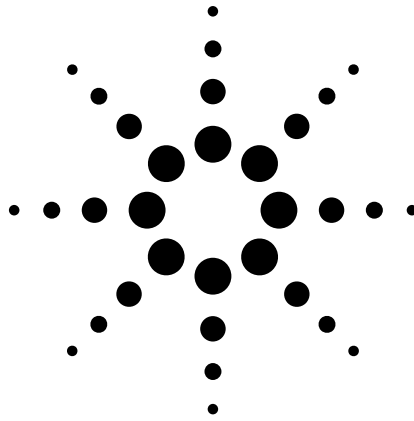


Bluetooth製造テスト 入門ガイド

Application Note 1333-4



はじめに

注：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。

*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、ページャ、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新技術です。*Bluetooth*は、冷蔵庫やセントラル・エア／ヒーティング・システムのような家庭電化製品に応用することも考えられています。ケーブルやコネクタは、やがて過去の遺物となるかもしれません。パー

ソナル分野のネットワークが初めて、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るようになったのです。

*Bluetooth*は、2.4GHz 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、HomeRFおよび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、データ・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*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。ユーザは、職場や家庭ですすまず無線機能を求めるようになっていきます。*Bluetooth*は、2005年までには、ほぼ10億台の機器に取り付けられると予想されます。

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。



Agilent Technologies

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、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。最後に歩留まり、シングルサイトまたはマルチサイト・テスト、テスト・ライン・リミット (TLL) などのその他の重要な製造課題の概略について述べます。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。このサイトは絶えずアップデートされています。

Agilentは、お客様がBluetoothで成功を収められることを心より願っております。

目次

はじめに

1. Bluetooth製造の概要	4
1.1 製造環境	4
1.2 大量のテスト	4
1.3 低コスト化	4
1.4 テストを行う理由	5
1.4.1 製品機能性の完成	5
1.4.2 コンポーネントまたはサブシステムの調整	5
1.4.3 性能検証	5
1.4.4 プライマリ・ユース・ケース	5
1.4.5 部品不良およびプロセス・エラーの選別	5
1.4.6 品質保証	5
2. テスト・プロセス	6
2.1 事業戦略とアプローチの検討	6
2.2 製造テスト・プロセス	6
2.2.1 概要	6
2.2.2 テスト・システムへの製品接続（フィクスチャの作成）	6
2.3 Bluetoothテスト・プラン	6
2.3.1 電源投入と製品初期化／一般的なアライブ・チェック	6
2.3.2 製品調整	7
2.3.3 製品検証	7
2.3.4 結果比較	7
3. Bluetoothテスト・プランの作成	7
3.1 テスト・プラン作成における因子	7
3.2 Bluetoothテストの決定	8
ステップ1 Bluetooth SIGテストの調査	8
ステップ2 製造用SIGテストの優先順位付け	9
ステップ3 他の候補テストのリスト	10
ステップ4 テストの要約	11
ステップ5 特定Bluetooth無線機用テストの評価	11
ステップ6 上流テストの評価	12
ステップ7 最終選択のためのテストの精選	12
ステップ8 テスト・シーケンスの決定	14
ステップ9 テスト手法と条件の決定	14
4. 他の重要な製造テスト課題	16
5. まとめ	17

付録A：

詳細なテスト手法と条件	18
A.1 感度測定	18
A.2 電流対動作モード	18
A.2.1 バッテリ電流ドレイン対動作ステート	19
A.2.2 動作ステートと電流ドレイン特性	19
A.2.3 バッテリ電流ドレイン測定とBluetoothテストの要件	20
A.3 -20dBスペクトラム測定	20

付録B：

Bluetooth無線機トポロジーの意味	21
B.1 無線機トポロジー	21
B.2 送信機の属性	21
B.3 送信機校正	22

付録C：

Bluetooth無線機機特性	22
C.1 送信機（変調特性の性能）	22
C.2 送信機（パワー）	22
C.3 受信機（感度）	23

付録D：

他の製造課題の詳細	24
D.1 パラレル・テスト	24
D.2 DUTインタフェースとフィクスチャの作成	24
D.2.1 フィクスチャの性能	24
D.2.2 フィクスチャの校正	24
D.2.3 フィクスチャの再現性	25
D.3 テスト結果判定	25
D.3.1 歩留まり	25
D.3.2 仕様設定モデル	26
D.3.3 初期分布の確立	26
D.3.4 デルタ環境（ ΔEnv ）	26
D.3.5 測定の不確かさ（ ΔMU ）	26

付録E：

Bluetooth技術用のアジレントのテスト装置	27
E.1 Bluetooth対応のテスト装置	27
E.2 他のテスト装置	27
E.3 アクセサリ	27

付録F：

参考文献	27
------	----

1. 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。

1.1 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ようとして、Bluetooth機能を備えたより大きなサブアセンブリを製造しようとして、エンド・ユーザ向けのフル機能製品を製造しようとして、上流での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。

1.2 大量のテスト

量産品については、Bluetooth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、テスト環境にいつそ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られるのです。

1.3 低コスト化

ある製品を製造するには、製品を組み立てる(そして最終的にはパッケージ化する)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は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、変わることはない第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。

1.4 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。

1.4.1 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。

1.4.2 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、バッテリー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。

1.4.3 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。ただし、製造時に、すべての製品が測定されるわけではありません（おそらくサンプルで測定されるだけです）。

しかし*Bluetooth*の仕様テストは、測定が行われる場合には常にそのデザインが*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、変調確度、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。

1.4.4 プライマリ・ユース・ケース

電子製品が、少なくと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。

1.4.5 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。

1.4.6 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、常に一時的なものを見なすべきです。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。

2. テスト・プロセス

2.1

事業戦略と手法の検討

戦略目標と事業目標は、「下流」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。（政府または軍契約のように）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。

2.2

製造テスト・プロセス

2.2.1

概要

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（テスト判定）、データ保管、製品出口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、調整、検証にまで拡張されています。製品の調整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。

2.2.2

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、ステイミュラス／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（デジタル・インタフェースなど）、RF信号（放射または直接）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。

2.3

Bluetoothテスト・プラン

図1に示すとおり、テスト・プランは3つの主要要素から構成されます。また、結果（仕様）比較は各テストと密接に結びついているため、これも追加します。

2.3.1

電源投入と製品初期化／一般的なアライブ・チェック

テスト開始時の動作ポイントは最初に選択する必要がありますが、製品の性能により、時間とともに変化してもかまいません。代表的な問題としては、パッシブ・パワー消費、テスト・インタフェースを経由した制御の有効性、出力ラインの接続または動作の完全性、問合せの結果を報告するための最小ブート機能などがあります。例えば、各Bluetooth機器

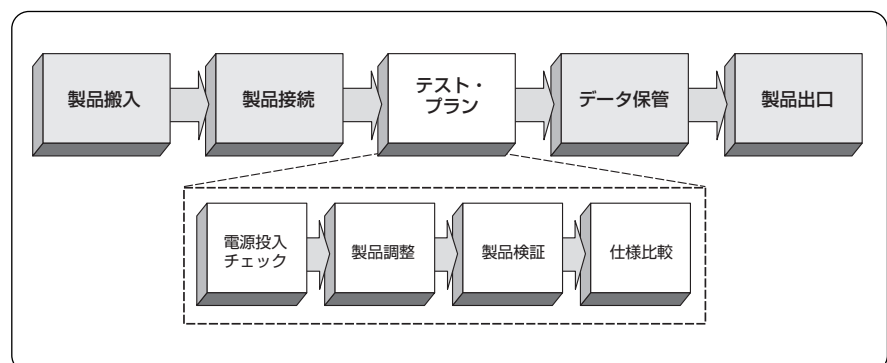


図1 製造テスト・プロセスの概要

3. Bluetoothテスト・プランの作成

およびデバイスには独自の識別子があり、これは製造プロセスのどこかで必要になります。(テスト・コードを簡潔にするため、識別子はできるだけ長期にわたり一般性のあるものにするのが最善の方法です。)

Bluetooth無線機用プロトコルは、通常製造中にダウンロードされますが、ある製品に対して、時間とともにあるいは製品ごとに変化することもあります。ファームウェアは、モノリシック(1ファイル)であってもかまいませんし、特定のアプリケーションと関わりのあるベースバンド／リンク・マネージャ・ファームウェアとプロトコル・スタックに分けてもかまいません。プロトコル・スタックを検証することは、それ自体が製造の目的ではありません。しかしプロトコル・スタックはロードされなくてはなりませんし、しかも正確にロードされなくてはなりません。

2.3.2 製品調整

多くのデバイスには調整が必要ですが、これはベンダごとに異なります。これらの相違は考慮に入れておかなくてはなりません。調整には、水晶周波数の調整、出力パワーの調整、受信信号強度の読取り、IQ利得、直交成分とオフセット、変調指数などがあります。この中にはICレベルでテストすることができるものもありますが、ほとんどのものはこのレベルでテストすることはできません。

2.3.3 製品検証

製品検証は、テスト・スイートの中でもっとも重要な側面です。どのようなテストを行う場合でも、製品検証に重点が置かれます。検証には、

情報が転送できるようリンクを確立して維持するのに重要なあらゆるパラメトリック測定が含まれています。考慮すべき点は、Bluetooth無線機のどの機能ブロックが性能の鍵となるか、起こりうる不良がどのようなメカニズムになっているか、デザインの信頼性を保証するにはどのようなテストを行うべきか、周波数帯域またはレベルのどこでテストを行うべきか、そしてどのアルゴリズムが製造にもっとも適しているかなどです。Bluetoothが別のデザイン(携帯電話など)に組み込まれた場合には、考慮すべき点はさらに増えます。

2.3.4 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D)。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。

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「過不足のない」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、その重要性を評価し、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、Bluetoothの「テスト・モード」で実行することができます。エンジニアまたはオペレータは、このモードを使用してRFまたはホスト・コントローラ・インタフェース(HCL)でDUTを起動して制御することができます。

3.1 テスト・プラン作成における因子

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。

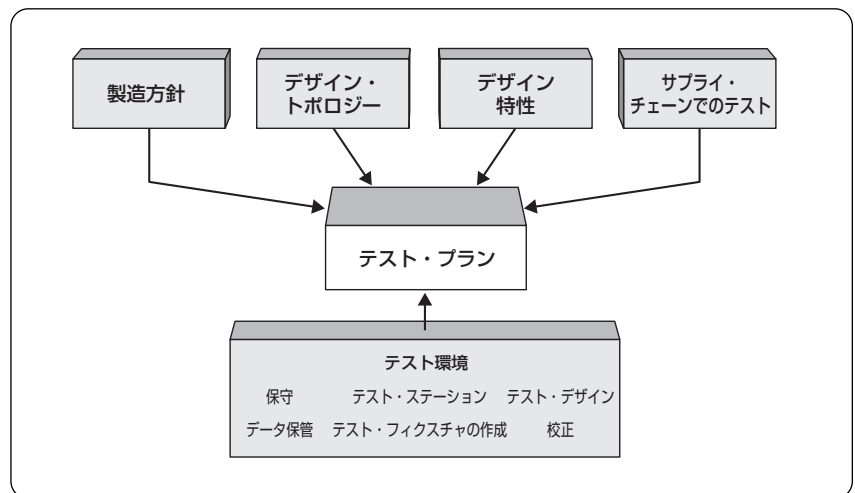


図2 Bluetoothテスト・プランの作成と実施に必要な因子

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ド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。

3.2 Bluetoothテストの決定

ステップ1 Bluetooth SIGテストの調査

Bluetooth SIGは、Bluetooth製品とデバイスの認証に用いられる大規模なテスト・スイート（16テスト）を確定

しました。（付録FのBluetooth RFテスト仕様参照。）これらは認証のためのもので、製造テストを定めたものではありませんが、これらの多くは製造においても役に立ちます。

SIGテストの詳細を以下にリストします。それぞれについて、優先度（テストの必要性）と簡潔な理論的根拠を示しています。優先度は、必要な場合には、MUSTテスト、SAMPLEテスト、およびNEVERテストにまで展開することができます。

Bluetooth SIGテスト

テスト	テストの製造における優先度	測定器
TRM/CA/01/C：出力パワー 理論的根拠：リンク・バジェット、バッテリー寿命、不良の発生率の原因となるキー・パラメータ。測定と同時、または測定の代わりに調整を行う場合もある。注：スペクトラム・アナライザが使用されるが、パワー・メータまたはテスト・セットで十分な場合もある。	高	スペクトラム・アナライザ またはパワー・メータまたはテスト・セット
TRM/CA/02/C：パワー密度 理論的根拠：パワー出力対周波数（チャンネル番号）を確認するための優れた特性評価試験であるが、テスト時間が長い。	低	スペクトラム・アナライザ
TRM/CA/03/C：パワー制御 理論的根拠：ダイナミック・レベル制御によりバッテリー寿命を最大化するデザインまたは場合に有効。標準は性能属性を指定。使用しているチップはこれをサポートする場合もあるが、実際の製品には必須ではない。 測定と同時、または測定の代わりに調整を行う場合もある。注：スペクトラム・アナライザが使用されるが、パワー・メータまたはテスト・セットで十分な場合もある。	高	スペクトラム・アナライザ またはパワー・メータまたはテスト・セット
TRM/CA/04/C：出力スペクトラム（周波数レンジ） 理論的根拠：標準に記載されているように、テスト時間は最大10秒。不良のメカニズムは、-20dBスペクトラム・テストと変調指数の不良項目と共通の場合もある。	低	スペクトラム・アナライザ
TRM/CA/05/C：出力スペクトラム（-20dB帯域幅） 理論的根拠：出力放射スペクトラムは、規制適合の問題である。チップ・テストで適切にカバーできる場合もある。 前述のように、テスト時間は最大10秒。変調特性との相関が可能。品質管理に有効。	高／中	スペクトラム・アナライザ
TRM/CA/06/C：出力スペクトラム（隣接チャンネル漏洩電力） 理論的根拠：テスト時間は非常に長い。代わりにスポット・チェックを行ってもよい。品質管理に有効。	低	スペクトラム・アナライザ
TRM/CA/07/C：変調特性（指数） 理論的根拠：波形品質、特にfm指数（ β ）を検証。これは重要な情報伝送パラメータである。調整セクションに含めることができるデザインもある。変調指数が低すぎると感度が低くなり、高すぎると、過度のスペクトラム拡散が生じる。	高	スペクトラム・アナライザ またはテスト・セット
TRM/CA/08/C：初期搬送波周波数の許容値（確度） 理論的根拠：送信バースト機能およびシンセサイザのセトリングを確認するパラメータ。デザイン・トポロジーの中には、不良の影響を受けやすいデザインもある。水晶確度の粗確認に用いることができる。	高	スペクトラム・アナライザ またはテスト・セット
TRM/CA/09/C：搬送波周波数ドリフト 理論的根拠：デザイン・トポロジーの中には、不良の影響を受けやすいデザインもある。復調の変動により相互運用性の問題が生じる可能性がある。	高	スペクトラム・アナライザ またはテスト・セット

ステップ2

製造のためのSIGテストの 優先順位付け

前記のリストには、製造への重要度の点から各テストの優先度ランキングと理論的根拠が記載されています。表1（10ページ）は、テストの優先度とテストで使用可能な様々な装置を要約し強調表示したものです。これらのすべてを検討することにより、Agilent E1852BなどのBluetooth RFテスト・セットで優先度の高いテストがすべてカバーできることが明らかになります。低コストを第1の目標としている場合には、テスト・システムの主要コンポーネントとしてBluetoothテスト・セットを使用することをお勧めします。

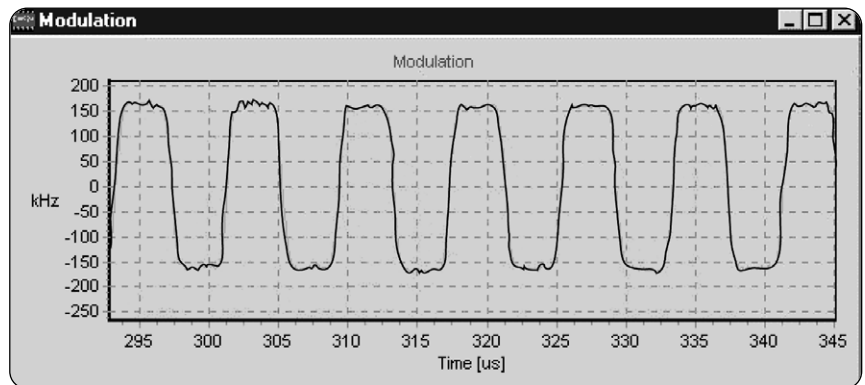


図3変調解析（周波数対時間）を示すAgilent E1852Bの画面。出典：SIG Test TRM/CA/07/C

Bluetooth SIGテスト（続き）

テスト	テストの製造 における優先度	測定器
TRC/CA/01/C：帯域外スプリアス放射 理論的根拠：明らかに長いテスト時間が必要。アップコンバージョン・スプリアスまたは低調波などが疑わしい領域をスポット・チェックする。製造課題ではなくデザイン課題と考えるべきである。	低	スペクトラム・アナライザ
RCV/CA/01/C：感度（シングル・スロット・パケット） 理論的根拠：情報伝送、すなわちリンク・バジェットの主要パラメータ。環境（シリコン・ファブおよび隣接回路）の雑音により制限される。不良チェックは製造テストでは過剰であり、1つの不良だけを選択するのではなく、プロセス制御には不適切。テストを行うのに適切な感度レベルを見つけるための特性評価が必要。適切なビット数と不良モードを選択する（デザインがこれを保証している場合）。	高	特別なセットアップ またはテスト・セット
RCV/CA/02/C：感度（マルチスロット・パケット） 理論的根拠：情報伝送、すなわちリンク・バジェットの主要パラメータ。シングル・スロット感度と際だった性能の相違があるかどうかを判断する。相違がない場合は、どちらかを行う。マルチ・スロットはこの2つのうちで最悪値。	高	特別なセットアップまたは テスト・セット
RCV/CA/03/C：搬送波／干渉性能 理論的根拠：できる限り製造から除外した方がよい。ネットワークと追加装置が加わるので複雑さとコストが増大するからである。厳格な仕様（14dB）ではマージンを達成することは困難である。感度テストと似た測定である。	中	干渉信号源とテスト・セット
RCV/CA/04/C：ブロッキング性能 理論的根拠：性能は、デザインによって保証される可能性が高いか、特性評価により許容リミット内にあることが示される。ネットワークと追加装置が加わるので複雑さとコストが増大する。感度テストと似た測定である。	低	干渉信号源とテスト・セット
RCV/CA/05/C：相互変調特性 理論的根拠：性能はデザインによって保証される可能性が高いか、特性評価により許容リミット内にあることが示されるだろう。ネットワークと追加装置が加わるので複雑さとコストが増大する。感度テストと似た測定である。	低	干渉信号源とテスト・セット
RCV/CA/06/C：最大使用可能レベル 理論的根拠：デザインでは、過負荷はあまり重視されない場合もある。製品の「プライマリ・ユース・ケース」では、過負荷の問題はまったく起こらない可能性がある。しかし、無線が互いに近接しすぎている場合、正しく機能しない無線機もある。	中	テスト・セット
オプションのテスト：受信信号強度指標 理論的根拠：特に無線の近接度が変化する場合のよりアクティブなユース・ケースでは、情報転送、すなわちリンク・バジェットの主要パラメータ。バッテリー寿命には重要。	高	テスト・セットまたは信号源

表1 製造への重要度によってランキングされたテストと、 使用テスト装置の種類		測定器				
		パワーステータ	スペクトラム・アナライザ	テスト・セット	電圧電流計	特殊なセットアップ
テスト名	優先度					
出力パワー	高	X	X	X		
パワー制御	高	X	X	X		
変調特性 (指数)	高		X	X		
初期搬送波周波数の許容値 (確度)	高		X	X		
搬送波周波数ドリフト	高		X	X		
感度 (シングル・スロット・パケット)	高			X		X
感度 (マルチ・スロット・パケット)	高			X		X
受信信号強度指標 (オプション)	高			X	X	
最大使用可能レベル	中			X	X	
搬送波／干渉性能	中			X	X	
出力スペクトラム (−20dB帯域幅)	中		X			
出力スペクトラム (周波数レンジ) :	低		X			
出力スペクトラム (隣接チャネル漏洩電力)	低		X			
帯域外スプリアス放射	低		X			
ブロッキング性能	低			X	X	
相互変調特性	低			X	X	
パワー密度	低		X			

SIG *Bluetooth* RFテスト仕様のテストは、パラメトリック測定を行うべき条件 (周波数、パワー、感度など) を公式に指定したものであり、必ずしも製造テストに適切な条件ではありません。お客様の製品にとって正しい条件とは、製品のデザインにおいて必要なレベルの信頼性を保証し、代表的な性能統計を考慮に入れた条件です。例えば、測定するどのパラメータの周波数も、予想される最悪の性能で選択されるべきです。例えば、感度は、性能試験でデザイン感度が最低であることが明らかになったチャネルで検証されるべきです。これは、デザインを不利にするためではなく、テスト時間を最小にして信頼性を最大にするためです。

さらに、テストのモードと方法は、指定されたものと異なってもかまいません。同じまたは類似した目標を達成できるものであればどのテストでもかまいません。製造のためのビット・エラー・レート (BER) 感度テストに膨大な160万ビットを使用したり、10秒の−20dBスペクトラム・テストを実施したりするように

要求されることはありません。テスト・エンジニアは、デバイスとテストの目標を理解してから、機能と性能を網羅した迅速で効果的なテスト・プロセスを開発する必要があります。これらのテストを行うことにより、様々なパラメータ間の関係をよりよく理解できるようになります。テスト・ライン・リミットを変更してから次の新しいテストを行ってもかまいません。付録Aでいくつかのテスト手法を詳細に説明します。

ステップ3 他の候補テストのリスト

Bluetooth SIGテストの他に、他の様々なテストを考慮する必要があります。このうちどれを選択するかは、チップセットのデザイン、製造プロセスの信頼性、デバイスの不良に対する感受性などによって決まります。例えば、デバイスがバッテリー駆動の場合、様々なモードで引き込まれる電流は重要です。(この場合、バッテリー・エミュレータは、主要テスト・コンポーネントとなります。)

このようなテストの例を表2に示します。

表2
追加の候補テスト

テストの種類	例	説明
電源投入テスト	IQ制御テスト	USB/デジタル・インタフェースでの応答
	FWダウンロード	プロトコル・スタックのダウンロード
	UID	一意のアドレスのロード
	電流ドレイン	電源ロード
調整	送信パワー校正	校正出力レベル
	周波数調整	水晶のトリミング
	RSSI校正	校正入力レベルの測定
	IQモジュレータ校正	IQモジュレータのバランシング
他の性能テスト	送信マスク	パワー・ランプ特性
	周波数マスク	周波数セトリング特性
	電流対動作ステート	様々な動作ステートでの電流ドレイン
機能テスト	製品によって異なる	例：LANアクセス・ポイントでのファイル転送、ヘッドセットでのオーディオ・テスト
カスタム・テスト	製品とテスト方針によって異なる	例：帯域内送信スプリアス

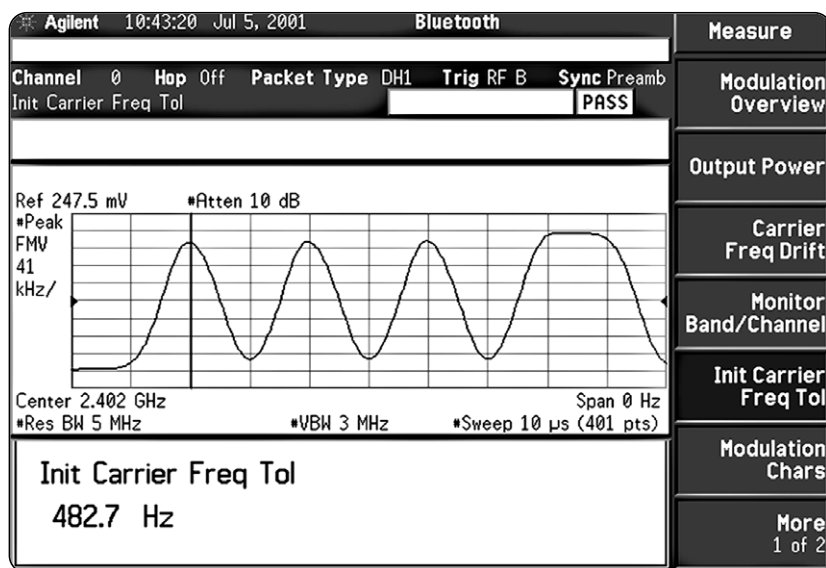


図4 初期搬送波周波数の許容値を測定するAgilent ESAスペクトラム・アナライザ

ステップ4 テストの要約

ここまで行ってきたことは、SIGとその他の両方についてBluetoothのテスト候補を調査するためのものです。表3は、これらのテスト候補を実行可

能な選択肢のセットに絞ったものです。Bluetooth SIGテストについては、優先度が高または中と指定されたもののだけが含まれています。

表3
実行可能なBluetoothテストのスーパーセット

テストの種類	実行可能なテスト
最初の電源投入	インタフェースでの応答 ファームウェアのダウンロード 一意のアドレスのインストール パワー・チェック、公称電流
調整	パワー校正 水晶のチューニング 受信信号強度指標 (RSSI) 変調指数特性
性能	出力パワー パワー制御 変調特性 (指数) 初期搬送波周波数の許容値 (確度) 搬送波/干渉性能 -20dBスペクトラム 搬送波周波数ドリフト 感度 (シングルスロット・パケット) 感度 (マルチスロット・パケット) 受信信号強度指標 (オプション) 電流対動作モード 周波数セトリング パワー対時間
機能	ファイル転送、オーディオ・チェックなど

これらのテストは、同じ場所で行ってもかまいませんし、同じ場所で行わなくてもかまいません。電源投入テストや機能テストの変形、広範な測定課題、異なるアプローチなどがあるため、以下では調整テストと性能テストだけを扱います。

調整は、検証と同時(またはほぼ同時)に行うことができます。これは、同じ装置、テスト・コマンド、そしてセットアップ手順が使用されるためです。例えば、前述のSIGテスト・リストのうち、出力パワーの調整を出力パワーの測定と組み合わせることができます。同様に、変調指数と受信信号強度指標 (RSSI) の調整は、それぞれ変調特性テストおよびRSSI性能テストとともに行うことができます。ほとんどの場合、感度テストは重複して行う必要はありません。したがって、Bluetoothテスト・スイートは表4のようになります。

表4
調整テストと性能テストに重点を置いて簡素化された選択肢

テスト領域	実行可能なテスト
調整	水晶のチューニング
性能	パワー出力：調整とパワー検証 パワー制御 変調特性：調整と検証 -20dB帯域幅 初期搬送波周波数の許容値 (確度) 搬送波周波数ドリフト 感度 (マルチスロット・パケット) RSSI調整と受信強度指標の動作 搬送波/干渉 電流対動作モード 周波数セトリング パワー対時間またはパルス波形

ステップ5 特定のBluetooth無線機用テストの評価

一般的なテスト・セットが確定したら、使用するBluetooth無線機のトポロジーに適したテストを考える必要があります。デザインによっては、その無線器に対してあるテストが実

質的に不必要であることが保証される場合も、その固有の感受性により追加テストが必要になる場合も、その両方であることもあります。*Bluetooth*無線機トポロジーが意味するものについては、付録Bに詳細な解析が記載されています。

*Bluetooth*無線機を詳細に調べるには、多くの重要な基準を用いて特性評価する必要があります。

• 分布解析

適切なサンプル・サイズでの1つまたは複数のパラメータの性能

• 温度による統計的偏差

1つまたは複数のパラメータが温度とともにどのように変化するのかを求める

• 湿度による統計的偏差

1つまたは複数のパラメータが湿度とともにどのように変化するのかを求める

• 共分散解析

ある装置でのいくつかの測定結果間の関係を調べる

• 性能の特性曲線

与えられたレンジのテスト条件でのパラメータの一般的な特性を求める。例えば、送信パワー対周波数

温度／湿度の特性試験は通常製造環境で行われたり、*Bluetooth*製造戦略の一部と考えられたりはしません。これらは、テスト・ライン・リミット (TLL) の設定における要素として用いられることが多くあります。TLLについては、付録Dで詳細に検討します。分布解析は、デザインの統計的偏差を決定し、どのパラメータが性能に広く分布し、どのパラメータが不良を引き起こすかを識別するための鍵となります。

共分散解析は、潜在的エラーを選別するためのもっとも基本的、あるいはもっとも費用効果の高い手法に注目するための、異なる性能指標の関係を求める高度なプロセスです。

これらのテストが製造プロセスに与えるもっとも明確な利点は、特性曲線の決定です。特性曲線が決定された場合、この特性曲線により、製品をテストする最良の方法がわかります。付録Cにいくつかの例を示します。

ステップ6 上流テストの評価

テストをさらにサプライ・チェーンに拡張するために、「下流」で除去することのできるテストを考えます。これには、コンポーネント、そのコンポーネントの源、そのコンポーネントについて行われたテストを調査する必要があります。最終機器を販売しているのであれば、これにはIC製造メーカのテストだけでなく(適用可能な場合には)*Bluetooth*モジュール製造メーカのテストも含まれます。

完全な*Bluetooth*無線機は、わずか1つか2つのICと水晶やコンデンサなど数多くのオフチップ・コンポーネントの構成で実現される場合があります。ICレベルでのテスト・カバレッジは、最終機器用のテスト・プランを作成する際に確実に検討する必要があります。ICの上流テスト・カバレッジは、カバレッジ方針、テスト能力、テストのアクセス・ポイント、無線機の完成の状態などが異なるため、ベンダごとに異なります。ほとんどの場合で最後の因子が重要です。これは、水晶、コンデンサ、プロトコル・スタックがまだ追加されていないためです。したがって、ICレベルで利用できるSIGテスト・カバレッジは、これらのコンポーネントによって影響されないテストに限定されます。

反対側のページの表5に示すとおり、*Bluetooth*テストの多くは、ICレベルで実行することができます。例えばRF測定スイートを備えたAgilent 93000 SOCシリーズは、無線機モデムとベースバンド・コントローラICの量産製造テスト・ソリューションを提供します。これらのテストはステップ8で示します。詳細については、Agilent プロダクト・ノート 5988-4260EN および 5988-4261EN を参照してください。

これまで述べてきたテストのすべてを用いて、表5に示すような全体のテスト・カバレッジ・マトリックスを作成することができます。最初のコラムにリストしたのは、製品性能を検証するために実行可能なテストです。他のすべてのテストは上流で行うことができます。ここでは、上流ICテストだけが適用されると仮定します。実際には、個々のケースごとに異なります。

ステップ7 最終選択のためのテストの精選

「調整が必要」のコラムは、調整が必要な領域を示しています。調整が必要なテストは、初めにどのようなICテストまたはモジュール・テストを行っても下流で行われる必要があります。しかし、パワー出力と変調特性は一定量は上流で処理されているため、これらの領域でのテストは削除してもかまいません。例えば、3つ以上の周波数でテストを行う代わりに、1つまたは2つの周波数でテストを行うと決めてもかまいません。また、装置製造メーカにより行われる「他のSIGテスト」の優れたテスト・カバレッジに注目してください。(テスト時間の削減による)コストの削減は、量産においては主要目標となるため、できるかぎり冗長なテストは避ける必要があります。したがって、テスト・プランでは「優先度の高い性能テスト」に重点を置きます。

		サプライ・チェーンICテストの上流テスト															
		調整が必要	出力パワー対周波数	出力パワー制御	-20 dB帯域幅	スプリアス信号生成：IB	スプリアス信号生成：OB	周波数セトリング時間	変調特性：変調指数	変調特性：初期周波数確度	変調特性：周波数ドリフト	Rx相互変調歪み	Rx干渉：ブロッキング	Rx干渉：同一チャネル	Rx干渉：隣接チャネル	Rxダイナミック・レンジ：感度：	Rxダイナミック・レンジ：最大入力パワー
表5 全体のBluetoothテスト・マトリックス																	
調整テスト	水晶のチューニング	Y															
優先度の高い性能テスト	パワー出力	Y	X														
	パワー制御	N		X													
	変調特性	Y			X				X								
	初期搬送波周波数	N						X		X							
	搬送波周波数のドリフト	N									X						
	感度	N														X	
	RSSI	Y															
	バッテリー電流対動作モード	N															X
	周波数セトリング	N						X									
	パルス波形	N						X									
	出力スペクトラム-20dB帯域幅	N			X												
他のSIGテスト	最大使用可能レベル	N															X
	出力スペクトラム周波数レンジ	N					X										
	出力スペクトラム隣接チャネル漏洩電力	N				X											
	帯域外スプリアス放射	N					X										
	搬送波/干渉性能	N												X			
	ブロッキング性能	N											X				
	相互変調特性	N										X			X		
	パワー密度	N			X												

初期周波数の許容値は、水晶確度と相関関係にあります。水晶はチップ外であるため、ICテストで測定することはできません。したがって、完全な機器でテストする必要があります。一方、周波数ドリフトは絶対周波数に依存しません。これはICレベルでテストされる内部フェーズ・ロック回路と相関関係にあるだけなので、機器レベルでのテストは必要ありません。受信信号強度指標（RSSI）は、ICレベルでテストすることができますが、このテストには調整が必要であるため、機器レベルでテストが行う必要があることに注意してください。

最後に、感度はICパラメータとしてテストされますが、高い相関があるとは考えられません。なぜなら、これは環境雑音、アンテナ、はんだ不良など他の数多くの因子に依存しているためです。したがって、これは機器レベルで検証される必要があります。これらの因子に許容値があることが明らかな場合は、お客様自身で無線器モデムの要件をICレベルでより厳しいものとし、感度テストを少なくともかまいません。

ここまでのテストとプロセスについての前提から、テスト・スイートで以下のものを確定することができます。

- 水晶のトリミング
- パワーの調整と性能
- 変調指数
- 初期周波数の許容値
- 感度
- 受信信号強度指標
- バッテリー電流対動作モード

注意：これは、簡略化されたテスト・セットですが、すべてのテストを常にマスタ・リストで監視し続けた方がよいでしょう。後で行われる解析により、決定を変更するような

相関が発見されるかもしれないからです。ICテストを考慮に入れている場合、ICテストが全体の複合テスト・プロセスの一部となるため、下流での不良を最小限に抑えるのに役立っていることに注目することも大切です。

ステップ8 テスト・シーケンスの決定

テストは、製造コストのうちのかなりの部分を占めるため、不良が発生する可能性がもっとも高いものに対して最初にDUTのテストを行うべきです。そうすれば、そのユニットを廃棄したり、修理用にリサイクルしたりすることができるので後のテストで時間を浪費することがありません。このルールは、このような正確な区別ができていないこと（すなわち、すべての調整が行われている）ことを前提としています。（特にテストと調整が一ヶ所で行われる場合、）*Bluetooth*対応デバイスでは、このルールを次のように拡大することができます。不良が発生する可能性のもっとも高い次のテストについては、すべての調整が行われる必要があります。

例えば、もっとも頻繁に不合格になるのが、バッテリー電流テストであり、その次が感度と周波数ドリフトだと判断したとします。電流テストと感度テストに校正が必要でない場合は、以下の順序を選択することができます。

- 水晶のチューニング（正確な結果を保証するのに必要）
- バッテリー電流波形
- 感度
- 変調指数調整および検証（ドリフト測定は変調パラメータを使用）
- 初期周波数の許容値およびドリフト
- パワーの調整と検証（送信モードでの電流に役立つ）
- 受信信号強度指標

テスト・シーケンスに関するもう1つの検討事項は、共通の出力信号または入力信号を使用して、1回で複数の結果を得ることができるかどうかということです。例えば、*Bluetooth*テスト・セットを使用すれば、パワー特性と変調特性を同時に検証することが可能です。*Bluetooth*テスト・セットはこれらの送信機測定を同時に行うことができるためです。

ステップ9 テスト手法と条件の決定

*Bluetooth*無線機テストによって示されるように（付録C参照）、一般にテスト条件はテストされる製品のデザイン性能特性によって決まります。したがって、ここでのテストは、高、中、低ポイントで行う認証テスト・プロセス用の*Bluetooth SIG*勧告を超えています。ここでは、製造における個々の目的に合わせるため、テストを行う条件を変更するだけでなく、テスト方法も変更します。付録Aでさらに詳細に説明します。

調整は例外として、製造におけるテストは、探索の問題というよりはむしろポイント比較です。すなわち測定が行われ、結果が与えられたリミットと照合され、合格または不合格が判定されるのです。探索は、特性試験または品質保証プロセスについてのみ適切です。

ここでは、これまで確定してきたテストを拡張して、テスト方法や条件も含めます。付録Aに詳細が記載されています。

1.水晶のチューニング／トリミング

測定：
周波数カウンタ

プロセス：
基準周波数を測定して、許容レンジ内の測定値が得られるようにトリミング機構を調整します。この値は、直接周波数精度（初期搬送波周波数の許容値[ICFT]テスト）に影響を与えるので、できるだけ厳格に設定されます（±1ppm）。

測定方法：
*Bluetooth*テスト・セットの周波数カウンタ機能、標準周波数カウンタ、またはスペクトラム・アナライザを使用します。この測定器は、高い絶対精度を持っているか、参照標準によってドライブされるものである必要があります。

2. 感度テスト

測定：

BER

プロセス：

テストモードのBluetoothテスト・セット（この場合Agilent E1852B）でDUTをページングし、使用しているチップ用のアプリケーション・プログラム・インタフェース（API）で適切なホスト・コントローラ・インタフェース（HCI）コマンドを用いてBluetooth無線機を起動することによりループバックを確立します。フィクスチャ損失を考慮に入れてDUTへの送信レベルを設定します。レベルは、特性評価プロセスにより決定されます。BERを測定して、仕様と比較します。複数の周波数でテストを行うことが適切な場合は、選択されたすべてのテスト周波数についてこれを繰り返します。

測定方法：

必要な速度に適したテストのためのビット数とテスト・ライン・リミットを選択します（付録A参照）。選択したビット数でのテストを行うためのテスト・セットをセットアップします。テスト・セットでBER測定のトリガをかけます。

3. 変調特性

測定：

ペイロードの規定のビット数での周波数偏移

プロセス：

テストモードのテスト・セットでDUTをページングし、使用しているチップ用のAPIで適切なHCIコマンドを用いてBluetooth無線機を起動することによりループバックを確立します。ペイロードの適切なビット・シーケンス（01010101または00001111）をDUTに送信を開始します。テスト・セットからDUTへの公称送信レベルを用いて、送信のトリガをかけ、ビット・シーケンスの偏差を求めます。複数の周波数でテストを行うことが

適切な場合は、選択されたすべてのテスト周波数についてこれを繰り返します。

測定方法：

Bluetoothテスト・セットやスペクトラム・アナライザなどのこの測定用にデザインされたBluetooth測定器を使用します。F0およびF1測定のトリガをかけます。

4. 初期中心周波数の許容値（ICFT）およびドリフト

測定：

Bluetooth RFテスト仕様で規定された指定ビット数での積分偏差。このテストは、初期周波数測定については、パケットの最初のビット（プリアンブル）で行われます。ドリフト測定では、パケット内の10ビットの積分とプリアンブル結果が比較されます。

プロセス：

テストモードのテスト・セットでDUTをページングし、使用しているチップ用のAPIで適切なHCIコマンドを用いてBluetooth無線機を起動することによりループバックを確立します。ペイロードで適切なビット・シーケンス（01010101）をDUTに送信します。テスト・セットからDUTへの公称送信レベルを用いて、送信のトリガをかけ、ビット・シーケンスのICFTとドリフトを求めます。複数の周波数でテストを行うことが適切な場合は、選択されたすべてのテスト周波数についてこれを繰り返します。

測定方法：

Agilent E1852BやESAスペクトラム・アナライザなどのこの測定用にデザインされたBluetooth測定器を使用します。ICFTとドリフト測定にトリガをかけ、結果をテスト・ライン・リミットと比較します。ICFTは、4ビット（4 μ s）から求められるため、必然的に雑音の多い測定です。平均化して必要な安定度のマージンを得ます。

5. 送信パワー調整と検証

測定：

RFパワー

プロセス：

ICの能力や校正と検証が実行されているかどうかにより、様々な方法でDUTのパワーを測定または校正することができます。もっとも簡単な方法は、Bluetoothテスト・セットでテスト・モードのBluetoothループバック条件をセットアップし、疑似ランダム（PN9）シーケンスを送信するようDUTをセットアップして、パワーを測定します。（周波数依存の）システムの損失係数を適用して、結果をテスト・ライン・リミットと比較します。もう1つの方法は、DUTの出力をパワー・メータに直接接続して調整を行います。そしてサーチをかけると、チップ・ベンダのデバイスAPIを用いてD/Aコンバータ（DAC）でDUT出力レベルが設定されます。この場合、検証プロセスはあってもなくてもかまいません。検証を行うのであれば、通常のBluetooth動作条件（すなわちテスト・モード）で行うのが最良です。

測定方法：

最高の確度を得るにはパワー・メータを使用することができますし、Bluetoothテスト・セットで平均またはピーク・パワー測定をすることもできます。方法は、DUTをどのようににセットアップしてBluetoothパケットや連続PN9などを送信するかによって異なります。

4. 他の重要な製造テスト課題

6. バッテリ電流対動作モード

測定：

ピーク、平均、デューティ・サイクルを求めるための電流対時間

プロセス：

電流は、検証中のモードに適切な期間で測定されます。これらのモードは、使用しているチップ用APIを用いて直接設定することができます。

測定方法：

Agilent 66319B/Dや66321B/Dのような高ダイナミック・レンジの電流測定機能を持つDC電源を用いて、*Bluetooth*無線機が対象のモードに入ったときに適切な電流測定(ピークまたは平均、あるいはその両方)をトリガします。付録Aに詳細が記載されています。

7. 受信信号強度指標

測定：

なし

プロセス：

これは、調整または検証となります。*Bluetooth*の仕様は幅が広いので、検証を行う場合には、信号をDUTに印加して、APIでDUTへの経路損失に関する問合わせを行います。3つのレンジがあるため、このプロセスでは3つの異なるレベルが印加されます。

測定方法：

*Bluetooth*テスト・セットや信号発生器などの*Bluetooth*信号を供給できる測定器を用いて、DUTのレベルなどを適切なレベルに設定します。結果は、入力レベルにより決定されたレンジの戻り値または直接測定されたレベル値です。

すべてのテストを選択し、その手法と条件をリストしたので、必要なテスト装置のリストを大幅に絞ることができました。テスト・ステーションの構築が次の論理的なステップです。しかし、ここで警告しておかなくてはならないことがあります。最初を選択した装置では、製造プロセスに必要な歩留まりとマージンがサポートされないかもしれません。また、レベル測定用のパワー・メータや周波数測定用カウンタなどの、より精度の高い測定が必要となる場合もあります。テスト・エンジニアは、システムのテスト方法、測定の不確かさ、システム校正の要件などを徹底的に調査して、必要な装置を的確に決定する必要があります。

シングルサイト・テストとマルチサイト・テストをある時点で決定しなくてはならないことはすでに述べました。シングルサイトは明らかにもっとも簡単なオプションです。しかし、マルチサイト・アプローチの決定を行うと、処理とスループットが制限され、テスト・ステーションの場所やテスト・ステーションのデザインなど、様々な他の決定を行わなくてはならなくなります。DUTとテスト・ステーションのインタフェースは、テスト・フィクスチャまたはテスト治具を経由して行われますが、ケーブルと同じぐらい簡単な場合もありますし、テストの効率化のために高度な回路を用いた非常に複雑なものになる場合もあります。このテスト・ステーションのデザインでは、複数のDUTのシーケンシャル・テストまたはパラレル・テストにも対処しなくてはならず、スイッチングの複雑さは測定器のコストや速度とのトレードオフとなります。

例えば、Agilent 93000テスト・システムは、信号を4つの経路に分割して、すべてのDUTに供給するので、他の3つの信号発生器のコストが不要になるという利点があります。テストを独創的に配列することも、コストの節約になります。例えば、1つのDUTには、受信機テスト用の信号を印加し、別のDUTでは送信機の検証を行うというように、複数のリソースを同時に使用することができます。このようなデザインにより、スループットを増加させることができますが、送信および受信のテスト時間を使用する他のテストに依存します。

最後に、必要な製造マージンを得るためにテスト・ライン・リミット(TLL)を決定するという問題が残っています。このプロセスは、歩留まりと製品品質に影響を与えます。テスト・エンジニアは、テストごとに、デザインの平均と標準偏差を決定する必要があります。同様に、測定器とフィクスチャの両方を含むテストの測定の不確かさも求める必要があります。このためには、一定のマージンで期待される歩留まりがどれだけであるかを判断するために利用可能な分布モデルを作成する必要があります。

このトピックスについては、付録Dで詳細に説明します。

5. まとめ

このアプリケーション・ノートでは、上位レベルのテストから詳細なテストまでBluetooth製造テストについて説明してきました。最初に、Bluetooth製造環境を説明し、次に新しいBluetooth対応製品を製造する際にテスト・コストを減らす必要性を示しました。そして、完全な製品機能の保証や品質標準の維持など、テストを行わなくてはならない様々な積極的な理由を強調しました。

また、製造テスト・プロセスについては、図表を用いて説明しました。まず最初に、最終的にテスト・プロセスに影響を与え、これを形作ることになる上位レベルのビジネスおよび戦略的な検討事項について述べました。次に、各フェーズについて多少詳細に説明しながらBluetoothテスト・プランがどのように導かれるかを順を追って示しました。パラレル・テスト、DUTフィクスチャの作成、テスト結果の判定など他の重要な製造課題についても説明しました。関心のある方々のためには、上記のトピックスおよび関連するトピックスについて付録でより詳細に説明します。

一冊の文書では、(特にBluetoothのような複雑で干渉を起こしやすい領域では)すべての製造シナリオのすべての偶発事項を網羅することはできません。しかし、本書で原理と手順を学び、用途に応じてカスタマイズすることにより、会社、製品、目標市場にもっとも適したテスト計画を立てることができるはずです。

様々なBluetoothトピックスに関する最新情報については、弊社のBluetoothウェブサイトwww.agilent.com/find/Bluetoothをご覧ください。Agilentの連絡先については、本書の裏表紙をご覧ください。Bluetoothについての疑問、関心、問題などがありましたら、ご連絡ください。

付録A： 詳細なテスト手法とテスト条件

A.1. 感度測定

感度は、受信機がかすかな信号を正確に変換する能力の指標です。デジタル変調の無線機システムでは、この精度はエラー受信ビットのパーセント値であるビット・エラー・レート (BER) として表されます。システムのBERは常に、与えられたレベルでの最大値として表されます。*Bluetooth* の仕様では、受信ポートに -70dBm を印加したとき 0.1% のBERです。これはS/N比の指標であるため、一般にクリーンな信号で行われます。しかし、*Bluetooth* の仕様では、認証用に減衰した信号を規定しています。したがって、0.1% のBERのレベルは、クリーンな信号でのものより低くなる可能性が高くなります。改善値は約2dBです。

BERは、本来確率的な測定値であるため、このガイドラインを設定する際には、必要な信頼度レベルが達成できない測定を行わないように注意してください。つまり、測定が有効で、信頼度レベルが適切であると考えられる測定時間またはビット数を規定しなくてはならないということ

です。図5には、95%の信頼度のBER曲線が示されています。たとえビット数が100万であっても、BERが0.095%以下である場合にのみ0.1%のBERで95%の信頼度が達成できることに注意してください。このグラフから、必要な動作点を選択することができます。(直接測定時間に影響を与える) ビット数を選択して、テストから読みとることのできる最大BERを求めます。例えば、95%の信頼度で0.1%の仕様を確定するには、読み取り値が0.07%未満である場合には、23,000ビット使用すればよいのです。時間の節約はかなりのものになります。DH5パケットのBERテストでは、160万ビットで約4秒かかるのに対して、テスト時間は100 ms未満となります。

感度は、確立された無線リンクを用いたり用いなかったりするいくつかの方法で検証することができます。両方とも有効な方法です。リンクを用いない場合、選択したレベルで変調した信号 (パケット化が含まれることもある) を印加し、ベンダの制御ソフトウェアの特別なサブルーチンでBER結果をフィードバックすることができます。これには通常、簡単に

評価できる擬似ランダム・データを採用しています。(例えば*Bluetooth*仕様のPN9)

この方法は有効ですが、「ライブな」リンクの利点は言うまでもありません。ですから、シミュレートされたリンクで感度を測定することも検討すべきです。測定を実行するには、以下ものが必要です。

- *Bluetooth*無線機
- *Bluetooth*送信機パワー制御
- DUTから送信されたデータのビット・エラー・レートを測定する手段

Agilent E1852B *Bluetooth*テスト・セットなどの様々なワンボックス・テストにはこれらの機能が搭載されています。

A.2 電流対動作モード

動作時間は、すべてのバッテリー駆動*Bluetooth*デバイスにとって重要なパラメータであり、ユーザにとっては重要な購入基準となります。電力消費の削減は、*Bluetooth*設計の早い段階から一番の優先事項であり続いています。今でも、*Bluetooth*チップ・デザインを分割して、各部分を動作ステートの関数として遮断できるようにすることが検討されています。しかし、この方法は、主として知的所有権の問題があります。したがって、デザインの検証や管理、シリコン製造プロセスの有効性に関して、バッテリー電流ドレイン測定が重要です。非常に低いレベル (数十から数百 μ A) まで広い範囲のバッテリー・ドレインがある上、*Bluetooth*にはパルスの性質があるため、電流測定装置は大きなダイナミック・レンジを持ち測定ピーク、rms値、DC電流を測定する能力を持つことが要求されます。

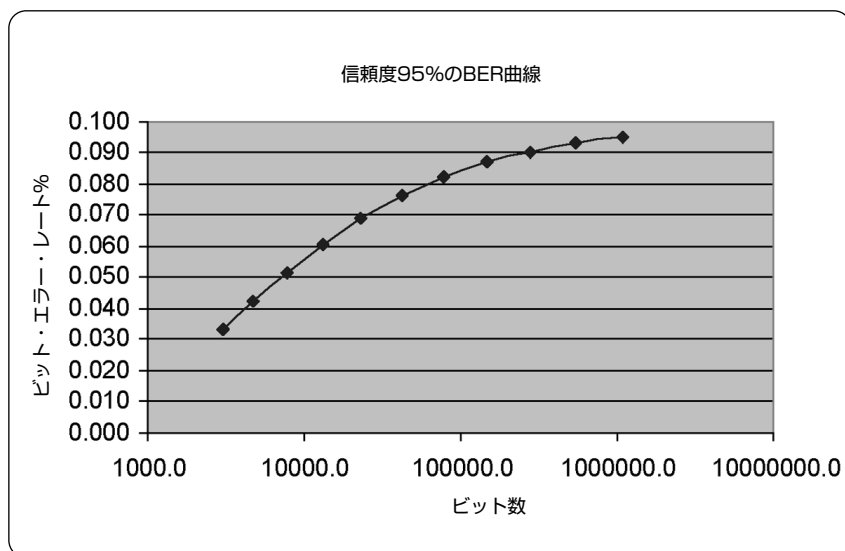


図5 95%の信頼度レベルを表すBER曲線

A.2.1

バッテリー電流ドレイン対動作 ステート

*Bluetooth*デバイスには数多くの動作ステートがあり、それぞれが、対応するパワー・ドレインである機能を提供しています。これによって、ネットワーク化されたデバイスの性能が向上するとともに、バッテリーの動作時間が最適化されます。仕様化された動作時間を保証し、テストを最小限にするために主なステートを識別する必要があります。*Bluetooth*アプリケーションは様々であり、主な動作ステートは大きく異なるため、このステートを正確に識別するのは困難です。このステートは、デバイスのアプリケーションによっても、その動作のダイナミック・レンジによっても異なります。ICベンダはHCIで回路ブロックを直接制御することがあります。これは主にシリコン製造プロセスの確認のためであり、必ずしも標準機能のためではありません。主要な動作ステートは、大きく分けて4つに分類されます。

A.2.2

動作ステートと電流ドレイン特性

• アクティブ・コール・ステート動作

最大レベルの電力消費は、*Bluetooth*デバイスがリンクされ、アクティブにホスト・ネットワークと通信を行うときに生じます。ここでは、パルス電流を引き込むデジタル送信フォーマットを使用し、その期間は1.25msの倍数です。アクティブ・コール・ステートの消費電流を図6に示します。

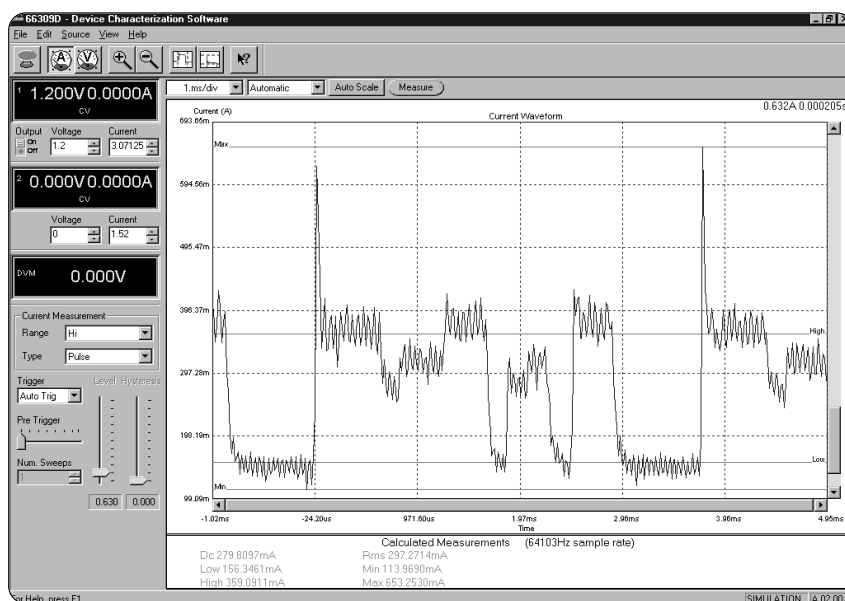


図6 Bluetoothデバイスのアクティブ・コール時の電流ドレイン波形の例

• スタンドバイ／スキャン・ステート動作

ネットワーク化されていない場合は、*Bluetooth*デバイスはスレープとして動作し、中または低パワー・レベルのスタンドバイの状態です。1.28秒ごとのスキャン中、デバイスは11.25msの間ウェークアップし、問い合わせやページを受信したり、チェックします。この結果、パルス・ドレインの繰り返し周波数とデューティ・サイクルが低くなります。スタンドバイでマスターとして動作している*Bluetooth*デバイスは、アクティブ・コール・ステートと同様に、アクティブにページングと問い合わせコールを送信しています。HCIによる直接制御により、デバイスはしばしばこのモードになります。

• 低パワー動作モード

非アクティブの期間中、*Bluetooth*デバイスを、長期間PARK、HOLD、SNIFFなどの低パワー動作モードに置くことができます。電力を節約するため、デバイスはスリープ・モードに入り、わずか数十から数百 μ Aという電流しか消費しません。

• バッテリーの充電(適用可能な場合)

再充電可能なバッテリーを備えたハイパワー*Bluetooth*デバイスの場合、通常充電機能が組み込まれています。充電を正しく管理するため、製造テスト中に電流と電圧が測定され校正されます。

A.2.3
バッテリー電流ドレイン測定と
Bluetoothテストの要件

動作の主要モードに対して、特別な
テスト・システムが必要となります。
この概要について表6に記載します。

表6
Bluetoothバッテリー電流ドレイン測定と製造要件の概要

Bluetooth動作 およびテスト・パラメータ	テストの理論的根拠	測定装置の要件
アクティブ・コールおよびページ/問合せステート		
DC電流	アクティブの場合のバッテリー動作 時間の仕様を満足することを保証する。	高クレスト・ファクタの処理 DC平均レベル（通常数十mA～1A）について、 精度0.5%以上 msの波形期間にわたる高速で正確なアペレーシングに 適した統合システム。
高レベル電流 ピーク電流	寿命前のバッテリーの最小電圧遮断に 対する保証	高速パルス信号、高レベルおよびピーク・レベルの 検出回路、またはアルゴリズムを内蔵。
スタンバイ/スキャン・ステート		
DC電流	スタンバイの場合のバッテリー動作 時間の仕様を満足することを保証する。	高クレスト・ファクタの処理 平均レベル（通常数十mA～1A）について、 精度0.5%以上 （1秒以上の）長さの波形期間にわたる高速で正確な アペレーシングに適した統合システム
低パワーおよびオフ・モード		
DC電流	オフの場合の予想しないバッテリー・ ドレインに対する保証 コンポーネントとアセンブリの 潜在的な不良を検出	低レベル電流測定レンジ、約10mA 10μA以上の測定精度 安定した値に対する適切な測定遅延および積分時間
バッテリー充電モード		
DC電圧 DC電流	デバイス校正の部分 適切なバッテリー充電機能の 保証	0.5%以上の精度で充電（負）電流（通常最大1A） を測定。 0.2%以上の精度で充電電圧 （通常最大9V）を測定 追加 直流電源は定電圧負荷およびシンク 充電電流として2倍にして充電を 行い、バッテリーをエミュレートする。 充電電流を提供する第2DC電源

A.3
－20dBスペクトラム測定

－20dBmスペクトラム測定は、
Bluetoothを簡単に確認できるトレード
マークです。この仕様では、疑似
ランダム・データを変調する場合、
－20dB帯域幅は1MHz幅未満にす

ることが規定されています。この仕
様では、搬送波周波数あたり10秒以
上かかるテスト方法が提案されてい
ます。また、測定中はループバッ
ク・テスト・モードを採用すること
も指定されています。製造では、ど
ちらの条件も見送ってかまいません。
スペクトラム・アナライザは、100ms
未満で継続的に変調されている送信
機の波形を取り込むことができます。
Bluetooth ICベンダがこの機能を制御
ソフトウェアで提供する場合、送信
機の代表的なスペクトラムを測定す
ることができます。データのランダム
性が欠けているため、結果は、SIG
測定と異なるはずですが、変調指数、
歪みのメカニズムなど送信機の物理
的な過程はまったく同じです。

付録B： Bluetooth無線機トポロジーの意味

B.1 無線機トポロジー

トポロジーとは、あるデザインが、そのデザインに課された要求事項を達成する方法のことです。すべてのBluetooth無線機デザインは、チップ・ベンダごとに異なります。デザインへのアプローチが異なると、ある落とし穴には抵抗力を持ち、別の落とし穴には抵抗力がなくなります。

図7のデザインは、フェーズ・ロック・ループの信号合成、送信機および受信機用共通発振器、送信機のレベル・コントロール（おそらく拡張レンジ用のパワーアンプ付き）、スイッチド・フロント・エンド、アンテナのフィルタを統合したものです。受信経路については、アプリケーションにより、拡張レンジ（またはクラス1動作）用の低雑音増幅器、チューニング回路でのFM復調付きの中間周波数（IF）への標準ダウンコンバージョン、アクティブまたは非アクティブのRSSI回路が使用されることもあります。

これを図8のより高度なデジタル・デザインと比較します。

このデザインでは、周波数合成は、送信機と受信機でやはり共通ですが、ここではIQ変調となっています。アンテナ・スイッチやフィルタなど他の特長は、フィルタがチップ外であると仮定されていることを除けば、ほぼ同じです。受信機がアナログ・ディスクリミネータを利用していないことにも注意してください。

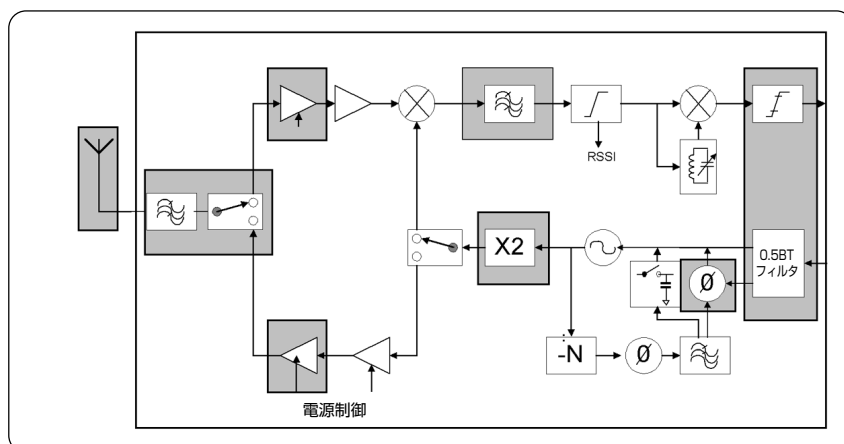


図7 アナログ技術を用いたBluetooth RF無線機デザイン

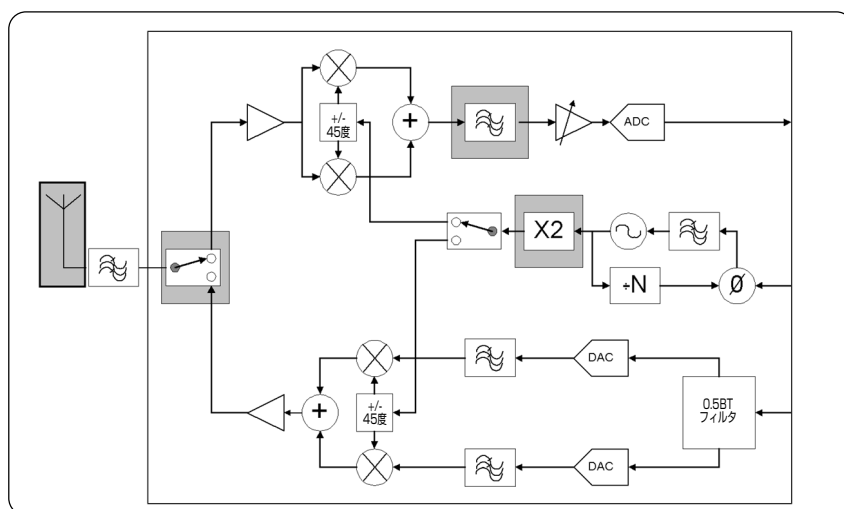


図8 デジタル技術を用いたBluetooth RF無線機デザイン

B.2 送信機の属性

変調をどのように搬送波に乗せるのかという疑問について考えてみましょう。図7と8は、IQ変調器を持つデザインとバース中にロックを解除して周波数偏移を搬送波に乗せるフェーズ・ロック・ループを持つデザインを示しています。前者は、周波数ドリフトの影響を受けやすく、後者は

ロットごと、ダイごとに変化する「仕様化されていない」パラメータ（ほとんど予測のできない現象）に大きく依存します。一方、IQ変調デザインでは、大規模な校正が必要になることがよくあります。

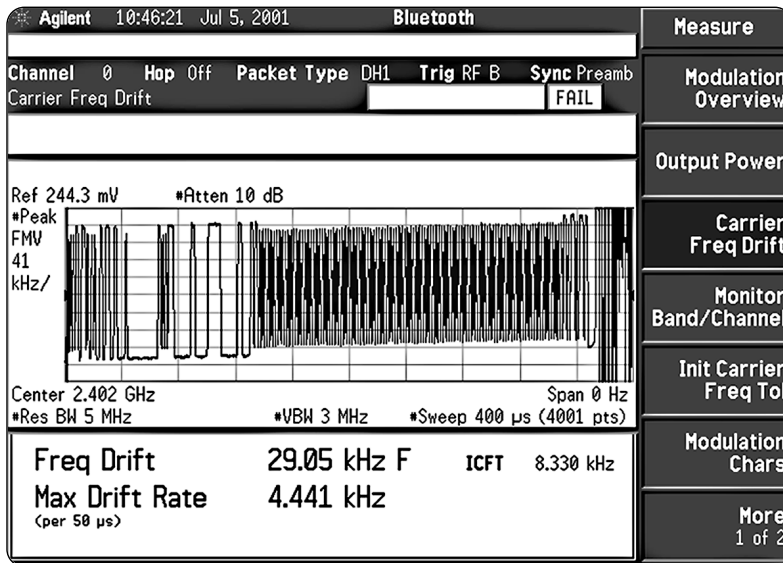


図9 Agilent ESA-Eスペクトル・アナライザによる周波数ドリフトの表示

ここでは、このデザインから予想される送信パワーを考えます。様々な疑問が起こります。これは、クラス3のRFパワーの100倍を送信できるクラス1デザインでしょうか？もしそうであるなら、送信は別のRFステージで行われるのでしょうか？そうであれば、ベンダは何を保証または測定しているのでしょうか？-20dBスペクトラム・テストを再考する必要があるかもしれません。最終製品がバッテリーで駆動される場合、より精度の高い出力レベル調整でパワー出力を制御することが大切です。これは校正する必要があるのでしょうか？また校正を行わずにチップはうまく動作するのでしょうか？

B.3 送信機校正

校正についてはさらに多くの疑問が起こります。RSSIフィードバックのために出力レベルが動的に調整される場合、このデザインはこの調整を正確に行うのでしょうか？または適切な送信パワー・ステップ・サイズを保証するためにユニットごとに校正を行わなくてはならないのでしょうか？校正は、時間と性能のトレードオフです。校正が行われた場合、確

度と均一性は向上しますが、より多くの時間がかかります。校正を行う決定をした場合は、校正方法、校正ポイントの数、繰り返しの数、校正時間などを決める必要があります。

送信機のスペクトル成分は特に問題です。IQ変調方式は通常FM/フェーズ・ロック・ループ・デザインよりも厳格に規制されています。これには、変調特性や送信帯域幅パラメータ（-20dBスペクトラム・テスト）が含まれています。図9に示されていないのは、送信機から漏れる潜在的な周波数変換に伴うスプリアスです。これらが起こる場所や相対的なレベルは、これがどこで生成され、主要信号に重畳されたか、そしてこれらが必要な信号と同様に増幅されたかどうかによって異なります。ICベンダによって提供される送信機のブロック図を考察すると、糸口がつかめます。しかし、RFデザインとテストの場合は、実際の測定の代わりになるものではありません。

C.1 送信機（変調特性の性能）

一般に、変調特性はレベルとともに変動してはいけません。しかし、周波数については同じことが言えません。変動特性対周波数テストでは、おそらく2つの結果のうちの1つが生じるでしょう。1つは、すべての周波数が、ほとんど同じ値の変調指数を示します。この場合、帯域内の1つの周波数だけをテストする必要があります。もう1つは、変調指数は、周波数とともに増加または減少します。このことは、2つの関連する問題を引き起こします。まず、最小の指数は、ピコネット内でその無線機に対して可能なリンク・バジェットを減少させます。なぜなら、 β が低くなると、S/N比、すなわち感度が低くなるためです。しかし、 β があまりにも高すぎると、帯域が大きくなりすぎ、仕様に合わなくなります。この状況を分析すれば、低 β の方が望ましくないと考えられます。この場合は、これが発生する周波数点でテストを行います。より保守的なアプローチは、数多くの周波数でテストを行い、その結果を例えば-20 dB帯域などで、IC製造メーカのデータと比較することです。この結果を相関させ、ICレベルおよび機器（機能）レベルでのテストを最適化することができます。

C.2 送信機（パワー）

出力パワーは、非常に重要なパラメータで、前述のように校正することができます。校正するしないに関わらず、大規模な校正を行わない限り、増幅器、フィルタ、アンテナの経路の周波数特性はほとんどフラットではありませんし、Bluetooth製造ではこのような校正を行うことは通常必要です。全体の周波数応答に注意してください。フラットですか？中心でピークになりますか？中心を外れていますか？予測不能ですか？

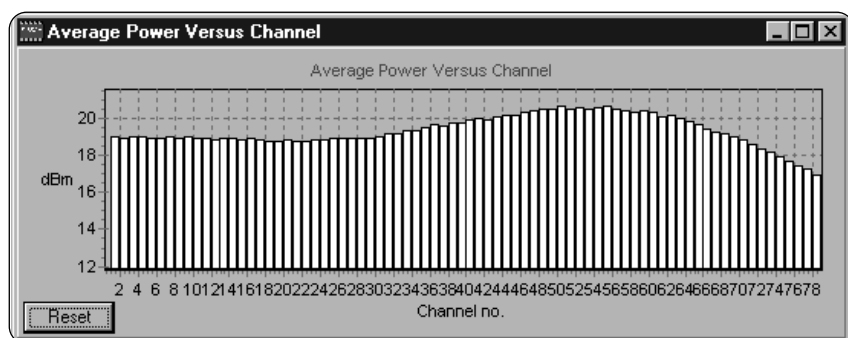


図10 パワー対チャンネルのトレース表示

図10では、パワー対チャンネル(周波数)のトレース表示が示されています。この例では、応答は中心をはずれたところでピークとなっており、最高周波数のところで低下しています。これが標準特性で、どの点でもあるレベル未満に低下しないようなデザインにしたい場合、帯域の上端に的を絞るべきです。逆に、最低パワーで高い周波数と低い周波数が不規則に変化する場合には、その両方を測定すべきです。さらに重要なことは、パラメータがIC内で変動していることが疑われることですが、これはたいへんめんどうなことです。特性を明らかにするため、高い周波数と低い周波数だけでなく、中間の周波数も測定した方がよいかもしれません。さらに、2つの帯域(低い帯域と中間の帯域など)間の比は、特に注目すべき検証可能な数値となるでしょう。

C.3 受信機(感度)

感度は、Bluetooth対応機器においてはもっとも重要な受信機パラメータです。SIG仕様では -70dBm 未満でBERが 0.1% となっています。これは、送信機の信号の異なるパラメータを変更することによって測定された値です。実際に使用する場合、このような極端な条件は通常起こりません。したがって、製造の場合には、テストを簡略化してもかまいません。図11に示すような場合、デザインの性能は、S/N比の問題で、すべてに優先する影響はレベルです。

このグラフは、約 -84.5dBm の測定感度を示しています。このデザインをさらに調査すると、信号が約 3dB 高い場合、タイミング・エラー、周波数オフセット、ドリフトの不良は、

BERの主な原因ではないことが明らかになりました。このような情報は、認証用に設計されたSIGテストからはなかなか得られません。その代わりに、条件を別個に調査し、その応答でデザインを解析すべきです。この場合、欠陥に対して 3dB もの劣化を考慮に入れても、性能はまだSIG仕様よりも 10dB 優れています。これは、このデザインのすばらしいセールス・ポイントであり、不良を許さない高マージン感度テストが可能になりました。さらに、このテストは非常に再現性があり、(シリコン、電源、対象機器、近接回路の雑音などすべてが原因となる)回路の雑音性能などのもっとも重要性の高い分野を扱っています。

開発中と製造中にこのように複雑なデザイン特性を考えることにより、製品に対して、より正確で、合理的で、効率的なテスト・プランを作成できるようになります。

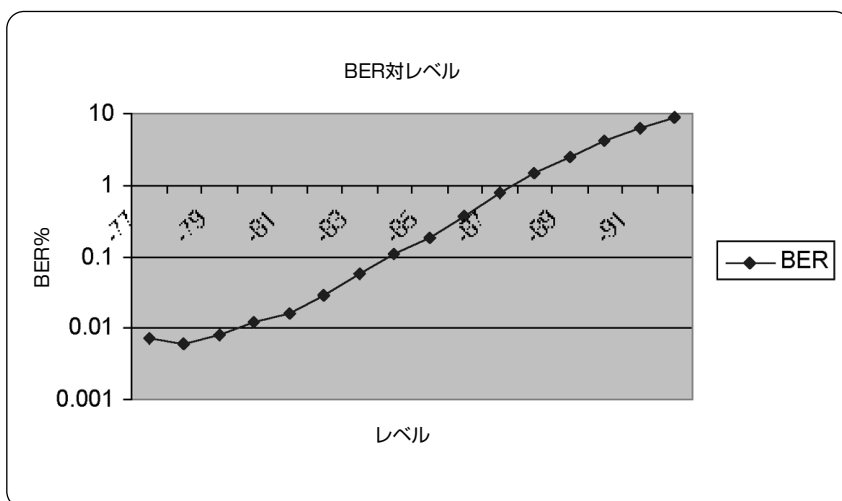


図11 ビット・エラー・レート (BER) 対レベルを示す感度測定

付録D： 他の製造課題の詳細

D.1 パラレル・テスト

パラレル・テストとDUTインタフェース(制御とRF)は、テスト・ステーションのアーキテクチャとデザインの大きな決定要因となります。例えば、真のパラレル・テストを行うことにした場合、二重のテスト装置が必要になります。DUT接続は決して易しいものではありませんし、またDUT間には確実に分離する必要があります。各DUTはテスト装置に直接接続されるため、これはいくらか簡略化できるかもしれません。

一方、一度に n 個のDUTをテストするシーケンシャル手法を選択した場合、テスト領域で装置を各DUTに切替える必要があります。こうすれば必要な装置を最小限にすることはできますが、切り替えと校正も複雑になります。システムの各コンポーネントがどのように使用されるのかを評価し、必要なスループットや量に適したバランスのとれたリソース共有システムを作成するのに必要なコンポーネントだけを二重化するという中間的な手法もあります。もちろん、これにはより複雑なソフトウェアが必要ですし、スイッチングは直接接続より複雑になります。

D.2 DUTインタフェースとフィクスチャの作成

DUT接続(特にRF接続)は、慎重に計画する必要があります。*Bluetooth*はRF技術で、*Bluetooth*対応製品は一般に大量かつ低コストで製造されるため、テストは直接接続ではなく放射または結合接続で行う必要があります。

す。この方法をとると、パラレル・テストの場合には隣接ユニットの問題が起こります。他のDUTを適切に分離しないとこれらのDUTからのRF干渉により「妨害」が起こるためです。したがって、テスト・フィクスチャは、ユニット間が十分分離されるようにしないと、正しいデータを得られません。

D.2.1 フィクスチャの性能

RF筐体またはフィクスチャ・デザインについて詳細に述べることは本書の範囲ではありません。しかし、多くのテスト(例えば受信機の感度や送信機のパワー出力)がフィクスチャの性能に大きく決定的に左右されることに注目する価値はあるでしょう。

Agilentを含む多くの会社は、アイソレーションを保証するためにRFテスト・フィクスチャにシールドを行っています。アイソレーション、制御(RFリーケージはここでも起こります)、スイッチングなどのインタフェースの問題が解決されていると仮定すると、「性能」とは、フィクスチャが損失に対して校正されており、長期にわたり損失特性を維持することを意味します。校正と損失特性は、信頼度の高いテストを行うために取り組むべきテスト確度の主要な決定要因です。

図12は、DUTのテスト・システムへの物理的な接続とフィクスチャの媒介としての役割を图示しています。フィクスチャには、電源やオーディオ回路などが含まれていることに注意してください。これらが含まれるとフィクスチャ・デザインはさらに複雑なものになります。

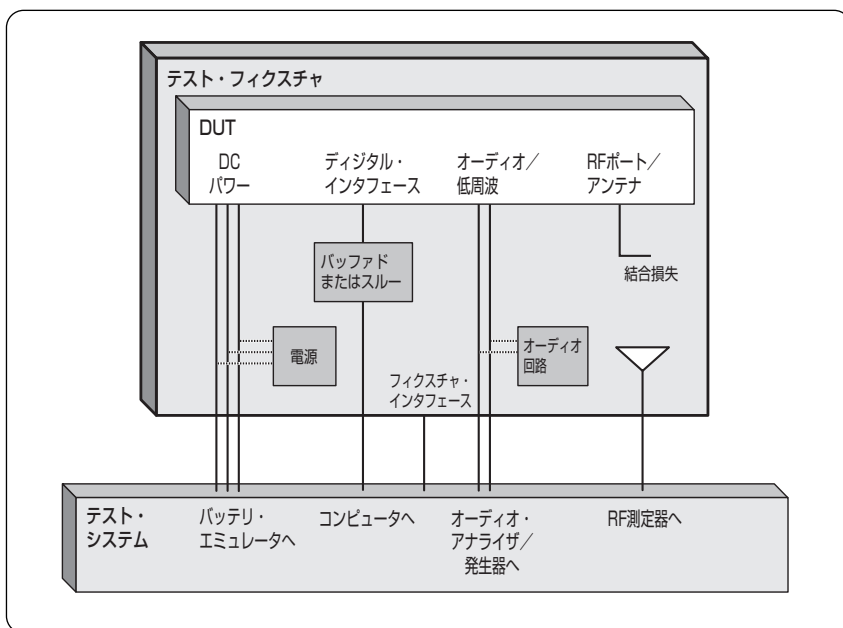


図12 Bluetooth DUTのモデルおよびフィクスチャを介してのテスト・システムへの接続を示す図

注：DC電源からの接続は、バッテリー・エミュレータまたは電源のいずれかへのものです。同様にオーディオ/低周波からの接続は、オーディオ・アナライザまたはオーディオ回路のいずれかへのものです。代替電源またはオーディオ回路への接続は点線で示してあります。

D.2.2 フィクスチャの校正

フィクスチャを校正するには、最初にフィクスチャが使用される周波数での損失を求める必要があります。この損失を測定する必要がありますが、測定を行うとすぐ様々な測定の不確かさがあることに気づきます。例えば、校正信号の確度、パワー・ディテクタ測定の確度、定在波比 (SWR) の相互作用、校正信号とフィクスチャ間の不確かさ、フィクスチャとパワー・ディテクタ間の不確かさなどです。また、フィクスチャでは損失の計算用語dBを使用しますが、これ自体にも不確かさがあり、DUT測定にさらに影響を与えます。

不確かさは、DUTとフィクスチャの間やフィクスチャとテスト・ステーションの間のSWRによって生じます。また、損失値そのものの不確かさもあります。テスト・ステーションのディテクタが、校正に用いられるディテクタと異なる場合、さらに不確かさが大きくなります。このように様々な不確かさの要因があるため、以下の文書で測定の不確かさを調べてください。

- 国際標準化機構 (ISO) : "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" Second Edition, 1995
- Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results" NIST Technical Note 1297, September 1994, U.S. Government Printing Office

- Sherry L. Read and Timothy R.C. Read, "Statistical Issues in Setting Product Specifications" Hewlett Packard Journal, June 1988, pp.6-11

D.2.3 フィクスチャの再現性

再現性とは、同一条件下で同一信号を読みとる際の同一性の程度を定量化するのに用いられる用語です。これには一般に、環境から生じる信号に伴う雑音の量が含まれます。フィクスチャで損失値 (dB) が時間とともに変化する場合、テスト結果はその変化に応じて偏りが生じます。これが顕著な場合、この変化はフィクスチャの校正では対応できないほどになります。

したがって、この問題の解決策は、損失値の変化を引き起こす要因を理解し、これを除去することです。例えば、テスト・ステーションのスイッチが時間とともに変化する場合は、RFテストには再現性の高いスイッチだけを使用すべきです。また、RFコネクタ・インタフェースは時間とともに劣化します。特に頻繁に取り替えられたり変更されたりした場合はなおさらです。したがって、すぐれたデザインとは、使用されるRFコネクタの数を最小にしたものです。フィクスチャの振動感度も、1つのアンテナから別のアンテナへのカプリングなどの接続の完全性を劣化させる場合があります。場所も関係してくることがあります。*Bluetooth*アプリケーションでは、近傍界カプリングは一般に遠方界カプリングに対立するものとして使用されますが、近傍界カプリングは特に場所に敏感で、数十ミリメートルのオフセットが、読取り値に数十dBの影響を与える場合があります。

D.3 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。

D.3.1 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%を超えるはずですが、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指するのが自然です。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13**はTLLを視覚化したものです。

D.3.2 仕様設定モデル

この図は、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。 $n \cdot \sigma$ は、製造メーカー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とした正規分布に「すること」なのです。

D.3.3 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。

D.3.4 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取り、保守的な手法の場合は標準偏差 (つまり平均値 + $2 \cdot \sigma$) を含めます。

D.3.5 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に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1dBの製品は、不確かさが0.2dB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、過度のバッテリー消費を避けるのが最良です。この場合、パワー・メータの精度は、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。

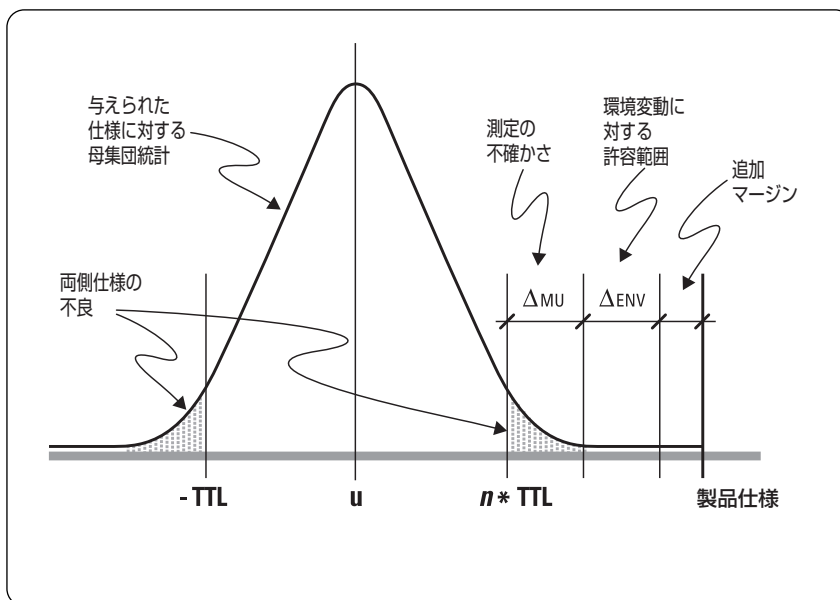


図13 仕様 (TLL) 設定モデル

付録E：
*Bluetooth*技術用のアジレントの
テスト装置

E.1
*Bluetooth*対応のテスト装置

1. *Bluetooth*テスト・セット、E1852B
標準*Bluetooth*プロトコルでリンク
を確立し、*Bluetooth*トランシーバ
の性能を検証
2. 信号発生器、ESG-Dシリーズ (3～
4GHz)、オプションUND、UN7、
UN8
送信機テスト用*Bluetooth*信号、受
信機テスト用カスタム*Bluetooth*変
調干渉信号、*Bluetooth*受信機の
BER解析
3. スペクトラム・アナライザ、ESA-Aシ
リーズ (3～26GHz)、*Bluetooth*バン
ドル (オプション303、304)
*Bluetooth*送信機測定用自動「ワン
ボタン」テストの実行。広帯域の
スペクトル測定を実行。
4. EPMパワー・メータと
E9320パワー・センサ
迅速、簡単、かつ正確な*Bluetooth*
送信機パワー測定
5. シミュレーション・ソフトウェア、
*Bluetooth*デザイン・ガイド付きADS
カスタム*Bluetooth*システムのデザ
インとシミュレーション用ソフト
ウェア・ツール。事前に定義された
*Bluetooth*コンポーネント・モデル
は、シミュレーション・プロセス
の高速化に役立つ。ESG-Dシリー
ズと89600シリーズにリンク可能

E.2
他のテスト装置

1. ベクトル・シグナル・アナライザ、
89400/89600シリーズ
完全な*Bluetooth*送信機測定で多彩
な高精度の信号解析。コンスタ
レーション・ダイアグラムとア
イ・ダイアグラムを含む*Bluetooth*
信号の変調品質解析
2. DC電源、66319B/D
バッテリー・エミュレーション付き
の高速なプログラマブル・ダイナ
ミックDC電源
3. ロジック・アナライザ、
16700シリーズ
複数のプロセッサ／バス・デザイ
ンの広範なシステム・レベル・デ
バッグ
4. ミックスド・シグナル・オシロスコー
プ、54620シリーズ
*Bluetooth*ベースバンド信号の検証
とデバッグ
5. ネットワーク・アナライザ、8753E
シリーズ
アンテナVSWRの測定

E.3
アクセサリ

1. オシロスコープ・プローブ、54006A
超低キャパシタンス (0.25pF) のパッ
シブ・プローブ
2. クローズ・フィールド・プローブ、
11940A
最大1GHzの磁界放射
3. スプリッタ、11667A
比測定と等パワー分割
4. 方向性カブラ、773D
2つの*Bluetooth*デバイスをケーブル
で接続して、1つのRF波形を監視
5. デュアル方向カブラ、772D
2つの*Bluetooth*デバイスをケーブル
で接続して、両方のRF波形を監視

付録F：
参考文献

公式 *Bluetooth* Webサイトである
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、イベント、スペシャ
ル・インタレスト・グループ (SIG)
に関する情報が記載されています。

1. *Specification of the Bluetooth
System – version 1.1, Volume 1*
“Core,” February 22, 2001,
Bluetooth SIG
2. *Specification of the Bluetooth
System – version 1.1, Volume 2*
“Profiles,” February 22, 2001,
Bluetooth SIG
3. *Bluetooth Test Specification –*
RF A:2, 20.B.153/0.9,
March 24, 200, *Bluetooth SIG*
4. *Bluetooth RF Measurement
Fundamentals*,
Agilent Application Note
AN 1333-1
(カタログ番号：5988-3760EN)
5. *Bluetooth RF Testing—The Right
Test for the Radio Design*,
Agilent article, May 2000
6. *Agilent Technologies’ Bluetooth*
無線LANテスト製品システム、/
サービス、Brochure
(カタログ番号：5988-4438JA)
7. *Bluetooth* モジュールの調査、
Agilent Application Note
AN 1333-2
(カタログ番号：5988-2417JA)
8. *Considerations When Selecting a
System Power Supply for Mobile
Communications Device Testing*,
Agilent Application Note
AN 1310
(カタログ番号：5968-2424E)

注：参考文献4～6および7～8は、
www.agilent.com/find/bluetoothの
Agilent *Bluetooth* Webサイトで入手可
能です。

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。製品の製造終了後、最低5年間はサポートを提供します。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、製品の測定精度の維持をお手伝いします。

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
(12:00～13:00も受付中)
※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**
(0426-56-7832)

FAX ☎ **0120-421-678**
(0426-56-7840)

E-mail: contact_japan@agilent.com

電子計測ホームページ

<http://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 2002

アジレント・テクノロジー株式会社



電子計測UPDATE

www.agilent.com/find/emailupdates-Japan

無料の電子メール情報

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。ご購入いただいた方には、選択された分野に関する最新情報を定期的にお届けします。対象となる分野は、サポート、製品とサービス、アプリケーション、プロモーション、イベント、その他です。購読の中止や選択分野の変更も簡単にできます。

購読申込みはこちらから：<http://www.agilent.com/find/emailupdates-Japan>

Agilentは皆様のプライバシーを尊重し、保護することをお約束します。皆様に対する当社のお約束の内容は、<http://www.agilent.com/go/privacy>にある当社のプライバシー・ステートメントに記載されています。Agilentのプライバシー方針に関するご質問はprivacy_advocate@agilent.comまでお寄せください。



Agilent Technologies

July 31, 2002
5988-5412JA
0000-00DEP