライン・リミット（TTL）を決定することは、簡単な作業のように思われますが、実際にはかなり複雑です。これはテスト・プランの最初から検討する必要があります。なぜなら、これは歩留まりに大きな影響を与え、選択した装置に影響を与える場合もあるからです。

歩留まり

*Bluetooth*は、主に低コストの量産製品で使用されます。したがって製造歩留まりは高くなくてはなりません。正確な数字がどうなるかは製品ごと会社ごとに異なりますが、通常は95％を超えるはずです。利益を最大限にすることを追求するのですから、この数字をできるだけ高くすることを目標にするのが自然です。この数字が十分に高くなれば、修理プロセスが必要なくなります。

歩留まりは、デザイン・マージン、プロセスの信頼性（アセンブリ、処理、テスト）、コンポーネント価値の信頼性の関数です。この多くについてはすでに述べてきましたが、さらに探求する必要のあるテーマは、テスト・プロセスでのテスト・ライン・リミットの決定です。図10はTLLを視覚化したものです。

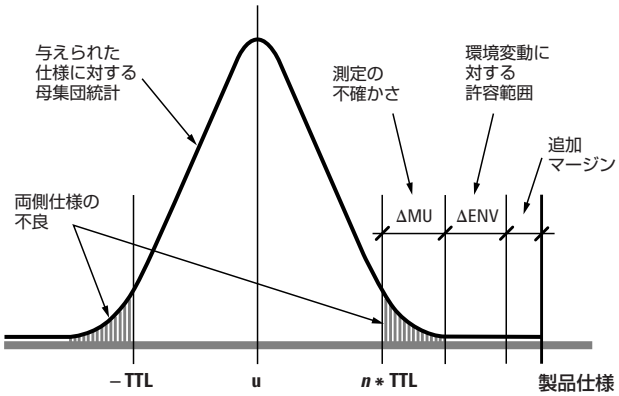

図10. 仕様（TLL）設定モデル

仕様設定モデル

図10は、両側テスト仕様です。例えば、感度測定など、多くの場合片側仕様が適切です。追加マージンの項は、通常は0まで減らして、TLLをできるだけ広くします。n*Δは、製造メーカが必要な歩留まりを得るために選択する値です。nについては2～6がよく選択されます。nが2の場合、歩留まりは95％であり、nが3の場合、歩留まりは99％です。分布曲線は製品、コンポーネント、プロセスなどの変動の合成であるため、nが大きくなればなるほど、歩留まりが100％に近づくのは明らかです。完全な不良は、この特性の一部とは考えられませんが、確かに最終的な歩留まりの一部です。目標は、不良の原因を突き止めてこれを取り除き、プロセスをしっかりした正規分布に「する」ことなのです。

初期分布の確立

初期分布は、パイロット・ランによって決定され、プロセスについての知識が増えるにつれ時間とともに改善されます。ICダイとコンポーネントのロットやデザイン変更などの変数を注意深く監視して、より古い特性がより新しい分布に組み込まれないようにする必要があります。

デルタ環境（ΔEnv）

徹底的な分析を行うには、ユニットのサンプルが多数必要ですし、環境内の変化に対する歩留まり（ΔEnv）を測定する必要があります。様々な手法を用いることができます。「プライマリ・ユース・ケース」が室内である場合は、温度と湿度の範囲は通常狭くなります。屋外である場合（携帯電話など）は、この範囲は広くなります。また、結果には平均値と標準偏差の両方があります。積極的な手法の場合は平均値だけをとり、保守的な手法の場合は標準偏差（つまり平均値＋2*Δ）を含めます。

測定の不確かさ（ΔMU）

測定の不確かさ（ΔMU）は、TLLを選択する上で重要な因子となります。不確かさが大きすぎると、TLLは必要以上に厳しくなり、不良が増えてしまいます。個々のアプリケーションで必要な歩留まりとマージンにふさわしい装置と手法を選択する必要があります。例えば、パワー出力を測定している場合、不確かさが1 dBの製品は、不確かさが0.2 dBの製品（精密パワー・メータなど）と比較して満足のいかないマージンを示します。この実際の例が、パワー設定です。パワーは通常（仕様内で）できるだけ低く設定して、過度のバッテリ消費を避けるのが最良です。この場合、パワー・メ―タの精度は、この変化を反映するようシステムとテストに取り込まれる必要があります。

付録D：*Bluetooth*無線テクノロジーのためのAgilentのソリューション

*Bluetooth*テストのためのAgilentの測定器

O＝*Bluetooth*テスト要件に完全に適合する。
A＝他のテスト機器との組み合せにより、*Bluetooth*テスト要件に完全に適合する。
X＝*Bluetooth*テスト要件に完全に適合しない。プリコンプライアンス・テストのみに適合する。

Bluetooth RFレイヤのテスト・ケース	N4010A *Bluetooth* テスト・セット[6]	N4017A *Bluetooth* GMAとN4010A[6,8]	ESA-E シリーズ・スペクトラム・アナライザ	86900 ベクトル・シグナル・アナライザ[2]	EPM-P シリーズ・パワー・メータ	E4438C ESG 信号発生器[1]
送信機テスト						
出力パワー [TRM/CA/01/C]	O	O	O	X	O	
パワー密度 [TRM/CA/02/C]			O	X		
パワー制御 [TRM/CA/03/C]	O	O		X	O	
Tx出力スペクトラム（周波数レンジ）[TRM/CA/04/C]				X		
Tx出力スペクトラム（−20 dB帯域幅）[TRM/CA/05/C]			O	X		
Tx出力スペクトラム（隣接チャネル漏洩電力）[TRM/CA/06/C]			O	X		
変調特性 [TRM/CA/07/C]	O	O	O	X		
初期搬送波周波数の許容値 [TRM/CA/08/C]	O	O	O	X		
搬送波周波数ドリフト [TRM/CA/09/C]	O	O	O	X		
EDR						
EDR相対送信パワー [TRM/CA/10/C]	O	O				
EDR搬送波周波数の安定度／変調精度 [TRM/CA/11/C]	O	O				
EDR差動位相エンコード [TRM/CA/12/C]	O	O				
受信機テスト						
感度／シングルスロット・パケット [RCV/CA/01/C]	O	O				X
感度／マルチスロット・パケット [RCV/CA/02/C]	O	O				X
C/I性能 [RCV/CA/03/C]	A[3]	A[3]				A[3]
ブロッキング性能 [RCV/CA/04/C]	A[4]	A[4]				A[4]
相互変調性能 [RCV/CA/05/C]	A[5]	A[5]				A[5]
最大入力レベル [RCV/CA/06/C]	O	O				O
EDR受信機テスト						
EDR感度 [RCV/CA/07/C]	X[7]	X[7]				
EDR BERフロア性能 [RCV/CA/08/C]	O	X				
EDR C/I性能 [TP/RCV/CA/09/C]	O	X				
EDR最大入力レベル [RCV/CA/10/C]	O	X				
EDR送信機テスト						
EDR帯域内スプリアス・エミッション [TRM/CA/13/C]				X		

1. *Bluetooth*デバイス用Signal Studioと併用した場合
2. 89600シリーズ・ベクトル信号解析ソフトウェアは、PSA/ESA-Eスペクトラム・アナライザ、N4010A無線コネクティビティ・テスト・セット、オシロスコープ、ロジック・アナライザ、VXIなどのさまざまなデジタイザと組み合わせて使用できます。
3. 受信機のC/I性能テストでは、干渉信号用にN4010AまたはESGなどの*Bluetooth*機能を備えた信号源が必要です。
4. 受信機のブロッキング性能テストでは、N4010AまたはESGなどの*Bluetooth*変調信号源とE8257Dなどのマイクロ波信号源を使用して、干渉信号（30 MHz〜12.75 GHz）を作成する必要があります。
5. 受信機の相互変調性能テストでは、N4010AまたはESGなどの*Bluetooth*変調信号源2台とESGまたはE8257DなどのCW信号源1台を使用して、相互変調成分を作成する必要があります。
6. *Bluetooth* 1.2の標準のテストにはN4010A-101が、EDRテストにはN4010A-101と-107が必要です。
7. EDR感度テスト用の雑音は、将来のリリースで無料で提供される予定です。
8. EDRテスト用にはN4017A-205が必要です。

付録E：参考資料

以下のカタログはAgilentの*Bluetooth* Webサイトから入手できます：
www.agilent.co.jp/find/bluetooth

アプリケーション・ノート

『*Bluetooth* RF測定の基本』、Application note 1333-1、
カタログ番号：5988-3760JA

『Verifying *Bluetooth* Baseband Signals using Mixed Signal Oscilloscopes』、
Application note 1333-3、カタログ番号：5988-2181EN

『Agilent E4438C Signal Signal Studio for *Bluetooth*』、
Application note 1421、カタログ番号：5988-5417EN

『*Bluetooth* EDR: The Wireless Evolution』、Application note 、
カタログ番号：5989-4204EN

製品概要

『Agilent N4010A Wireless Connectivity Test Set』、brochure、
カタログ番号：5989-4150EN

『Agilent N4010A Wireless Connectivity Test Set』、data sheet、
カタログ番号：5989-4035EN

『Agilent N4010A Wireless Connectivity Test Set』、configuration guide、
カタログ番号：5989-3486EN

『N4017A *Bluetooth*グラフィカル測定アプリケーション』、product overview、
カタログ番号：5989-2771JAJP

『*Bluetooth* EDR製品テストのための革新的なソリューション』、
product overview、カタログ番号：5989-3055JAJP

『ESA- E シリーズ スペクトラム・アナライザ用*Bluetooth* 測定ソリューション』、
product overview、カタログ番号：5980-2786JA

『Agilent ESA-E Series Spectrum Analyzer *Bluetooth* Measurement Option
（セルフガイド・デモンストレーション）』、product note、
カタログ番号：5980-2577EN

『Agilent EPM-P Series Single- and Dual-Channel Power Meters』、
demonstration guide、カタログ番号： 5988-1605EN

『Pシリーズ・パワー・メータ／センサ』、
technical guide、カタログ番号：5989-1049JAJP

『Agilent Vector Signal Analysis Basics』、Application note 150-15、
カタログ番号：5989-1121EN

『無線コネクティビティ・テスト用測定器、システム、ソフトウェア』、
brochure、カタログ番号：5988-4438JA

一般的なRFに関する推奨文献

アプリケーション・ノート

『8 つのヒント アナログRF 信号発生器によるより優れた測定』、
Application note 1306-1、カタログ番号：5967-5661J

『スペクトラム・アナライザ測定を成功させる8 つのヒント』、
Application note 1286-1、カタログ番号：5965-7009J

『Cookbook for EMC Precompliance Measurements』、
Application note 1290-1、カタログ番号：5964-2151E

『ESG-D シリーズ信号発生器を用いたビット・エラー・レート測定』、
Application note、カタログ番号：5966-4098J

『スペクトラム解析の基礎』、Application note 150、カタログ番号：5952-0292JAJP

『デジタルRF受信機デザインのテストおよびトラブルシューティング』、
Application note 1314、カタログ番号：5968-3579J

『デジタルRF送信機デザインのテストおよびトラブルシューティング』、
Application note 1313、カタログ番号：5968-3578J

『Fundamentals of RF and Power Measurement（4部構成）』、
カタログ番号：5988-9213EN、5988-9214EN、5988-9215EN、5988-9216EN

プロダクト・ノート

『89600シリーズ超広帯域ベクトル・シグナル・アナライザ』、
カタログ番号：5980-0723J

『ESG ファミリ／RF 信号発生器』、configuration guide、
カタログ番号：5965-4973J

参考文献

1. *Bluetooth* Test Specification-RF, Part A, for Specification 2.0, Revision 2.0, March 21,2005-*Bluetooth* SIG

2. Specification of the *Bluetooth* System-Version 2.0 + EDR, Volume 0, November 4, 2004-*Bluetooth* SIG

3. *Bluetooth*の公式Webサイトの**www.bluetooth.com**には、*Bluetooth*の歴史、技術、ニュース、仕様、アプリケーション、製品、イベント、*Bluetooth* Special Interest Group（SIG）に関する情報が記載されています。*Bluetooth* SIGメンバーシップWebサイトの**www.bluetooth.org**から、*Bluetooth*テスト仕様、お知らせ、プレリリース仕様を入手できます。このWebサイトでは、いくつかの技術文書はパスワードで保護されています。

4. Explaining those BER test mysteries, Lightwave Magazine, Justin Read, September 2004

*Bluetooth*および*Bluetooth*ロゴは米国 *Bluetooth* SIG Inc.が所有する商標であり、Agilent Technologiesにライセンスされています。

関連カタログ・リスト

『89600S Vector Signal Analyzer CD』、
カタログ番号：5980-1989E

『89600シリーズ・ベクトル信号解析ソフトウェア』、Technical Overview、
カタログ番号：5989-1679JAJP

『89600 Series Vector Signal Analysis Software 89601A/89601AN/89601N12』、Data Sheet、
カタログ番号：5989-1786EN

『Hardware Measurement Platforms for the Agilent 89600 Series Vector Signal Analysis Software』、Data Sheet、
カタログ番号：5989-1753EN

『89650S広帯域ベクトル信号解析システム』、Technical Overview、
カタログ番号：5989-0871JA

『89650S Wideband Vector Signal Analyzer System with High Performance Spectrum Analysis』、Configuration Guide、
カタログ番号：5989-1435EN

『89607A無線LANテスト・スイート・ソフトウェア』、Technical Overview、
カタログ番号：5988-9574JAJP

『89604Aディストーション・テスト・スイート』、Technical Overview、
カタログ番号：5988-7812JA

Webリソース

詳細は、**www.agilent.co.jp/find/89600**を参照してください。

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/find/tm

● 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

April 19, 2006
5988-5412JA
0000-00DEP