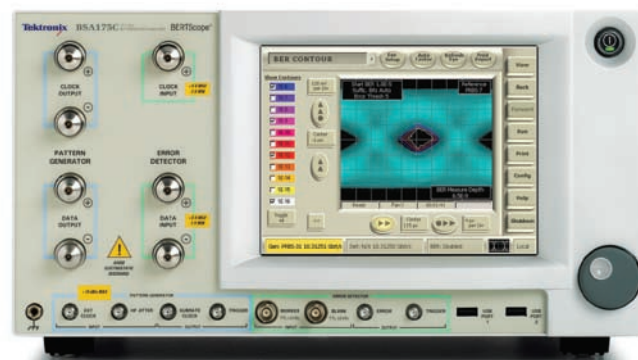
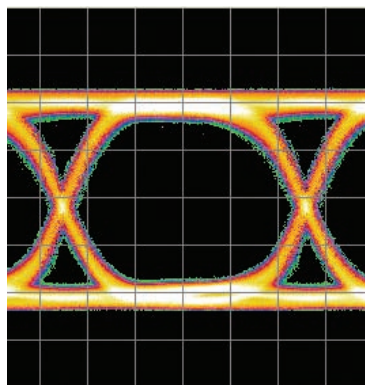




BER等高線入門 — アイ・ダイアグラムとBER

概要

このアプリケーション・ノートでは、BER等高線測定の概要について説明します。具体的には、BER等高線とは何か、どのように構成され、ギガビット・スピードでのパラメータ性能に有効な観測方法である理由について説明します。さらに、BERTScopeビット・エラー・レート・テストによるBER等高線の例についても説明します。

Bits	56,718,374,656
Errors	14,134

図1. 単純なBER

BERとアイ・ダイアグラム — どちらも完全な描写でない理由

ほとんどの通信リンクは、送信先において何ビットが到着エラーとなっているかというBER（ビット・エラー・レート）性能で判断されます。BERT（BERテスト）は、学校におけるテストのように、リンクのテスト点数を10点中の9点、または10点中の1点などと知らせます。この方法では、どうしてその点数になったのか、どうすれば良い点数がとれるのかという質的な情報は得られません。このため、従来はサンプリング・オシロスコープでアイ・ダイアグラムを観測します。

アイ・ダイアグラムは、パラメータ性能を直感的に観測できる方法です。正しく表示されると、すべてのパターンが順々に重ね書きされて目（アイ）のように表示されます。すべてのパターンが組み合わされて表示されると、ジッタの影響による立上り時間、オーバーシュート、アイの閉じ具合などが容易に観測できます。では、なぜアイ・ダイアグラムがリンク性能の中心的な測定方法にならないのでしょうか。

ここで大きな問題となるのが、通信リンクで設定されている期待値です。リンクで求められるのは10点中の9点、100点中の99点ではなく（無線接続ではそのような場合もありますが）、多くのハイスピード・リンクでは1,000,000,000点中の999,999,999点、すなわち 1×10^{-9} のBERあるいはそれ以上で正しく伝送されることが求められています。10⁻¹²が規定される場合もありますが、多くのシステム・ベンダはコンポーネント納入業者に対して10⁻¹⁵以上の証明を求めています。

アイを構築するため、サンプリング・オシロスコープでは電圧サンプルを測定します。この電圧のスナップショットは、次に示す理由により、測定されるBERポイントとは違ったものになります。



図2. アイ・ダイアグラム

1. まず、一度に取込めるのは信号のごく一部でしかなく、1秒間に数十万回のレートでしかありません。実際のデータ・ビットは、1秒間に100億回（10Gbpsリンクの場合）です。このサンプリング・レートでは実際に何が実際に起きているかは判断できません。サンプリング・オシロスコープでは、1,000,000,000ビット中の1ビットのエラーであっても取込むことはほとんど不可能です。
2. サンプリング・オシロスコープとBERTでは、データの取込方法が大きく異なります。サンプリング・オシロスコープは、非常に広い周波数帯域を持っていますが、サンプリング・レートが貧弱です。BERTは、すべてのビットを測定できますが入力周波数応答に制約があり、エミュレートするネットワーク機器に適しています。このような違いにより、測定結果に大きな違いがでます。

リンク性能は、直感的な方法で観測できますが、真のリンク性能を判断するためのすべての情報が含まれています。多くのエンジニアがBER等高線での判断に移行しつつあるのは、この理由によります。BERTがどのように情報を収集するかを理解できれば、BERT等高線の構築方法が理解できます。

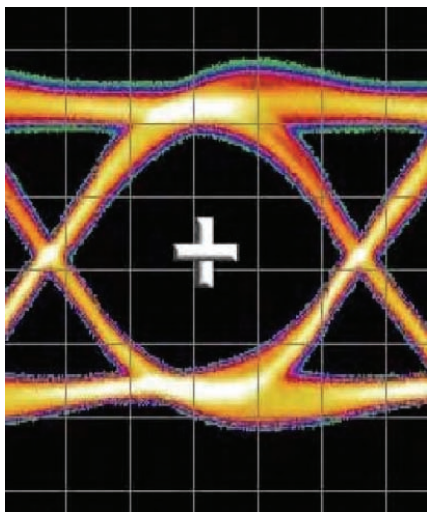


図3. アイ中心点によるBERTデシジョン・ポイント

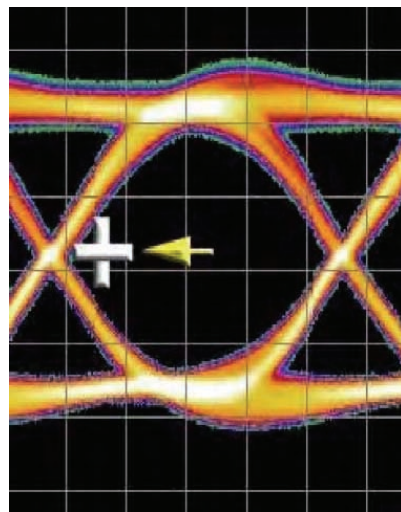


図4. デシジョン・ポイント時間の移動

BER等高線の概要

BERTのエラー・ディテクタ・フロントエンドは、ハイスピード通信リンクにおけるデジタル・レシーバと非常によく似た動作をし、その目的は入力信号の1と0を正しく判断することにあります。これを行うため、短時間でスナップショットします。この瞬間に入力信号は電圧スレッシュホールドと比較され、信号がスレッシュホールドのどちら側にあるかによって1または0が判断されます。これは、データと同期したクロックによってトリガされた、すべての入力信号に対して行われます。多くのデータ・レシーバと違う点は、BERTのエラー・ディテクタは、電圧、時間において、デシジョン・ポイントを非常に正確に設定することにあります。

通常の条件では、デシジョン・ポイントはアイの中心、すなわちビット周期のほぼ中間点、トップとボトムの間電圧の中間点に設定されます。こうすることで、各ビットを最も正しく判断できます。

デシジョン・ポイントが、この理想ポイントから移動するとどうなるのでしょうか。デシジョン・ポイントが電圧方向の2本のレールの間電圧の中間点、アイの中心にあるとします。クロックとデータのチャンネル間の遅延設定を移動すると、電圧レベルにおけるデシジョン・ポイントは変わりませんが、時間的に変化します。アイ・ダイアグラム内ではデシジョン・ポイントが左右に移動するのを見えます。

この例では、少しの移動は何の影響も及ぼしません。デシジョン・ポイントは空白の領域にあり、どの判定も正しく行えます。デシジョン・ポイントがもっと大きく移動するとどうでしょう。アイ・ダイアグラムの交差するポイントに近づいても、ほとんどの場合、正しく判定されます。しかし、最後にはエッジに当たります。このエッジは、この例では最も右端のものになります。このエッジは、大半のエッジから時間的に離れています。この特定のテスト・リンクでは最も難しい、特定のビット・パターンの組み合わせから発生するものであり、例えば帯域が制限されたシステムにおける小さな「1」によるものです。このエッジの意味するところは、デシジョン・ポイントにとっては電圧レベルが期待値よりも高かったことを意味しており、エラーとして記録します。従来のレシーバの通常の動作条件ではない、意図的に作り出した条件ですが、アイ・ダイアグラムの性質を調べることができます。

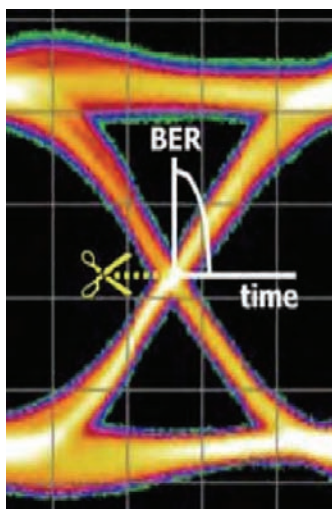


図5. ジッタ解析のための、アイ交差ポイントにおける水平スライスの生成

デシジョン・ポイントをさらに左に移動するとさらにエッジに当たることになり、より多くのエラーが記録されます。交差ポイントまで達すると、多くの時間で間違った判定になります。1つの軸に時間を、もう一方の軸に発生したエラーをプロットすると、有益なプロットになります。例えば、最初に当たったエッジが頻繁に観測され、もう一方のエッジでも数多く観測される場合、通常の動作では特に問題のない健全なアイということになります。このリンク端に、アイの中心にデシジョン・ポイントを持った通常のレシーバを置くと、1,000,000,000の正しく解釈されたビットにおいて999,999,999以上の点数が得られます。問題は、まれに発生するエッジが原因で非常に遅くなり（非常に遅いとは、アイの中心にデシジョン・ポイントがあってもということ）、間違っ

て判断されることです。このようにまれに発生するイベントは、パーツを返品して契約をキャンセルするお客様と、正しく機能するリンクの違いになります。まれにしか発生しないイベントであっても、サンプリング・オシロスコープのようなサンプリング速度が速くない測定システムでは、このようなイベントは取込めないということを意味しています。

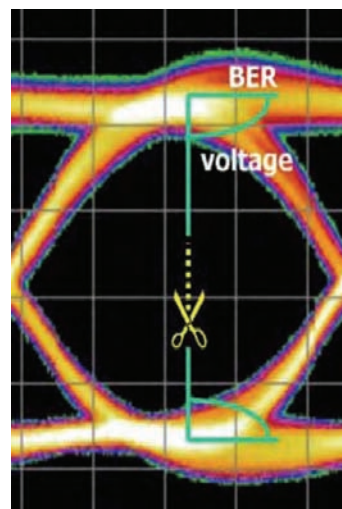


図6. 垂直方向スライスによる電圧デシジョン・ポイントの移動

こまでは、デシジョン・ポイントを時間的に移動することについて説明しました。これは、リンクのジッタ性能解析に非常に有効な方法であり、このようなスキャンは、MJSQ[®]などの規格ではバスタブ・ジッタまたはBERTScanのテストとして知られています。

同様のアイデアは、垂直方向（電圧）の判定でも適用できます。アイ中心のデシジョン・ポイントにおいて遅延設定を一定にし、スレッシュOLD電圧を移動します。スレッシュOLDを、電圧を上げる方向で移動する場合を考えてみます。最終的には、最も低いレベルの1に当たります。このビットは、最も高い電圧に達することではなく、前に次のビット周期で0に戻されるかもしれません。このようなビットは、回路を構成する半導体による電荷効果によって発生することがあります。時間の場合と同様、上方向に移動するとより多くの「低い1」と当たり、ほとんどのロジック1はスレッシュOLD・レベル以下になって0とカウントされます。スレッシュOLDに対する検出されたエラーをプロットし、別なスライスを行うことで、システムの健全性が確認できます。

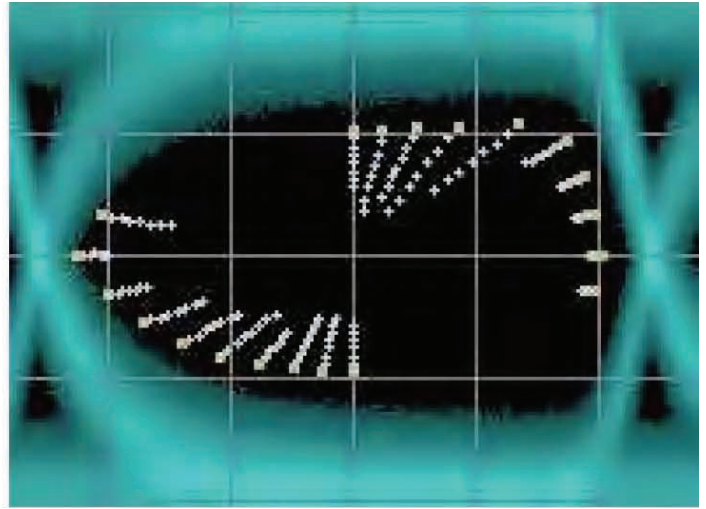
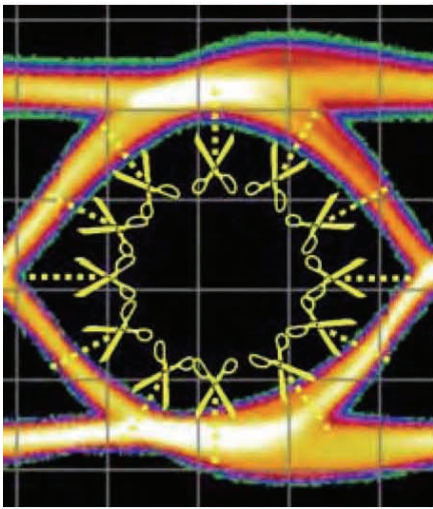


図7 (a)、7 (b) . 異なった角度で何カ所もスライスすることで、より詳細な解析が可能になる。図7 (b) は、実際のBER等高線測定実行の様子を示す

次のステップでは、このアイデアを拡張し、2つの直角以外の角度でも次々にスライスします。これらのスライスを組み上げることによって、BER的な表現による詳細なイメージが得られます。例えば、それぞれの曲線からBER 1×10^{-6} のポイントを見つけ、このポイントを他の曲線の 1×10^{-6} のポイントと合わせて等高線を作成します。

先に説明した2つの単純なスライスに比べてよりわかりやすくなっています。アイに問題が潜んでいないか、またエラーなく動作さ

せるためにはどこにデシジョン・ポイントを置けばよいかわかります。図8には、観測されているアイの内側にBER等高線が入っています。別の見方をすれば、従来のアイ・ダイアグラムでは見えないイベントでも、物理的にはまれに発生し、これがシステム性能を低下させることになります。

BER等高線の実例をご紹介します前に、次の章ではアイ等高線測定で考慮すべき点について説明します。

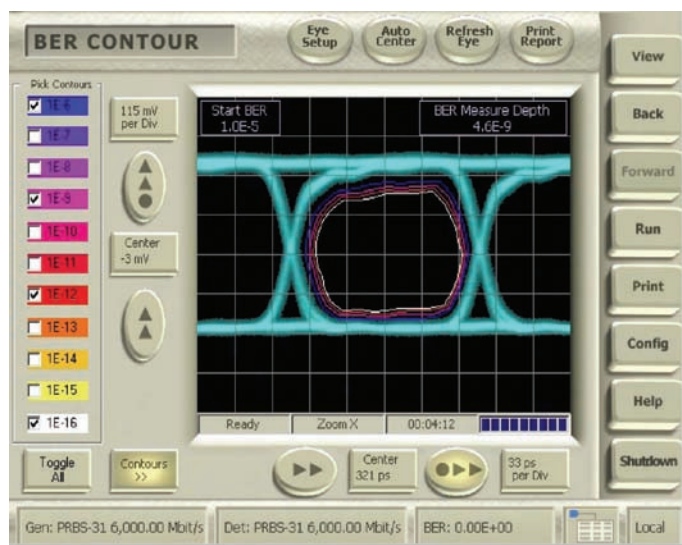


図8. BERの等しいラインを示したBER等高線表示

注意事項

デシジョン・ポイントの確度と設定

正確なBER等高線のためにBERTで確実に、高い再現性で移動させるには、確度が求められます。スレッシュホールドの電圧を正確に設定することは、現在のコンポーネントでは比較的容易に行えます。

難しいのは、正確な遅延設定です。最も高性能な電子遅延ライン・メカニズムは固定セクションと可変セクションのミックスであり、求められる結果を得るために必要に応じて切り替えます。They tend to be complex to control, and non-linear – linear voltage changes do not often give linear changes in delay. ギャップやヒステリシスもあり、温度や周波数によっても関係は変化します。商用機器では、遅延機能を校正することでこの問題を軽減しており、100fsのステップは信頼性、再現性においても達成可能になっています（代表値としての100fs分解能ではなく、遅延設定の確度には関係ありません）。正確なBER等高線を得るには、測定直前での細かな手順による校正が重要になります。

ディテクタの入力性能

BERTは、パターン・ジェネレータの出力波形品質で判断されことがあります。現在市場に出回っているBERTの波形品質は、シミュレーションするデバイスの性能を十分に上回っています。最新のBERTによる測定でより重要となるのが、エラー・ディテクタの入力性能です。これは計測器の入力品質であり、十分な周波数帯域があれば、測定するデバイスで畳み込み積分した場合でも結果は大きく変化することがありません。同様に、入力回路もコントロールされた周波数応答、高いリターン・ロスがあれば、信号を忠実に再現し、変化させることはありません。慎重に設計されたカスタム集積回路、モジュールであれば、優れたシングルエンド性能、差動性能が実現され、忠実なデシジョン回路になります。

速度

1. 三番目に考慮すべきポイントが測定速度です。従来、BER等高線は処理に非常に時間のかかる測定でした。時間のかかる理由は遅延と電圧のスレッシュホールドの制御が遅いためであり、これは共に外部の遅延ライン、外部のコンピュータ制御を使用するため、またBERTからの応答が遅いためでもあります。
2. 測定するポイントの確度は、いかに低いレベルのBERを正確に測定できるかによります。 1×10^{-12} などのBERレベルの測定には数十億ビットが必要になるため、時間がかかります。このような測定では、何倍もの時間がかかります。

最新の計測器は遅延制御に対して非常に適切に対処できており、電圧／時間におけるデシジョン・ポイントをすばやく設定でき、短いセグメントのビット・エラー・レートであっても測定できます。デシジョン・ポイントを数 μ sで再設定できるものもあります。この機能と、統合されたユーザ・インタフェースにより、非常に高速に、自動的にサンプル・ポイントを決定し、わかりやすい表示で結果をアイ・ダイアグラムと重ね書きします。

2番目のポイントはより複雑であり、求められる確度によります。BER等高線問題の賢明な方法としては、まずすばやく測定ポイントを取込み、測定するだけになってから時間のかかるポイントを徐々に埋めます。最初のいくつかのポイントで低BERの等高線がどのようなものかを推定し、データを取込むにしたがってこの推定を補強します。通常、有効な情報は2分以内に得られます。こうすることで、本当に必要な場合は長いBERポイントで長時間測定し、中間結果はただちに表示されます。

モデル

MJSQは、ダブルデータまたはデュアルディラック (Dual-Dirac) モデルのアプリケーションを説明した規格です。この規格により、アイの異なったポイントにおけるジッタの挙動が推定でき、複雑になりがちな状況が単純化できます。この単純化は、デターミニスティック成分（発生のために同じ振る舞いをする成分、すなわち有界成分）とランダム成分（どの時点でも推定できないノイズなどの成分であり、ガウシアン統計に従うと推定、非有界と呼ばれる）を識別化することによって行います。2つの成分を個別にモデル化してその振る舞いを足し合わせることができれば、妥当な確度でBER／時間曲線の挙動が推定できます。これはジッタ・ドメインのために開発されましたが、BERTScopeにも拡張されて採用されています。また、使用されるすべてのスライスでも機能します。MJSQのAppendix H (January draft) によると、低い（測定時間が長い）BERでの測定ポイントで有利となる曲線の上のポイントを無視することで、確度の高い外挿が可能になります。デュアルディラック・モデルは近似であり、独自のモデリング・ツールを使用して基礎データをエクスポートしたり、独自に計算したりすることができます。

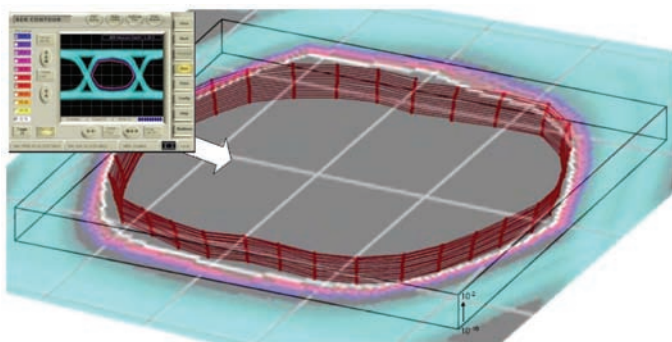


図9. BER等高線から3次元BER等高線への変換

BER等高線からわかること

3次元表示によるアイの閉じ具合のビジュアル化

BER等高線を3次元で表示することにより、意味していることの感触がつかめます。図9は、BER等高線を3次元に変換した例です。3次元化することによりすり鉢のように見えます。図9と図10は、BER等高線の詳細データをエクスポートし、PCベースの演算プログラムにインポートして作成されています。図9において、BER等高線の詳細データは3次元プロットとしてマッピングされており、ユニット・セルはトップの大きさを、深さはBERを表しており、上端は 10^{-2} を、底は 10^{-16} を表しています。BER等高線（水色）も重ね合されており、変換された様子の理解に役立っています。

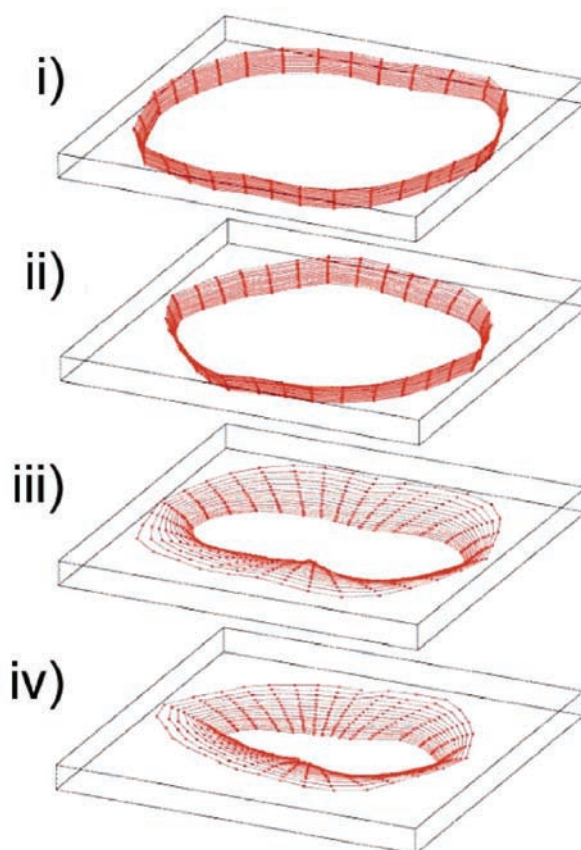


図10. 3次元で示されるリンク性能の劣化とBER等高線の閉じ具合

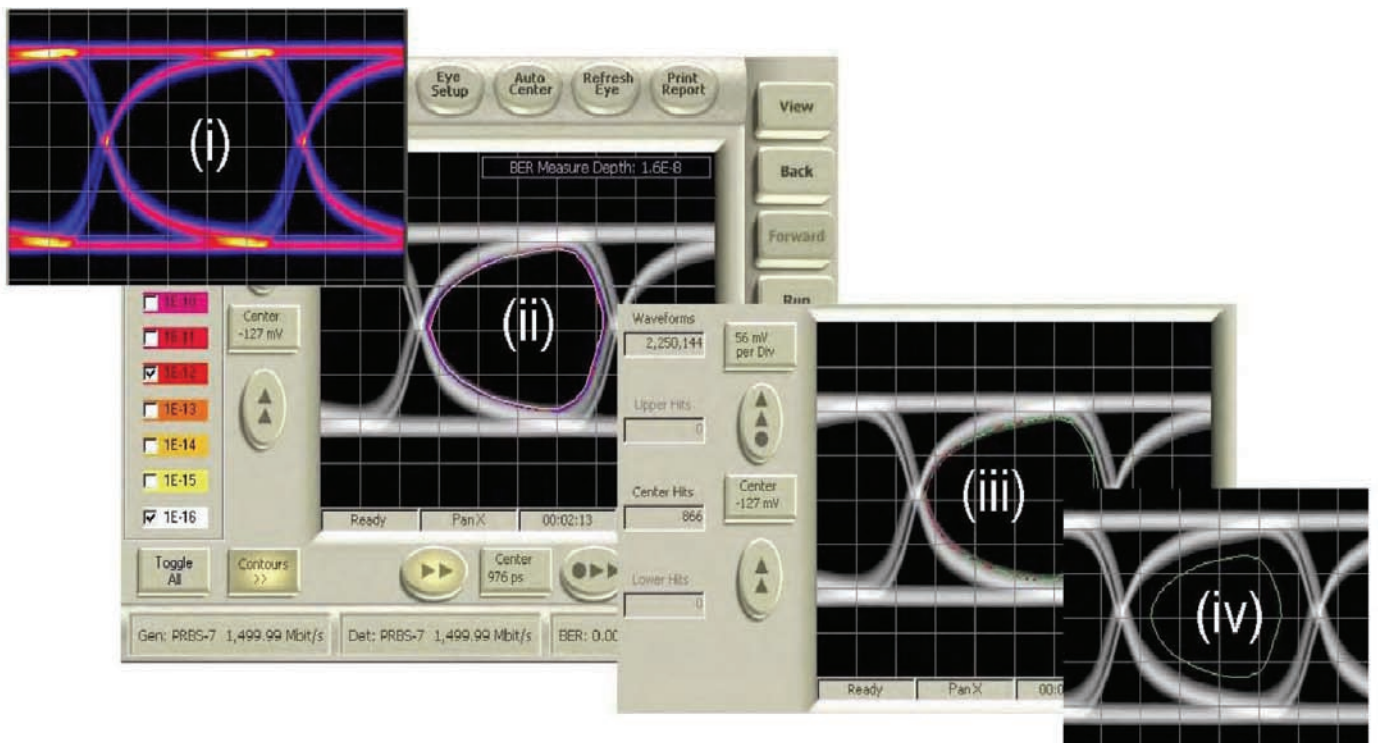


図11. ゴールデン・デバイスのBER等高線を使用したベンチマーク・マスク・テスト性能の例。(i) はアイ・ダイアグラムを、(ii) はBER等高線を示す。10⁻¹⁶の等高線がエクスポートされ、マスクとして使用されている。マスク・テストが実行され、フェイルが記録される (iii)。マスクもスケラブルであり (iv)、時間、電圧で25%のマージンが加えられている

変換されたことにより、アイの閉じの影響がわかりやすくなります。図10の一連の流れを見ると、徐々に性能が悪化していることがわかり、サンプル・レートの低いアイ・ダイアグラムではその多くは検出できません（BERTScopeは独自のアイ・ダイアグラム機能を装備しており、桁違いのサンプル数で取込むことができ、検出できイベントの確率は低くなります）。

BER等高線で興味深いのは高速の製造テスト・アプリケーションでもベンチマークとして使用できるということです。1本の等高線を取り上げてマスク・ファイルとしてエクスポートすると独自の「ゴールデン・パフォーマンス」ベンチマークになり、次に続くデ

バイスのアイ・マスク・テストを実行してプロセス制御、品質などをモニタすることができます。ここではBER等高線形状は保持されていますが、測定は遅いBERベースの測定ではなく、従来のマスク・テストと同様に高速の電圧サンプリング（数秒）になっています。どの等高線を使うかはテストの厳しさによって異なり、低いBER（小さな）の等高線は、エラー率の高い（大きな）等高線に比べて電圧ドメインにおけるテストは容易です。図11をご参照ください。

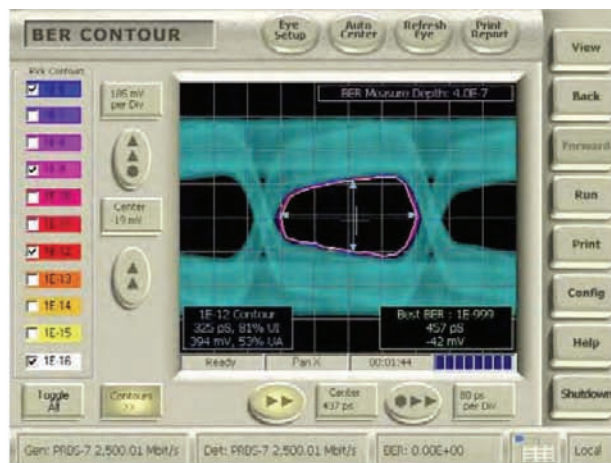
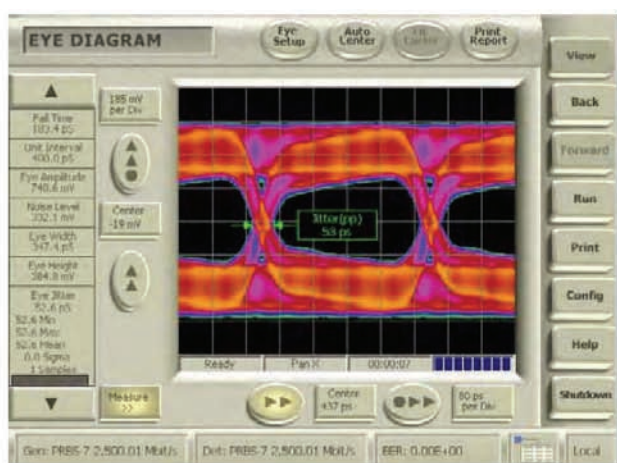


図12. 有界干渉のあるシステムのアイ・ダイアグラムとBER等高線の例。アイが劣化しているように見えますが、BER等高線のラインはまとまっており、システムにはエラーなく機能していることがわかる

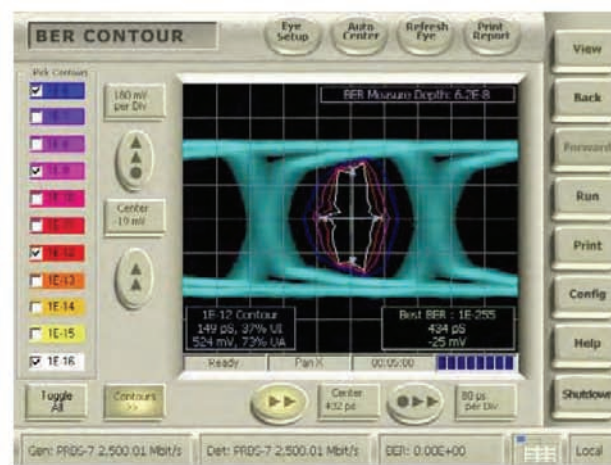
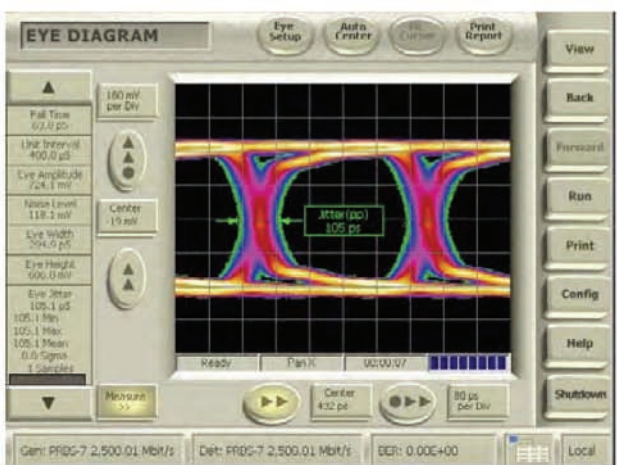


図13. 非有界干渉（ランダム・ジッタRJ）があるシステムのアイ・ダイアグラムとBER等高線の例。アイ・ダイアグラムを見ると良質のシステムであるように見えるが、BER等高線は広く拡散しており、それほど良質ではないように見える。エラーなく動作させるには、レーザのデシジョン・ポイントを慎重に設定する必要がある

BER等高線の例

BER等高線は、真のシステム性能を把握するための優れた方法です。例えば、著しく劣化したアイ・ダイアグラムは、ほとんどがデターミニスティックなメカニズムによる不具合を持つことがあります。もっと簡単に言えば見た通りであり、システム問題を引き起こすような低い可能性のレベルは潜んでいないように見えます。逆もまた真であり、何の問題もないようなアイ・ダイアグラ

ムであっても、非有界メカニズムによって引き起こされる問題が潜んでいることがあります。それぞれの例を、図12、図13に示します。

ストレス・アイによるジッタ・トレランス測定の構築も、特定のBER等高線障害の良い例です。図14～17は、BERTScopeのパターン・ジェネレータによるさまざまな例を示しています。

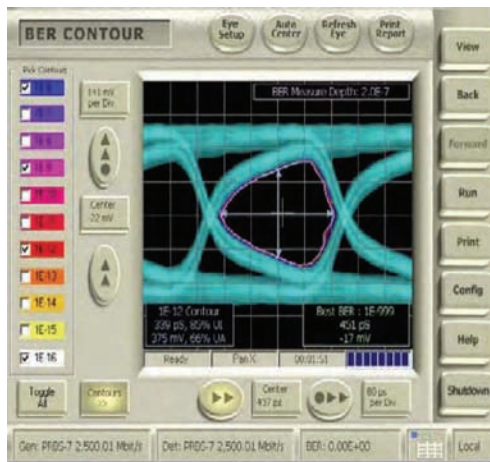


図14. ISIフィルタ（ロング・ケーブル）によるパターン依存の影響がある信号のBER等高線の例。この影響は有界で再現性があり、しっかりとまとまった等高線になっている

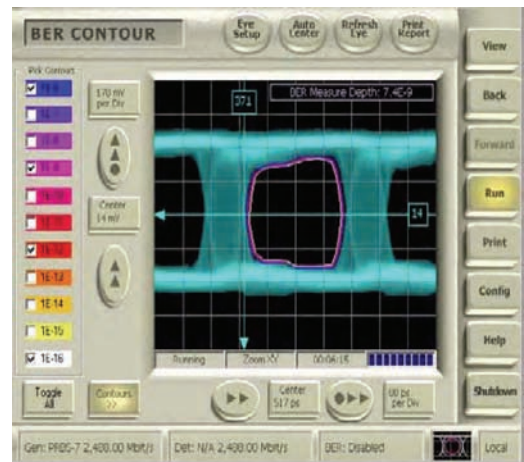


図15. 正弦波ジッタが加えられた良品信号のBER等高線の例。正弦波ジッタ（SJ）は有界で予測できるため、しっかりとまとまった等高線になっている

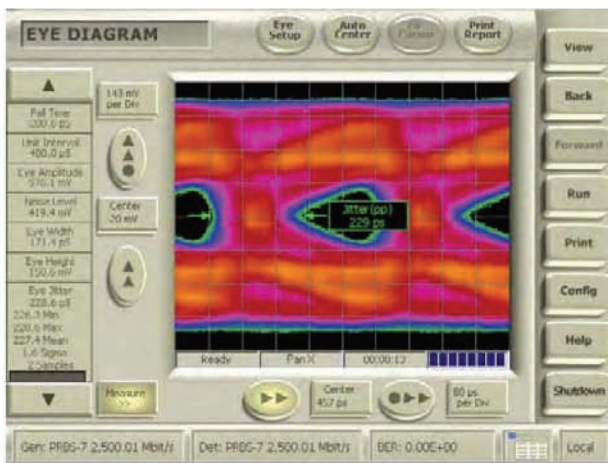


図16. ISIフィルタ（ロング・ケーブル）、正弦波ジッタ、ランダム・ジッタ、正弦波ノイズ（垂直方向の閉じをもたらす）を含んだストレス・アイのアイ・ダイアグラム（左）とBER等高線（右）の例。最も困難と思われるレシーバの代表例

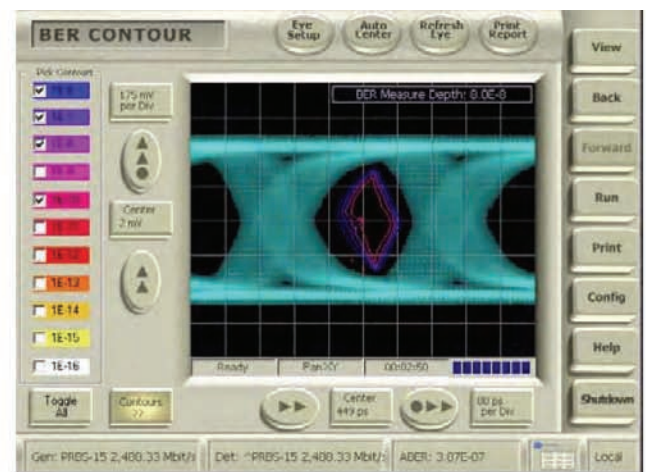
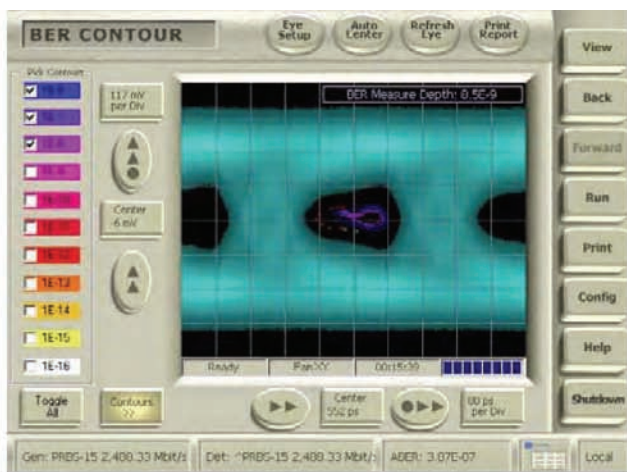


図17. 異なったケーブルによる2ライン・カードと、正弦波ジッタ／ノイズが加えられたリンクの2種類のBER等高線。左はパッシブ・ケーブルを使用したものであり、デュアルディラック・モデルで故障となるのに十分に閉じたアイになっている。左はケーブルをアクティブの「アイ・オープニング」ケーブルを使用したものであり、比較的良好な結果が得られている

まとめ

BER等高線は、システムのパラメータ性能を直感的に、総合的に観測できます。計測器技術の進化により高速、正確になっており、開発、トラブルシュート、検証環境における実践的な提案となっています。製造におけるゴールデン・デバイスのベンチマークとしても利用できます。

謝辞

図10の測定では、Cisco社開発エンジニアの協力を得ました。ありがとうございます。

- i BERTScope BSA125C型12.5Gbpsビット・エラー・レート・アナライザ – BER測定、データ量豊富なアイ・ダイアグラム、BER等高線、マスク・テスト、Qファクタなど、ギガビット・デバイス、カード、システムの高速解析、迅速なトラブルシュートに最適です。詳細については、当社ホームページ（www.tektronix.com/ja）をご参照ください。
- ii MJSQまたはFibre Channel — Methodologies for Jitter and Signal Quality Specification（ジッタ／信号品質仕様）は、INCITS project T11.2の一部として書かれています。詳細については、ウェブ・サイト（www.t11.org/index.html）をご参照ください。
- iii N.S. Bergano, F.W. Kerfoot, and C.R. Davidson, "Margin Measurements in Optical Amplifier Systems, " in IEEE Photonics Technology Letters, vol.5, no. 3, pp. 304-306, Mar. 1993.

ASEAN／オーストラリア・ニュージーランドと付近の諸島 (65) 6356 3900
ベルギー 00800 2255 4835*
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
フィンランド +41 52 675 3777
香港 400 820 5835
日本 81 (3) 6714 3010
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
中国 400 820 5835
韓国 001 800 8255 2835
スペイン 00800 2255 4835*
台湾 886 (2) 2722 9622

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

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

11/12

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

Updated 00 NOVEMBER 2012



65Z-26019-0



〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階
デクトロニクス お客様コールセンター TEL: 0120-441-046
電話受付時間／9:00～12:00・13:00～19:00(土・日・祝・弊社休業日を除く)

www.tektronix.com/ja