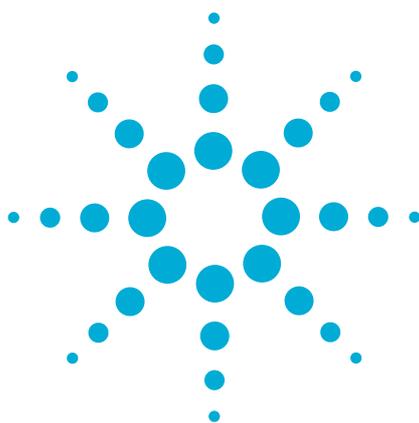




ロングメモリ・オシロスコープによる高速BER解析



Charles H. Sobey氏
ChannelScience

Jay A. Alexander氏
Agilent Technologies

ほとんどのデータ通信およびデータ・ストレージ・システムで最終的な性能評価となるのが、ビット・エラー・レート (BER) です。BERは、エラーとして検出されたビット数を総検出ビット数で割った値です。通常、送信(または保存)されたさまざまなデータ・シーケンスに対する平均値となります。したがって、BERはエラーの確率の測定といえます。システム・レベルにおける検討事項として速度、パワー、コストも重要ですが、高速、低パワー、低コストで送信または保存されている情報が正確でなければ、こうした測定基準は無意味なものになります。

どんなBERが「優れた」(すなわち低い)値といえるかは、アプリケーションによって異なります。たとえば比較的頻繁に再送信要求を行ってもかまわない生の音声アプリケーションでは、 10^{-3} や 10^{-4} のBERで動作が可能です。一方ハードディスク・ドライブのBERは、通常、ほぼ 10^{-14} ~ 10^{-16} です。こうした低いBERをテストするにはどうすればよいでしょうか。通常50~200のビット・エラーを検出すれば、統計的に有意なBERが測定できます。 10^{-14} BERを測定するには、約 10^{16} ビットの検出が必要です。ディスク・ドライブが最高データ速度(約

1Gビット/秒)のときでさえ、検出には 10^7 秒かかります。これは1157日以上にあたります。テスト時間が製品の保証期間よりも長いということにもなりかねません。

ご注意

2002年6月13日より、製品のオプション構成が変更されています。
カタログの記載と異なりますので、ご発注の前にご確認をお願いします。



Agilent Technologies

生のBERを使ってテスト時間を短縮するには

上記の例で用いた非常に低いBER値は、強力なエラー訂正 (Error Correction Coding; ECC) を適用した後にのみ得られる値です。ECCは、データの送信時や保存時にデータに符号化された冗長データを追加してエラー訂正を行います。ECCによって、BERの大きさを数桁改善することができます。一般的にはテスト時間を短縮するため、ECC補正の適用前に示される生のBERを評価します(エラー分布がECCの性能、ひいては最終BERに影響を及ぼすので、この方法には十分な注意が必要です)。

ここに示すディスク・ドライブの例では、生のBERはほぼ 10^{-9} です。1Gビット/秒のデータ速度で100ビットのエラーを観察するには、約100秒かかります。こうしたテストは可能ですが、コスト面から見て実用的とはいえませんが、BERテストに当てる時間は数秒、場合によっては1秒以内です。さらにBERは、いくつか条件を変えてテストする必要があります。通信システムの場合の変数には、ユーザ数、信号強度、データ速度、フェージング特性、ひずみなどがあります。こうしたことを考えた場合、BERテスト時間をさらに短縮することが望まれます。

ストレス・テストの長所と短所

BERテストを高速化するには通常、システムにストレスをかけてビット・エラーの発生率を高めます。最悪ケースでテストを行うか、重要なシステム・パラメータの設定を下げてテストを行い、その結果と通常システムで出るはずの結果の相関をみることで、BERテストの高速化を実現します。

最悪ケース状態として、非常に大きな雑音、複数ユーザ、クロストーク、エコー、フェージング、あるいはハードディスク・ドライブの場合、書き込み磁気トラックを基準とした読み取りエレメントのオフトラックのポジショニングなどがあります。複数のテストに渡って最悪ケース状態を調整し、その結果を通常の結果と関連付けることは、可能であっても困難です。また、イコライゼーション、非線形補正、フェーズ・ロック・ループのタイミング制御、検出設定などの重要な信号処理パラメータの性能低下の設定は、コンポーネント・サプライヤに信号処理ハードウェアに関する(こうしたケース以外には必要とされないような)詳しい知識が求められます。

より基本的な注意事項として、システムやそのコンポーネントのテストをこうした人工的な極限状態で行うと、ある特定のテスト結果から、システム本来の性能を劣化させるような設計を選ぶ危険性もあります。このため、テスト時間の短縮には、ストレス・テストに代わるソリューションが必要とされています。

ロングメモリ・オシロスコープがBERテストのボトルネックを打破

ハードウェア・チャネルそのものを使用せず、困難な校正および関連付け問題が発生することなく、非現実的な最悪ケース・シナリオに頼らずに、システム・レベルの性能に基づいてコンポーネントを設計することが可能です。このようなソリューションは、信号処理/検出シミュレーション、BERの予測、ロングメモリのデジタル・オシロスコープの組み合わせで可能になります。

システムが処理および検出する必要があるアナログ信号またはデジタル信号の生成にとって非常に重要なコンポーネントはすべて、この種のテストの対象となります。対象として、データ記憶デバイスのヘッド、媒体、プリアンプや光ファイバ・リンクのレーザ、レンズ、受光器などがあります。リジェネレーターやフィルタなど、シグナル・コンディショニング・ブロックの出力も挙げられます(帯域幅の問題から、RFシステムではBERの評価にベースバンド信号を使用すると良い結果が得られます)。

最初のステップは、高速でロングメモリのオシロスコープを使い、被試験コンポーネントのアナログ信号を捕捉することです。経験則から、オシロスコープのサンプリング・レートを対象信号のデータ速度の4倍以上(6~8倍を推奨)に設定します。このため、1 Gbps信号をテストするには、サンプリング・レート4 GSa/s以上のオシロスコープが必要です。



図1. 黄色の波形は、プリアンプの出力におけるハードディスク・ドライブのリードバック信号です。紫色の波形は「読み取りゲート」です。この信号はドライブの読み取りチャンネルに、入力波形の読み取り開始時期と読み取り終了時期を指示します。これがディスク・ドライブの1セクタで、通常、512バイトのユーザ・データが保存されています。

こうした信号で 10^{-8} の生BERを、100エラーが検出されるポイントまで測定するには、400億サンプル以上が必要となります。現在のところ、これほど大きなメモリを持つオシロスコープはありません。より少ないサンプル数に基づいてBERを予測する方法を見つける必要があります。しかしたとえ予測値を使うとしても、最大サンプル・レートで1セクタ分(通常512バイト、4Kビット)以上のサンプルを収集する必要があります。オシロスコープにこの作業を行うための十分なメモリがない場合、1セクタに対応する時間スパンを収集するために、オシロスコープはそのサンプル・レートを低下させます。

ロングメモリがあれば、より長い時間データを捕捉しているときでも、サンプル・レートを最大に保つことが可能です。図1に、ハードディスク・ドライブのプリアンプから捕捉された代表的なリードバック信号を示します。250Mbps信号の1セクタ分が、4 GSa/sのレートで捕捉されています。これは1ビットあたり16サンプルという、非常に高確度の分解能に対応します。このデータを取得することで予測段階に進むことができます。

ハードウェアでは不可能なことがオシロスコープとシミュレーションで可能に

正しい条件の下では、直接測定に必要となるサンプル数よりも数桁少ないサンプルを使って、BERを低い値に予測することができます。鍵は、検出器の内部判定測定基準にアクセスできることですが、ハードウェアではほとんどの場合、アクセスの方法がありません。ソフトウェア・シミュレーションが必要となるのはこうした理由からです。ハードウェア・チャンネルの信号処理の流れを適切に反映させるため、シミュレーションは自在に設定可能でなければなりません。また、非常によく似た検出アルゴリズムを採用する必要があります。

ハードディスク・ドライブやテープおよび光ドライブで、よく知られたビタビ検出器を使用する場合を考えます。ビタビ検出器は、PRML (partial response maximum likelihood) シーケンス検出システムです[2]。ビタビ・アルゴリズムは、差分距離[3]と呼ばれる内部判定変数を使用します。ここでいう差分距離とは、2つのサンプル・シーケンス(「経路」)間のエラーの2乗における差の絶対値を表し、ビタビ検出器が選択した経路に沿って各ビットごとにどちらか判定します。

図2には、ビタビ検出器がBERとどう関係するかを示す、PRMLpro™読み

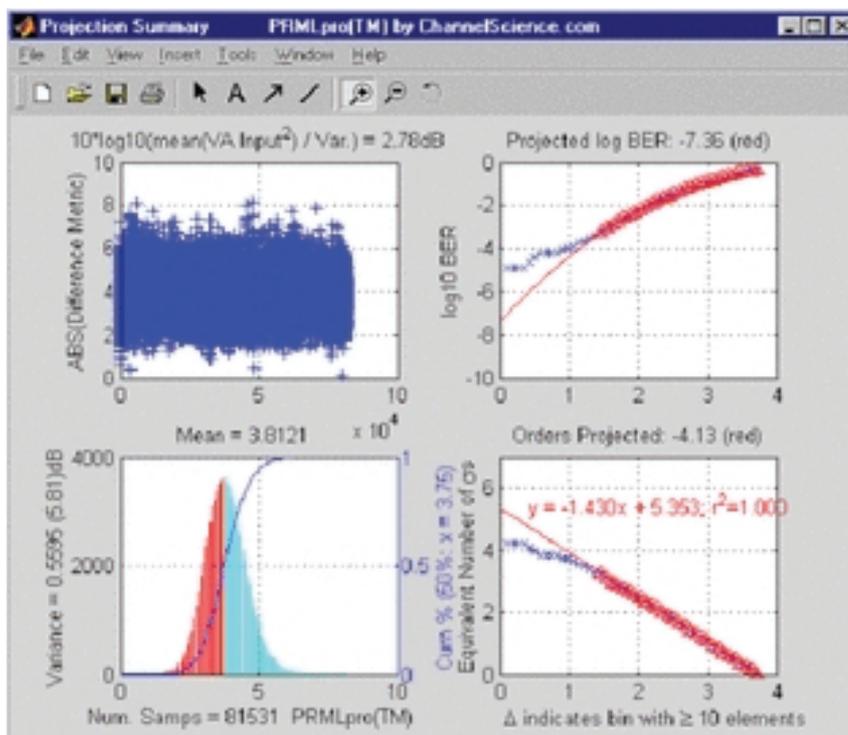


図2. 左上: ビタビ差分距離値の絶対値の散布図。左下: その分布および累積集計。右下: 各X値に対応する平均からの標準偏差数に対する線形近似。右上: 線形近似に基づいて計算されたBERおよびその予測値

取りチャンネル・シミュレーション・パッケージ[3]からの一連のグラフが示されています。左上のグラフは、ビタビ差分距離の散布図の例です。左下のグラフは、対応する分布図(ヒストグラム)で、BERの予測に使用さ

れます。左下のグラフに示された青色のS字曲線は、最大値1にノーマライズされたヒストグラムの累積集計です。

BERの予測

差分距離分布がガウス分布の場合、サンプル数が増すにつれて、ノーマライズされた累積集計がよく知られたガウス・エラー関数 $\text{erf}(x)$ の形状に近づきます。これがあてはまる場合、各x値は、平均からの標準偏差の一定数に対応します。図2の右下のグラフに示すように、関係は線形です。色付き雑音によって、差分距離分布

が非ガウス分布になり、「線形」近似が劣化する可能性があります(低 r^2)。

グラフの各三角形は、10個以上の差分距離値が含まれるヒストグラム・ビン(分布グラフのX軸)を表します。ラインをこれらの三角形に合せ、Y軸を横切るまで延長すると、Y切片がシステムの最終性能を表します。これ

は、差分距離分布でエラーがないと検出できた標準偏差の数に関係します。線形近似には、10個以上の差分距離発生を含むヒストグラム・ビンだけが使用されます。右上のグラフは、標準偏差の数に対応する算出BERと線形近似を示します。

捕捉ハードディスク・ドライブ信号を使ったBER予測

図3aは、図1と同じハードディスク・ドライブのリードバック信号と、そのヒストグラムを示したものです。オシロスコープの橙色のマーカAxとBxによって、ヒストグラムに含まれる波形部分の範囲が示されます。図3bには、読み取りチャンネルの連続時間フィルタの波形出力とそのヒストグラムが示されています。

フィルタリングの最終目標は、この波形を5つの振幅レベルにイコライズすることです。図3bには、ピタビ検出器で期待されるサンプル値に適合する、よりはっきりしたピークが示されています。ハードウェア・チャンネルでは、このフィルタ処理された波形がサンプルされ、検出器に渡される前に読み取りチャンネルのFIRによってもう一度フィルタ処理されます。検出器への入力でのサンプル値の分布が使用できる場合、図に5個のよりはっきりしたピークが示されます。

差分距離分布を得るには、PRML pro™ソフトウェアを使って連続時間および離散時間信号処理ステップをモデル化します。このツールは、データ・ストレージデバイスで実施されるもっとも一般的な信号処理ステップの統合モデルを提供します。これらのステップには、ACカップリング、3次非線形性補正、AGC (Automatic Gain Control; 自動利得制御)、連続時間フィルタリング、サンプリングの位相および周波数ロック・ループ (PLL) 制御、適合FIRフィルタによる離散時間フィルタリング、白色化フィルタが含まれます。



図3a. 図1と同じ波形が表示されています。水色のヒストグラムは、“Ax”および“Bx”のラベルが付いた橙色の縦軸マーカによって区切られたサンプル値を使って計算されています。オシロスコープは、自動的に画面の一番下にサマリ統計情報を表示します。

次に、得られたサンプルはツールのビタビ検出器のシミュレーションによって処理されます。上記に説明したように、BER予測に対して差分距離が保存されます。図2の右下のグラフは、線形近似のY切片が5.353であることを示します。右上のグラフは、この標準偏差の予測値に対応するBERが $10^{-7.36}$ であることを示します。このBERを直接測定しようとするのは、約400億サンプルの収集が必要となるはずですが、この予測で使用されたのは81,531だけです。ただし、サンプル・サイズには注意する必要があります。

右上グラフの三角形は、約 $10^{-3.23}$ のBERで停止しています。 $10^{-7.36}$ を達成するには、4.13桁の大きさを予測しなければなりません。予測のスパンの桁数が少ないほど、信頼性が高くなります。通常、2~3桁の予測値は、信頼性があります。3 $\frac{1}{2}$ や4桁を超える場合、より大きなサンプル・サイズを取り込むことをお勧めします。この例では、予測値の信頼性を高めるため、より長い波形を捕捉し、シミュレーションする必要があります。この点でも、オシロスコープのロングメモリと高速サンプリング・レートが非常に重要になります。これらの測定に使用されるオシロスコープには、最大16 Mバイトのメモリが装備されています[4]。最大サンプル・レートでフル200セクタ分のデータを収集することができるため、信頼性の高い予測が可能です。

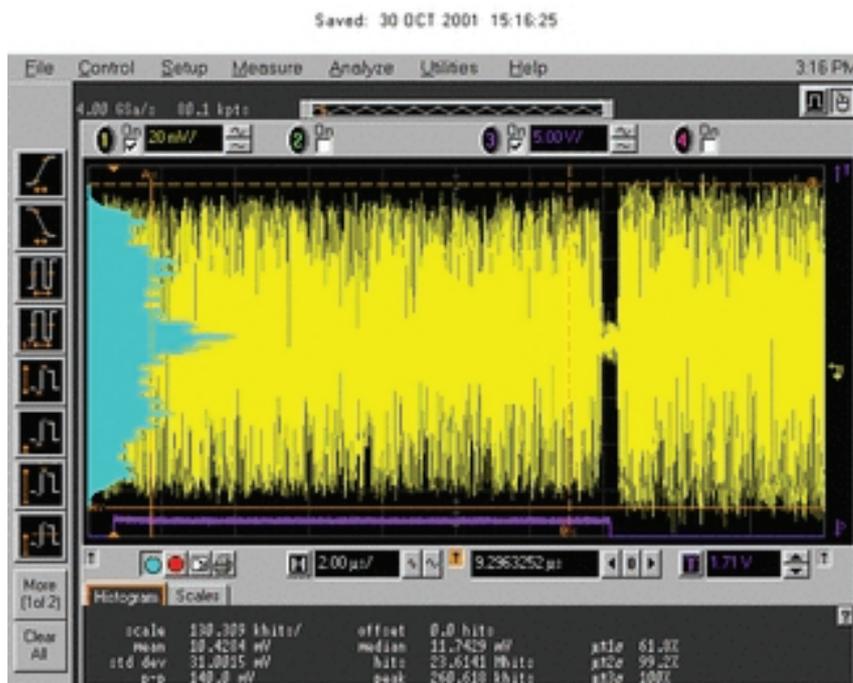


図3b. 図2aと同じ信号ですが、連続時間フィルタの後に捕捉されています。ヒストグラムから5個のよりはっきりしたピークが出現しています。これら5個のピークは、ビタビ検出器が対象とする信号特性を反映しています。

参考文献

1. R.D.Cideciyan, et al., "A PRML System for Digital Magnetic Recording," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 10, No.1, January 1992, pp. 38-56
2. T.Perkins and Z. Keirn, "A Window-margin-like Procedure for Evaluating PRML Channel Performance," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No. 2, March 1995, pp. 1109-1114
3. PRMLpro™マニュアルおよび無料体験ソフトウェア、
www.ChannelScience.com
4. Agilent Technologies 54832B
オシロスコープのデータ・シート
www.agilent.com/find/infiniium

著者の紹介

Chuck Sobey氏は、国際的に著名な技術コンサルタント、講師、ビジネス・アドバイザーです。ChannelScience.comのChief Scientistとして、データ・ストレージデバイス、データ通信デバイス、生物測定デバイスのソフトウェア、信号処理アルゴリズム、チップ・アーキテクチャの開発の指揮をとり、輝かしい成果をあげています。

Jay Alexander氏は、オシロスコープの開発に携わるAgilent TechnologiesのR&D Sectionマネージャです。コロラドでProfessional Engineerの資格を取得し、IEEEのSenior Memberとなっています。HP/Agilent Infiniiumオシロスコープのユーザ・インタフェースの設計を担当しており、この作業で多数の特許を取得しています。

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は24時間受け付け

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。
ご注文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



Agilent Technologies

April 30, 2002

5988-6226JA
0000-08DEP/H