

10Gbit/s 電気差動・光信号に対応したジッタ測定器の開発

Jitter Tester for 10-Gbit/s Electrical Differential Signal and Optical Signal

小川幸治 Yukiharu Ogawa, 西小原匡則 Tadanori Nishikobara, 山口和彦 Kazuhiko Yamaguchi,
齋藤岳人 Taketo Saito

[要 旨] 基幹通信網、伝送装置やそれらに用いられる光送受信器のジッタおよび BER 特性を測定する MP1590B ネットワークパフォーマンステストのプラグインユニットとして、10Gbit/s 電気差動インターフェースおよび光インターフェースを備えた MU150121B 10/10.7G 送信オプティカル/電気カルユニット、MU150123B 10/10.7G 受信オプティカル/電気カルユニット(ワイド)、MU150124B 10.3G 受信オプティカル/電気カルユニット(ワイド)を開発した。電気インターフェースにおける PDJ(Pattern Dependent Jitter)が 9.9mUIpp と低ジッタである送信部と、残留ジッタ 20mUIpp 以下の受信部を実現した。10Gbit/s XFP モジュールやそれに対応する伝送装置、組込みデバイスの電気および光両インターフェースにおけるジッタおよび BER 特性を本装置 1 台で測定可能となった。本稿では、新規開発したプラグインユニットと、これらを用いて得られた測定結果例について報告する。

[Summary] We have developed the MU150121B 10/10.7G Optical/Electrical Unit (TX), MU150123B 10/10.7G Optical/Electrical Unit (RX WIDE), and MU150124B 10.3G Optical/Electrical Unit (RX WIDE) plug-in units for the MP1590B Network Performance tester. The electrical transmitter has low intrinsic jitter with PDJ (Pattern Dependent Jitter) of 9.9 mUIpp. The maximum receiver intrinsic jitter is 20 mUIpp. Using the MP1590B with these plug-in units enables jitter and BER measurement of the electrical and optical interface of XFP modules, transmission equipment, and built-in devices.

1 まえがき

ブロードバンドネットワークの日本国内契約数は 2005 年 06 月末時点で 2,000 万契約を突破した。特に FTTH は 1 年間で倍増しており、純増数で見ると DSL や CATV を上回っている。さらに北米へも拡大しつつあり、かつ固定電話網と移動通信網の統合 (FMC: Fixed Mobile Convergence) も視野に入れた IP 化ネットワークの構築が始まっている。

アンリツは、これら NGN (Next Generation Network) 構築に貢献すべく SDH/SONET および次世代基幹通信網である OTN (Optical Transport Network) のネットワーク評価用測定器 MP1590A ネットワークパフォーマンステスト(以下 MP1590A)を 2003 年 11 月に商品化した。

NGN の課題は、高速・大容量で自由度の高いネットワークを低コストで実現することである。そのため、装置ベンダおよび光トランシーバモジュールベンダはキーコンポーネントである光送受信モジュールで MSA (Multi Source Agreement) を締結し、共通仕様に基づいた開発に取り組んでいる。光送受信モジュールで、現在最も注目されている XFP (10 Gigabit Small Form Factor Pluggable) は、従来の 300pin トランスポンダモジュール(以下 300pin と記す)と異なり 10Gbit/s 電気差動信号を用いることで小

型化によるポート密度向上と低消費電力を実現している。しかし一方では、従来は 622Mbit/s 程度であった電気伝送速度が 16 倍になり、伝送路周波数特性や反射の影響を受けやすくなっている。また、小型化実現のためジッタフィルタによる出力波形品質確保ができないなど、伝送品質確保が重要な課題となっている。

高品質伝送を実現するための評価手段としてジッタ評価があるが、アンリツはジッタ評価手法の標準化に取り組み、測定器校正規格である O.172 Appendix VIII を ITU-T に提案し、これに対応した高精度ジッタ測定オプション (MP1590A-30) を 2004 年 05 月に商品化した。

さらに、今回 XFP の登場で重要度を増した電気差動信号の品質評価用に、ジッタ測定機能を強化した MU150121B 10/10.7G 送信オプティカル/電気カルユニット、MU150123B 10/10.7G 受信オプティカル/電気カルユニット(ワイド)、MU150124B 10.3G 受信オプティカル/電気カルユニット(ワイド)を開発した。**図 1** に MP1590B の外観を示す。

MP1590B を用いることで従来は複数機器の組合せでの評価を余儀なくされていた CDR (Clock Data Recovery) 等のデバイス、XFP、伝送装置のジッタおよび BER 特性を 1 台で評価可能となった。



図1 MP1590B ネットワークパフォーマンススタの外観
External view of MP1590B Network Performance Tester

2 原理

従来の 300pin 測定系を図 2 に示す。300pin は、受信した 10Gbit/s 光信号を、DEMUX 回路により 1/16 レートの平行電気差動信号に変換し、伝送装置内部で信号処理を行う。300pin 単体評価時は、この平行信号を折り返し接続する。300pin 送信部はジッタフィルタを内蔵し、ジッタ伝達帯域 (120kHz 以下: Telcordia GR-253-CORE 勧告による) を狭めることで受信信号

に含まれるジッタを 1/40 程度に減衰させたのち内部クロックとして使用するため、測定器から送信された試験信号やトランスポンダ受信部に含まれるジッタは伝達されにくい構成になっている。そのため、モジュールから出力される光信号に含まれるジッタは、純粋にモジュール送信部が発生するジッタであるといえる。また、モジュール送信部単体のジッタ特性評価用測定系の構築は、比較的容易であったといえる。

それに対し、XFP は物理的制約により上記のようなジッタフィルタを持たず、ジッタ伝達帯域が 8MHz 以下と広帯域であるため、測定器の試験信号に含まれるジッタや、モジュール受信部が発生するジッタが重畳し、モジュール送信部単体で発生するジッタの評価が困難になっている。

このように XFP ではモジュール送信部が発生するジッタを精度よく測定するためには、以下に対応したジッタ測定器が必須である。

- (1) XFP ジッタ評価に即した電気差動入出力インタフェース
- (2) 測定器残留ジッタの低減

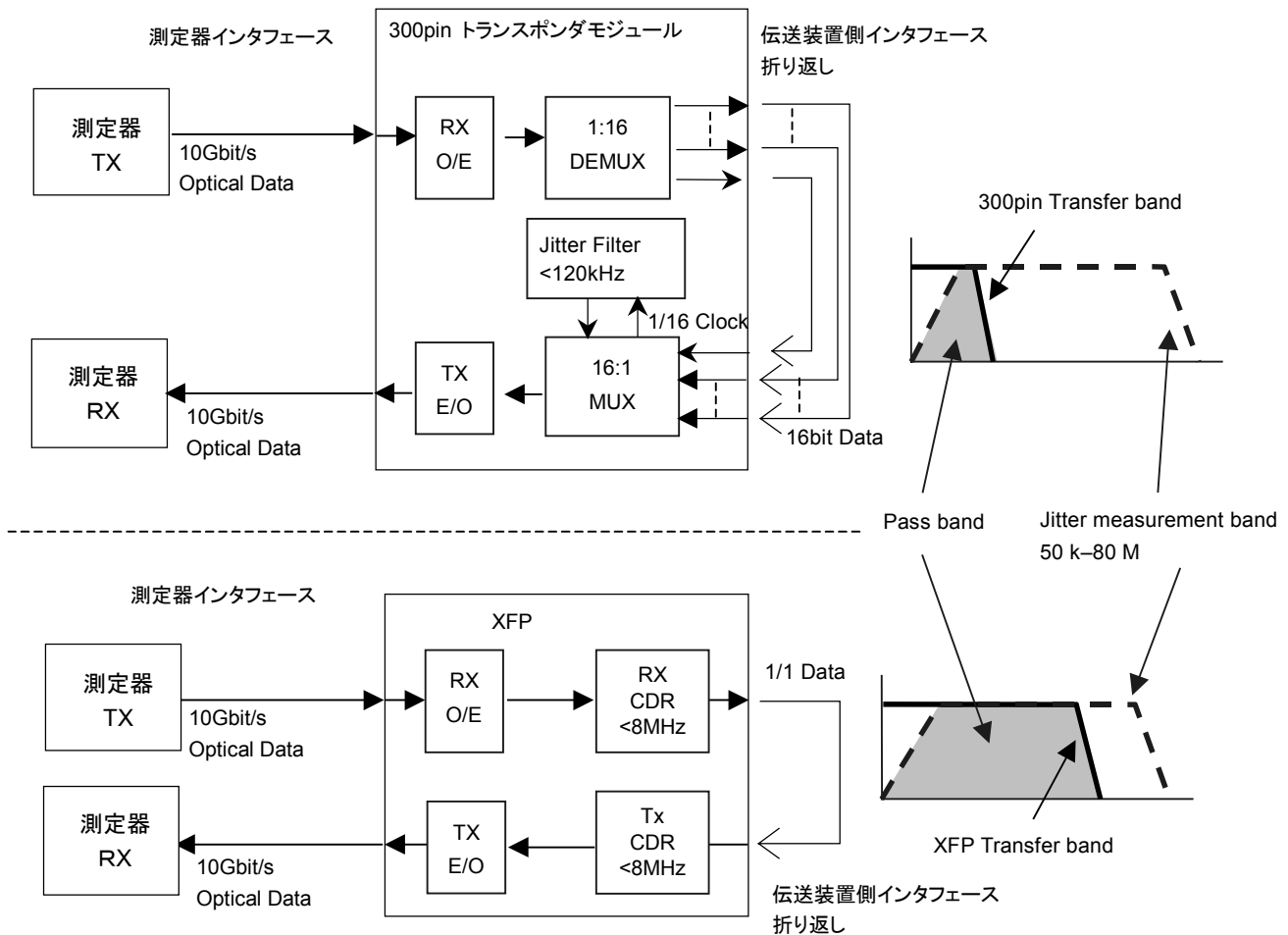


図2 従来の光送受信モジュール測定系
Conventional test setup for optical transceiver module

3 開発方針

2章の課題解決のため、以下の方針で開発を行った。

(1) XFP ジッタ評価に即した電気差動入出力インタフェース

図 2 の折り返し測定と比べ、より正確な測定ソリューションとなる図 3 および図 4 の評価系に対応することを目的として製品開発を行った。そのため、電気差動インタフェースを追加し、さらに入力電気振幅によるジッタ量の変化を評価するため、XFP 電気インタフェース規格 XFI に対応 (150~550[mVpp×2])した振幅可変機能を具備することにした。

また、光信号を同時に送出する機能により XFP 集積化に伴う送受信間クロストークの影響評価という新たな課題発生を推定したソリューション提供を加えた。

これらの対応で、図 5 および図 6 のように XFP を使用する伝送装置との接続も可能となり、XFP および装置間の障害点切り分けにも活用できる構成となっている。

(2) 測定器残留ジッタの低減

XFP の正確なジッタ評価には測定器残留ジッタ(測定器自身が内部で発生するジッタ量)低減が不可欠である。特に SDH/SONET 信号で顕著となる PDJ (Pattern Dependent Jitter) の低減を重点課題として取り組んだ。その理由は SDH/SONET 特有のフレーム構成に依存しており、フレーム先頭部分 (A1byte, A2byte, J0/Z0byte) が PRBS²⁷-1 でスクランブルされず固定パターンが連続するために、直流平均値変動が発生し、これが PDJ となるためである。正確なジッタ評価のため、測定器送受信部が発生する PDJ を 20mUIp-p 以下に低減することが必要である。そこで、今回追加した電気差動入出力は低残留ジッタ (20mUIpp 以下 typ.) を目指し、被測定物が発生する PDJ も忠実に再生させることを目標においた。

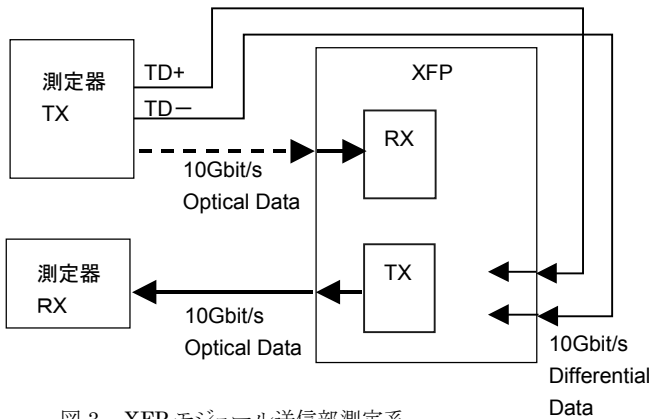


図 3 XFP モジュール送信部測定系
Block diagram for measuring XFP module

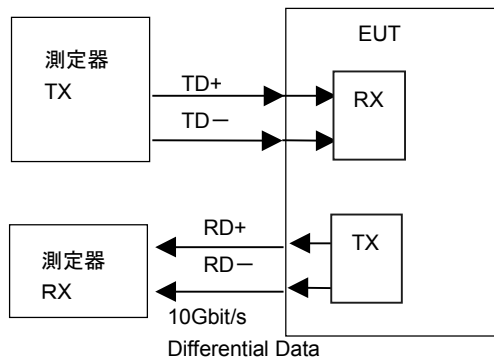


図 5 伝送装置の電気差動インタフェース測定系
Block diagram for measuring electrical differential interface of equipment under test

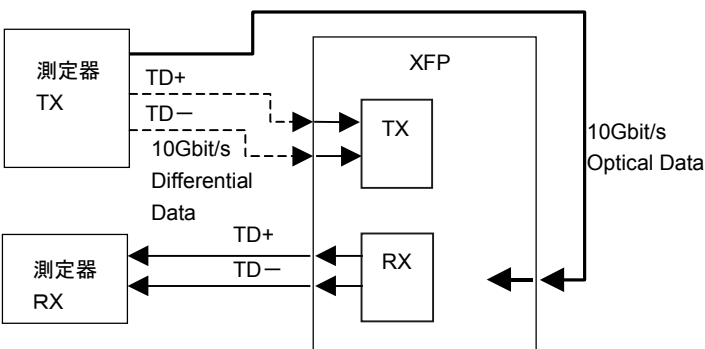


図 4 XFP モジュールの受信部測定系
Block diagram for measuring electrical differential interface of XFP module

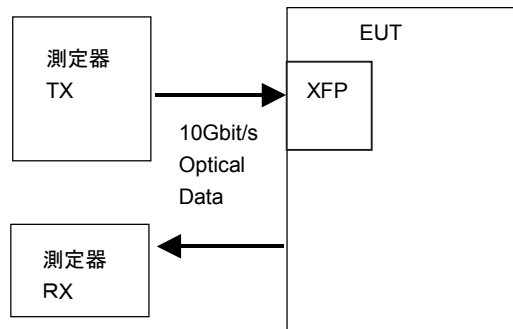


図 6 XFP を組み込んだ伝送装置の測定系
Block diagram for measuring equipment under test with XFP module

4 設計の要点

4.1 MU150121B

電気差動出力を具備し、さらに電気差動出力信号ジッタを20mUIp-pに抑えるため、独自のPDJイコライザを採用した。図7にブロック図を示す。MP1590B試験パターン発生ユニットであるMU150100Aから受信したデータ信号は、クロック信号により波形整形されるが、後段の差動アンプおよびE/Oコンバータの周波数特性によりジッタが増加する。それを防ぐため、周波数特性を補正しPDJを抑圧するPDJイコライザを挿入し、それぞれ最適化を図ることで、電気出力時900fsrms以下、光出力時1.1psrmsの低ジッタ出力回路を実現した。図8に電気出力参考波形を示す。

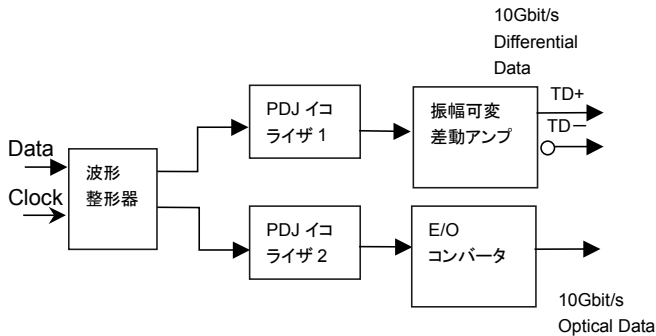


図7 MU150121B内部ブロック
Block diagram of MU150121B

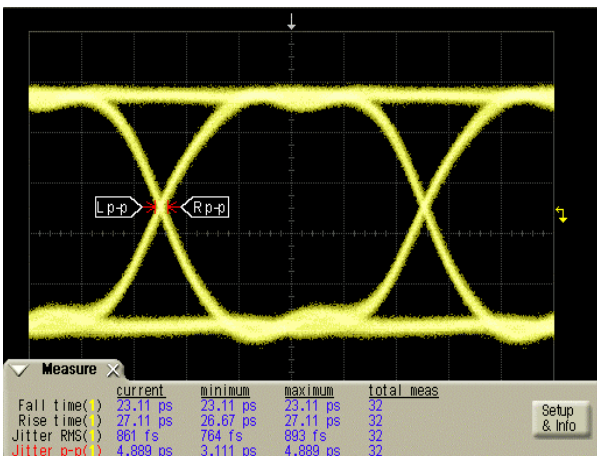


図8 MU150121B電気出力波形
Electrical waveform of MU150121B

これらは、アンリツが提案したジッタ・ワンダ測定器の国際規格であるITU-T Recommendation O.172 (Jitter and wander measuring equipment for digital systems which are based on SDH) Appendix VIII (Method for characterization of

transmit intrinsic jitter)規定で検証評価を行い、電気出力信号のPDJ=9.9mUIpp(図9参照)を実現した。

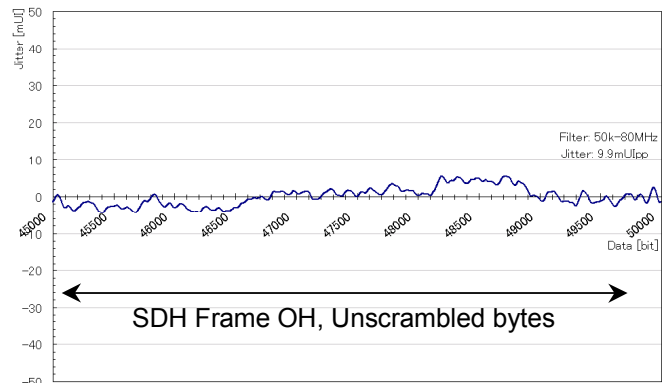


図9 MU150121B電気出力信号のPDJ
PDJ of electrical output signal of MU150121B

また、信号源SSB雑音が主要因であるRJ(Random Jitter)も位相雑音計を用いて50k-80MHz帯域に含まれるSSB雑音を測定し、それを積分することで、6mUIppという結果を得た。したがって、今回開発したMU150121B電気出力信号に含まれるトータルジッタは、

$$TJ = PDJ + RJ = 9.9 + 6 = 15.9 \text{ mUIpp}$$

であり、目標である20mUIp-pを上回る良好な出力信号品質を確保することができた。

4.2 MU150123B/MU150124B

SDH/SONET/OTN用途として10G/10.7Gに対応したMU150123Bと、10GbE(10.3125Gbit/s)に対応したMU150124Bを開発した。

図10にブロック図を示す。クロック再生回路は2系統あり、MU150123Bでは9953Mbit/sおよび10.7Gbit/sを選択可能、MU150124Bは10.3Gbit/sに対応し、一方はジッタ測定用の広帯域(<80MHz)、他方はトリガークロック用狭帯域(<4MHz)の2系統出力を具備している。

電気差動信号測定時には、被測定信号を差動受信回路に入力する。光信号または電気シングルエンド信号時は、電気差動受信回路の正論理側に入力し、反転入力側は直流電圧を印加することで閾値電圧を与え、可変とした。受信回路も送信部と同様に残留ジッタ低減を目指して、周波数特性改善とPDJイコライザを採用した。

これらの対策によりTJ=15.9mUIppと推定される電気信号を、MU150123Bを用いて測定した結果は19mUIppであり、残留PDJは十分に小さく抑えられているといえる。図11に復調波形を示す。

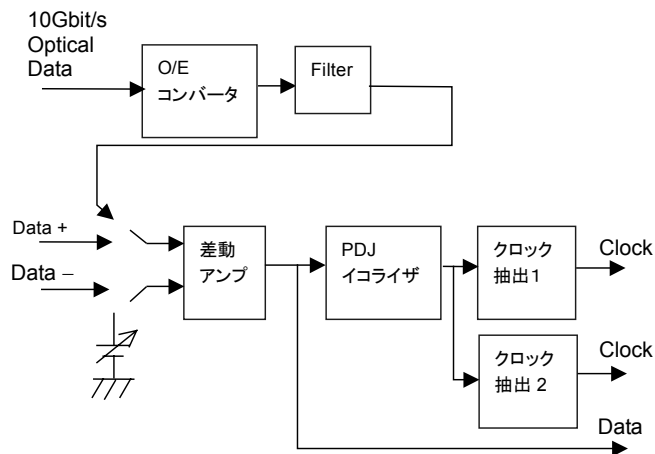


図 10 MU150123B 内部ブロック
Block diagram of MU150123B

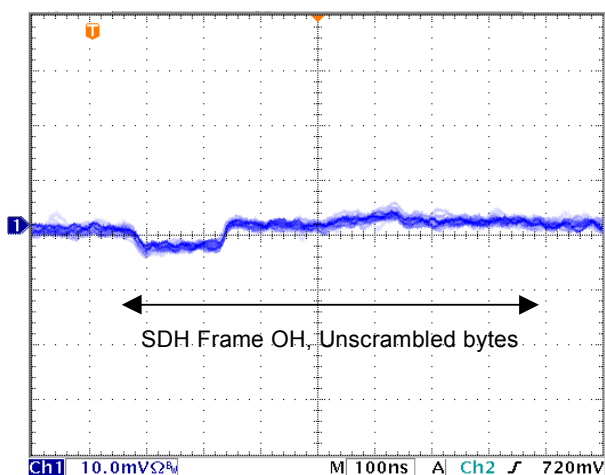


図 11 測定器折り返し接続時復調波形
Demodulated waveform at loop back

No.1 の測定系では XFP 送信部だけでなく XFP 受信部のジッタを含むため、測定結果が大きくなる。しかし、No.1 の結果は、No.2とNo.3を加算した結果よりも低い値となっている。この理由として、測定器の残留ジッタ(約 20mUIpp)の影響以外に、以下の2つが考えられる。

(1) ジッタ抑圧現象

図 12 に示すように、Frame OH 部において受信部が発生するジッタと、送信部が発生するジッタが逆方向に発生しており、重畳することによりジッタが抑圧される。

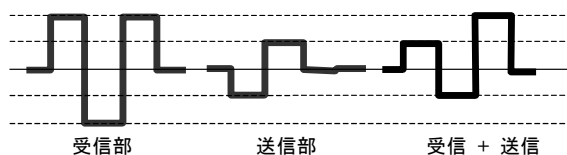


図 12 ジッタ抑圧
Jitter Suppression

(2) 帯域制限効果

XFP 送信部内の CDR は、通常 8MHz 程度の帯域に設定されており、帯域外のジッタを減衰させる LPF(Low Pass Filter)として振る舞う。そのため、XFP 受信部で発生したジッタは XFP 送信部の CDR により一旦減衰し、そこに送信出力部のジッタが重畳した結果が No.1 の値であると考えられる。CDR による帯域制限効果を確認するため、実験的に 8MHz LPF をジッタ測定部に挿入し、測定した結果を表 2 に、その際のジッタ復調波形 図 13 に示す。復調波形からわかるように、Frame OH 部分で発生するジッタの周波数は 3MHz 相当で、矩形波形的である。8MHz の LPF によってその高調波成分と、ランダムジッタが減衰している。

表 2 帯域によるジッタ測定結果の違い

Difference of jitter test results depending on band width

No	評価系	DUT	Filter	Jitter[mUIpp]
3-1	光入力-電気出力	XFP RX	50k-80M	141
3-2	光入力-電気出力	XFP RX	50k-8M	111

このように、XFP モジュールを送受信一体測定することは多くの不確定要素を含んでおり、定量的な評価は望めないことがわかる。より確度の高い測定には、No.2 や No.3 のように、各部位それぞれを切り分けて測定することが必要である。

5 XFP の測定

5.1 評価系による測定結果の違い

開発したプラグインユニット、MP1590B と XFP を用いて図 2~

6 測定系によるジッタ測定を実施した。表 1 に測定結果を示す。

表 1 各評価系での測定結果

Test result for each evaluation block diagram

No	評価系	図	DUT/EUT	Jitter [mUIpp]
1	光入力-光出力	図 2	XFP	120
2	電気入力-光出力	図 3	XFP TX	70
3	光入力-電気出力	図 4	XFP RX	141
4	電気入力-電気出力	図 5	EUT	55
5	光入力-光出力	図 6	EUT+XFP	93

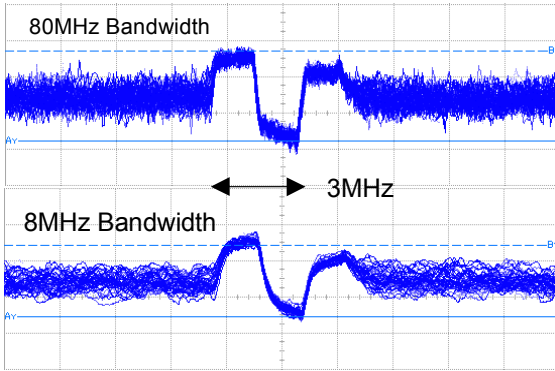


図 13 復調波形
Demodulation waveform

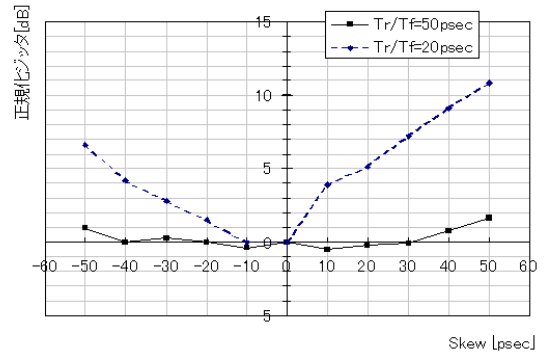


図 15 Skew 対ジッタ測定結果
Measurement of skew vs. jitter

5.2 差動信号間の遅延差 (Skew)

差動信号においては、正転信号と反転信号間の遅延差 (Skew) の解析も重要になっている。差動信号はノイズ耐性に優れる利点がある反面、2本の信号間 Skew がジッタの増加やエラーレート悪化を招くと考えられている。

実際に差動間 Skew を変化させたときに、どの程度ジッタ量の変化があるかを実験した。図 14 に評価系を示す。

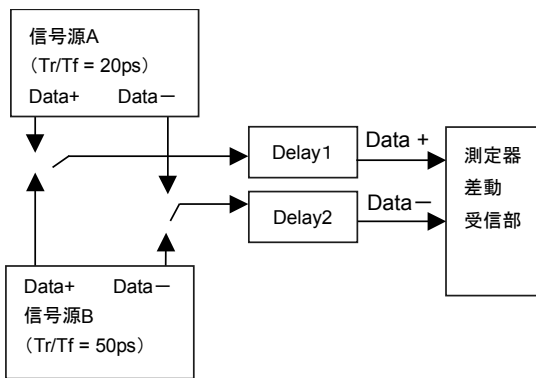


図 14 Skew 対ジッタ測定系
Block diagram for measuring skew vs. jitter

9953.28Mbit/s のデータ信号源に Tr/Tf(信号の立ち上がりおよび立ち下り時間)が 20ps(振幅の 20%-80%時)と比較的短い信号源 A と、Tr/Tf=50ps と比較的長い信号源 B の 2 種類を用意し、差動間の遅延差を Delay 素子 1 と 2 を用いて変化させることで、ジッタ量変化を測定した。図 15 に測定結果を示す。

ジッタ量は Skew 0ps 時の数値で正規化し、変化量[dB]で示した。信号源 A(Tr/Tf=20ps)では、+20ps の Skew を加えたジッタ量は+5dB となり、信号源 B(Tr/Tf=50ps)では-0.2dB となった。つまり、信号源 B では Skew 依存性はほぼ無いといえる。このように Tr/Tf の違いにより Skew の影響度に違いがある理由は、以下のように考えられる。

まず、図 16 上段のように、Skew=0ps のとき、Data 信号の Duty が 50%であれば、Data+と Data-信号の識別点(クロスポイント)は、波形振幅の中心(50%)となる。Tr/Tf と Skew 変化によるクロスポイントの関係は、次式で表される。

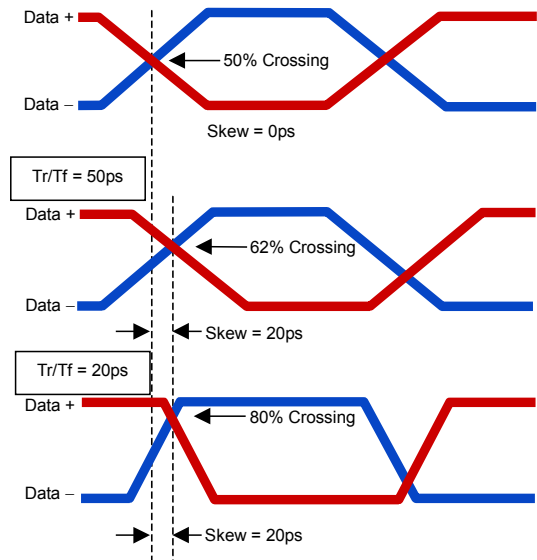


図 16 Skew とクロスポイントの関係
Relationship of skew and cross-point

波形振幅の中心値から y [%]間(対振幅率)における、Tr/Tf の平均値を x [ps]としたとき、単位時間あたりの電圧変化率は、

$$a = \frac{y}{x} \quad [\%/ps] \quad \dots(式 1)$$

で表される。

ここで、Tr/Tf=20ps の信号を考えると、y=60[%]、x=20ps であるので式 1 より、

$$a_{20} = \frac{60}{20} = 3 \quad [\%/ps]$$

である。

同様に, $Tr/Tf=50ps$ の信号の場合,
 $y=60[\%]$, $x=50ps$ より,

$$a_{50} = \frac{60}{50} = 1.2 [\%/ps]$$

であると求まる。但し, 上記式は電圧変化率が一定であると仮定している。実際には信号の High 側, Low に近い部分では非線形特性を示すことがあり上記式とは差異が生じる場合がある。

このような信号に Skew が発生したときのクロスポイントの変動は,

$$Y = \frac{1}{2} a \cdot s [\%] \quad \dots (式 2)$$

で表される。ここで s は Skew[ps]である。

次に, 信号源 A($Tr/Tf=20ps$) で $20ps$ の Skew が生じた状態を考える。式 2 より,

$$Y_{20} = \frac{1}{2} a_{20} \cdot s = 30 [\%]$$

となるため, クロスポイントは 80% となる。通常データ波形は High 側か Low 側に近づくほど歪が大きくなり, クロスポイントがどちらかに近づくほど, さらにジッタを生じやすいと言える。

一方, 信号源 B($Tr/Tf=50ps$)では, 同様に $20ps$ の Skew が生じてても変化量は $Y_{50}=12[\%]$, クロスポイントは $62[\%]$ となり, 信号源 A の $30[\%]$, $80[\%]$ と比較して小さく, 波形歪によるジッタを生じにくいと言える。つまり, Tr/Tf が長いほど, Skew がジッタに与える影響は小さくなると考えられる。

実際に XFP が出力する差動信号の Tr/Tf は $40ps$ 程度と比較的長く, この結果から, XFP 差動出力信号は Skew がジッタ測定に及ぼす影響が小さいといえる。図 17 に, XFP の電気差動出力波形を示す。

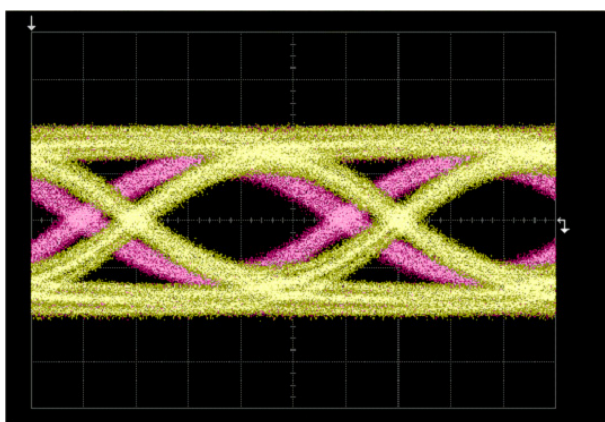


図 17 XFP 電気差動出力波形
 Waveform of XFP differential output

6 むすび

従来の光インタフェースでのジッタ・BER 測定に加え, 電気差動インタフェース測定も 1 台で可能な測定器を開発した。また, XFP を用いた伝送装置のジッタ発生箇所の切り分け手段, Skew によるジッタへの影響などを実験し, その有用性を示した。この測定器が, CDR 等の個別デバイス, XFP 等の光送受信モジュールから伝送装置まで, 幅広い分野でジッタ・BER 測定に使用され, ネットワークの信頼性向上に貢献することを期待する。

参考文献

- 1) 山口, 西小原: “差動伝送方式によるジッタへの影響”, 電子情報通信学会, B-10-41 (2005.03)
- 2) 西小原, 石部: “OC-192/STM-64 において発生するパターン依存性ジッタに関する一考察”, 電子情報通信学会, B-10-114 (2003.3)
- 3) ITU-T Recommendation O.172, Jitter and wander measuring equipment for digital systems which are based on SDH
- 4) Telcordia GR-253-CORE, Synchronous Optical Network (SONET) Transport Systems: Common Generic Criteria

執筆者



小川 幸治
 計測事業統轄本部
 IP ネットワーク事業部
 第 1 開発部



西小原 匡則
 計測事業統轄本部
 IP ネットワーク事業部
 第 1 開発部



山口 和彦
 計測事業統轄本部
 IP ネットワーク事業部
 第 1 開発部



齋藤 岳人
 計測事業統轄本部
 IP ネットワーク事業部
 第 1 開発部

論文

10Gbit/s 電気差動・光信号に対応した ジッタ測定器の開発

「アンリツテクニカル」82号(2006.3)より抜粋

アンリツ株式会社