

データ依存性ジッタの比較解析 -PRBS と SDH/SONET フレームの場合-

By 望月 健
石部 和彦

TABLE OF CONTENTS;

1. はじめに
2. シミュレーションモデル
3. 評価 1: ジッタ測定システムによるデータ依存性ジッタの誤差
 - 3.1 評価 1 のシミュレーション手順
 - 3.2 評価 1 のシミュレーション結果
4. 評価 2: DUT のデータ依存性ジッタ
 - 4.1 評価 2 のシミュレーション手順
 - 4.2 評価 2 のシミュレーション結果
 - 4.3 評価 2 の考察
5. 結論

データ依存性ジッタの比較解析 -PRBSとSDH/SONETフレームの場合-

1. はじめに

SDH/SONET/OTN 用光トランスミッタのジッタ発生試験を行う際、多くのデバイスベンダは、試験データパターンとして擬似ランダムビット系列（PRBS: Pseudo-Random Bit Sequence）のような信号遷移がランダムに発生するパターン（ここではノンフレーム信号と呼ぶ）を用いる場合が多い。しかし、これらのデバイスが伝送装置上に実装される際には、SDH/SONET/OTN のような実信号（フレーム信号と呼ぶ）で最終的にジッタ評価が行われる。そのため、デバイスベンダと装置ベンダの間でジッタ量の整合が取れないといった問題が時々発生している。この主な理由として以下の2点が挙げられる。1点目として、ノンフレーム信号とフレーム信号によって被測定物（DUT: Device Under Test）で発生するジッタ量の違いが理論的にどの程度になり、その違いが DUT のパラメータによってどのように影響されるのかが、今まで定量的に評価・証明されていなかった。2点目として、多くのジッタテストが採用しているジッタ測定法（データ信号をクロック信号に変換して、そのクロック信号のジッタ量を測定）の測定誤差が、ノンフレーム信号とフレーム信号によってどの程度違うのかが定量的に評価・証明されていなかった。本ペーパーでは、これら2点の課題に対して、DUT とジッタ測定法をモデル化した計算機シミュレーションを用いて検証する。

2. シミュレーションモデル

データ信号のジッタ成分をその特性から分類した場合、ディターミニスティックジッタ（DJ）とランダムジッタ（RJ）に分けられ、さらに DJ はデータ依存性ジッタ（DDJ）と周期ジッタ（PJ）に分けられる。このうちデータパターンに直接影響を受けるのは DDJ である。このため、本計算機シミュレーションはジッタ成分として DDJ のみを考慮している。DDJ の発生原因には、DUT の周波数帯域幅や伝送信号の反射等による波形歪みが考えられる [1]。本シミュレーションでは、DUT やジッタ測定法の周波数帯域幅によって DDJ が発生し、その大きさがデータパターンによって異なることを定量的に検証する。まず始めに評価 1 として、多くのジッタテストが採用しているジッタ測定法（データ信号をクロック信号に変換して、そのクロック信号のジッタ量を測定）の DDJ 測定誤差がノンフレーム信号とフレーム信号によってどの程度の違うのかを、図 1 の構成を用いて定量的に検証する。次に評価 2 として、DUT の出力信号のジッタ量がノンフレーム信号とフレーム信号で理論的にどの程度違うのかを、図 2 の構成を用いて定量的に検証する。ここで、AC カップリングおよび高周波カットオフ特性に起因する DUT の周波数帯域幅をハイパスフィルタ（HPF）とローパスフィルタ（LPF）で表し、これらのカットオフ周波数を変えることによって DDJ への影響を検証する。

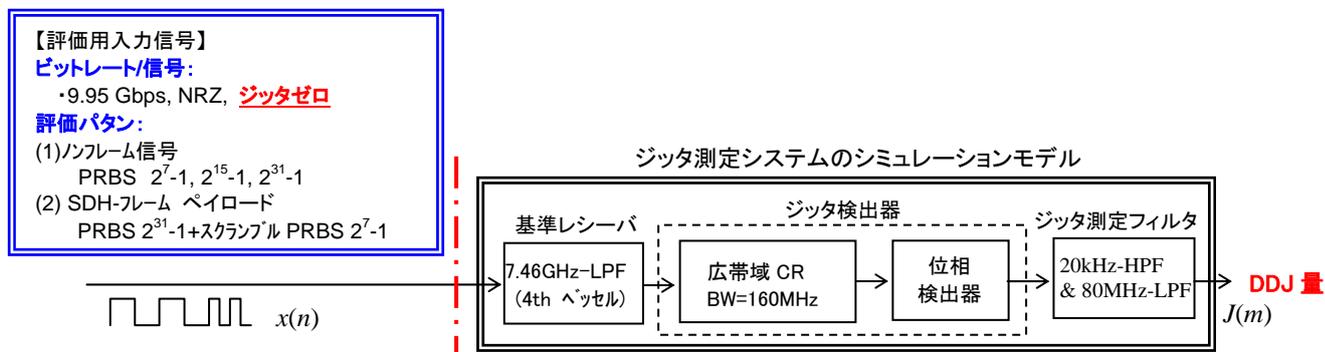


図1 評価1：ジッタテストに採用されているジッタ測定方法のデータ依存性ジッタ誤差

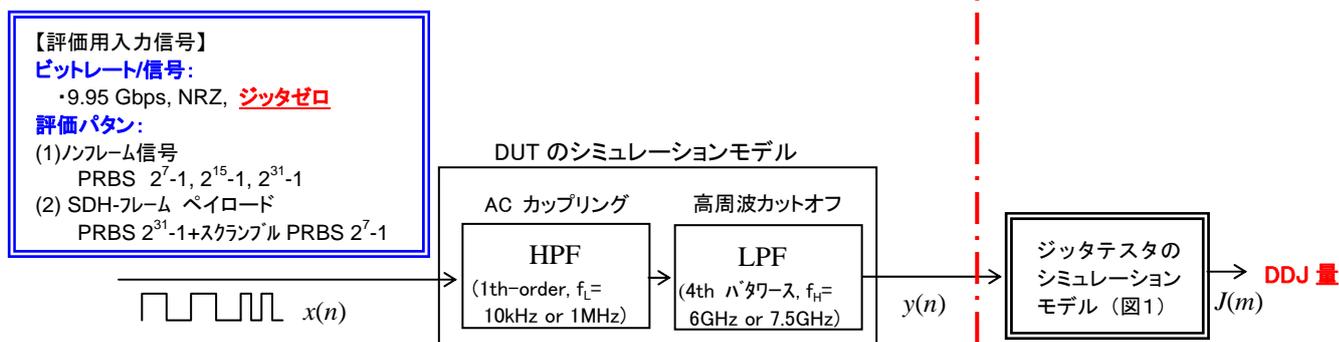


図2 評価2：被測定物のデータ依存性ジッタ

3. 評価1：ジッタ測定システムによるデータ依存性ジッタの誤差

3. 1 評価1のシミュレーション手順

図1 において、評価用入力信号としてデータレート 9.95Gbit/s の NRZ 信号を模擬したジッタゼロのデータ信号系列 $x(n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) をジッタ測定システムに入力した。 $x(n)$ の値は 1 (High レベル) または -1 (Low レベル) であり、そのサンプリング間隔はシミュレーションが 1mUI の分解能を得るように 1 ユニットインターバル ($1\text{UI} = 1/9.95\text{GHz}$) の 1/1000 である (図3の $x(n)$ 参照)。 $x(n)$ のデータパターンには、ノンフレーム信号として PRBS 2^7-1 、 $2^{15}-1$ 、 $2^{31}-1$ 、または SDH フレーム信号の計 4 種類を使用した。SDH フレーム信号のペイロード部分は、PRBS 2^7-1 でスクランブルされた PRBS $2^{31}-1$ である。各 PRBS は、ITU-T 勧告 O.150 および O.151 で規定されている以下の生成多項式によって発生される。

$$\text{PRBS } 2^7-1 ; 1+X^6+X^7$$

$$\text{PRBS } 2^{15}-1 ; 1+X^{14}+X^{15}$$

$$\text{PRBS } 2^{31}-1 ; 1+X^{28}+X^{31}$$

ジッタ測定システムの構成要素である基準レシーバの伝達関数には、ITU-T 勧告 ANNEX B/G.957 に記載されているカットオフ周波数がデータレートの 0.75 倍(すなわち、7.46 GHz)である 4 次のベッセルフィルタを適用した。第 2 の構成要素であるジッタ検出器のシミュレーションモデルは、ITU-T Q5/Study Group 4 で審議中の位相検波方式を参考にした [2]。この位相検波方式は、広帯域クロックリカバリ (W-CR) によって入力データ信号をデータレート (9.95GHz) のクロック信号に変換した後、位相検波によってクロック信号の各立上りエッジにおけるジッタを求める。このシミュレーションでは、W-CR の通過帯域幅を上側ジッタ測定帯域 (80MHz) の 2 倍の 160MHz に設定した。第 3 の構成要素であるジッタ測定フィルタは、ITU-T 勧告 G.783 および G.825 に記載されているジッタの低域と高域を抑圧するフィルタであり、低域カットオフ 20kHz の 1 次 HPF と高域カットオフ 80MHz の 3 次バターワース LPF で定義されている。ジッタ測定システムからは、1UI に等しいサンプリング間隔をもつ DDJ 系列 $J(m)$ ($m=0, 1, 2, \dots$) が出力される。

3. 2 評価 1 のシミュレーション結果

表 1 に図 1 の評価系によって得られた DDJ 時系列 $J(m)$ ($m=0, 1, 2, \dots, M-1$) の Peak to Peak 値 DDJpp を示す。入力信号がジッタゼロにも関わらずジッタ測定システムで DDJ が発生する理由は、位相検波器の W-CR でデータ信号がクロック信号に変換される際、データ信号中の High レベルや Low レベルの長さに応じて、再生クロック信号にタイミング誤差が発生するためである。表 1 から、現在多くのジッタテストで採用されているジッタ測定方法のデータパターンに依存する測定誤差は最大 5mUIpp であることがわかる。これは ITU-T 勧告 G.783 で規定されている測定装置の最大許容ジッタ制限 100 mUIpp よりも十分に小さい。

表 1 評価 1 のシミュレーションによるジッタ測定システムの DDJpp 誤差
単位：mUIpp

データパターン			
ノンフレーム信号			SDH フレーム信号
PRBS 2^7-1 ($M=127$)	PRBS $2^{15}-1$ ($M=32767$)	PRBS $2^{31}-1$ ($M=20 \times 10^6$)	ペイロード: PRBS 2^7-1 + スランブル PRBS $2^{31}-1$ ($M=20 \times 10^6$)
1	4	5	4

なお、DDJpp の評価に使用された $J(m)$ のサンプル数 M は、ノンフレーム信号の PRBS 2^7-1 と PRBS $2^{15}-1$ の場合、それぞれ最大パターン長の $M=2^7-1=127$ と $M=2^{15}-1=32767$ である。ノンフレーム信号の PRBS $2^{31}-1$ と SDH フレーム信号の場合、PRBS の最大パターン長が非常に大きく膨大な計算時間を要するため、サンプル数 M はともに 20×10^6 サンプルである。但し、この 20×10^6 サンプルには、PRBS $2^{31}-1$ の場合は High レベルが 31 UI 連続するパターン

が含まれ、SDH フレーム信号の場合にはペイロード部分に High レベルが 38 UI 連続するパターンが含まれている(これらの High レベル長は各最大パターン長の中で 1 度だけ出現する)。したがって 20×10^6 サンプルにも関わらず最大パターン長を用いた評価に近い DDJpp が得られると考えられる。なお厳密に言うと、DDJpp はパターン中に含まれる High レベルや Low レベルの最大長だけでなく、その近傍のパターンにも影響を受けるので、PRBS の発生に異なる生成多項式を用いた場合には表 1 と異なる結果になることが予想される。

4. 評価 2 : DUT のデータ依存性ジッタ

4. 1 評価 2 のシミュレーション手順

一般に、光トランスミッタに内蔵されるレーザードライバはその入力部や出力部において AC 結合される場合がある [3]。AC 結合は DC を含む低周波成分を遮断し、データ信号波形を歪ませる。図 2 では、DUT の AC 結合の典型的なモデルとして、カットオフ周波数 f_L が 10kHz もしくは 1MHz の 1 次 HPF を使用する。一方、光トランスミッタの高周波遮断特性のモデルとして、カットオフ周波数 f_H が 6GHz もしくは 7.5GHz の 4 次バターース LPF を使用する。一般的には、DC 成分を遮断してしまう HPF が DDJ を発生させる主要原因であると考えられているが、LPF もデータ信号波形を歪ませて DDJ を生じる要因となる [3]。LPF にバターースフィルタを使用した理由は、実際に光トランスミッタの送信信号の周波数特性がバターース特性になっている場合があるためである。

DUT 入力信号 $x(n)$ には評価 1 と同じ 4 種類のデータパターンが使用される。DUT 出力信号 $y(n)$ の DDJ は、図 1 と同じジッタ測定システムのシミュレーションモデルによって検出される。図 3 は、図 2 のシミュレーションで得られた DUT の入出力信号 $x(n)$ 、 $y(n)$ の例である。

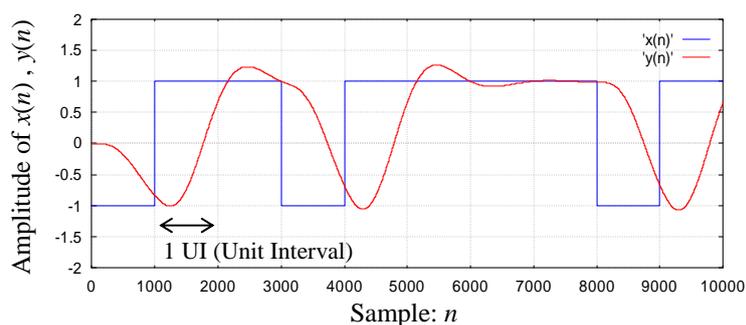


図 3 評価 2 のシミュレーションで得られる DUT 入出力波形の例
(HPF: $f_L = 10\text{kHz}$, LPF: $f_H = 6\text{GHz}$ の場合)

4. 2 評価 2 のシミュレーション結果

表 2 に、図 2 のシミュレーションによって得られた DDJ 時系列 $J(m)$ ($m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$) の Peak to Peak 値 DDJpp を示す。シミュレーション No. 1 ~ No. 8 では、異なるカットオフ

周波数 (f_L および f_H) をもつ HPF と LPF の組み合わせを DUT モデルに使用した。以下、結果について順に解説する。

表2 評価2のシミュレーションによる DUT の DDJpp 単位 : mUIpp

Sim. No.	DUT の帯域制限 (“-” フィルタ無し)		データパタン			
			ノンフレーム信号			SDH フレーム信号
	f_L of HPF	f_H of LPF	PRBS 2^7-1 ($M=127$)	PRBS $2^{15}-1$ ($M=32767$)	PRBS $2^{31}-1$ ($M=20 \times 10^6$)	ペイロード: PRBS $2^{31}-1$ + スクランブル PRBS 2^7-1 ($M=20 \times 10^6$) (図4参照)
1	10kHz	-	1	4	5	4
2	1MHz	-	1	4	5	4
3	-	7.5GHz	1	5	8	7
4	-	6GHz	1	7	37	60
5	10kHz	7.5GHz	1	5	8	7
6	1MHz	7.5GHz	1	7	16	8
7	10kHz	6GHz	1	7	38	61
8	1MHz	6GHz	1	8	45	61

(シミュレーション No. 1 - No. 2)

シミュレーション No. 1 と No. 2 は DUT が HPF だけでモデル化されている。各データパタンに対する DDJpp は非常に小さく、表1のジッタ測定誤差と同じ値である。すなわち、HPF に起因する DDJpp は測定誤差に対して無視できるほど小さい。

(シミュレーション No. 3 - No. 4)

シミュレーション No. 3 と No. 4 は DUT が LPF だけでモデル化されている。ノンフレーム信号では、データパタンの最大パタン長が大きいほど LPF によって DDJpp が増加する。特に No. 4 は f_H が低いいため、図3で示したように $y(n)$ の波形歪みが大きい。No. 4 において、ノンフレーム信号の PRBS $2^{31}-1$ と SDH フレーム信号では、DDJpp がそれぞれ 37mUIpp と 60mUIpp と非常に大きいシミュレーション結果が得られた。

(シミュレーション No. 5 - No. 8)

シミュレーション No. 5 から No. 8 は DUT が HPF と LPF の両方でモデル化されている。HPF と LPF の両方の効果によって、ノンフレーム信号の PRBS $2^{31}-1$ では LPF 単独の場合よりも大きな DDJpp が生じている。例えば、No. 4 の DDJpp = 37mUIpp に対し、No. 8 の DDJpp = 45mUIpp。一方、SDH フレーム信号の場合は、HPF を組み合わせた影響は少ない結果となった。

図4に、シミュレーション No. 1-No. 8 において SDH フレーム信号を用いた場合に得られた DDJ 時系列 $J(m)$ の一部分を示す。これらの $J(m)$ はいずれも $m = 1000 \sim 6000$ 付近がスクランブルされない SDH フレームヘッダ部分に相当する。DUT が HPF のみでモデル化さ

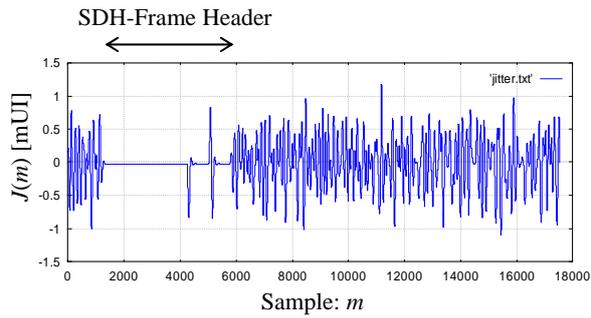
れたシミュレーション No. 1 と No. 2 の場合、DDJpp はペイロード部のジッタが支配的となっている。一方、LPF を考慮した No. 3 から No. 8 の場合、DDJpp はヘッダ部のジッタが支配的になっている [4]。

4. 3 評価2の考察

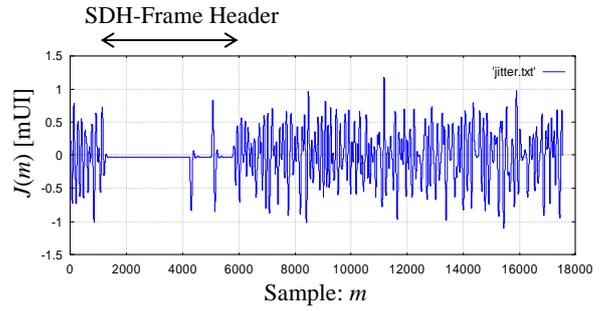
表2の各シミュレーションにおいて、ノンフレーム信号の PRBS 2^7-1 と PRBS $2^{31}-1$ で発生する DDJpp の差は、5 倍から 45 倍のひらきがあった。PRBS の最大パタン長が大きいほど DDJpp が大きいのは、データパタン中に長い High レベルや Low レベルが発生するためと思われる。

SDH フレーム信号のペイロード部分は PRBS 2^7-1 でスクランブルされた PRBS $2^{31}-1$ パタンであるため、最長の High レベルはノンフレーム信号の PRBS $2^{31}-1$ よりも長い 38UI である。それにも関わらず、No. 1-No. 3、No. 5 および No. 6 において、SDH フレーム信号の DDJpp はノンフレーム PRBS $2^{31}-1$ の DDJpp よりも小さい。この理由は、3 タップの生成多項式から発生した PRBS $2^{31}-1$ は、長い High レベルや Low レベルの発生が偏っているため、フィルタリングにより大きな DDJpp が発生しやすいためと思われる。一方、SDH フレームのスクランブルされた PRBS $2^{31}-1$ では、上記の偏りが拡散されるため、大きな DDJpp が発生しにくいと思われる。

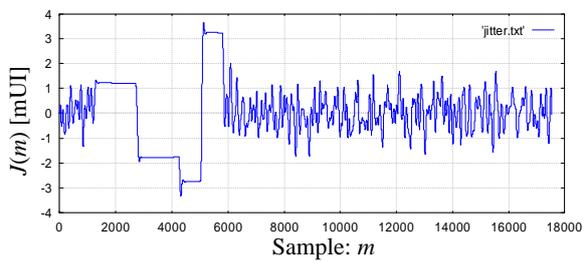
図4から分かるように、SDH フレーム信号の場合、LPF の効果によってヘッダ部でペイロード部よりも大きな DDJ が発生する傾向がある。そのため、SDH フレーム信号のペイロード部が PRBS $2^{31}-1$ パタンでも、SDH フレーム信号とノンフレーム信号とではジッタ量の整合が取れない。したがって、DUT のジッタ評価に使用するテストパタンには、最終試験に使用される SDH フレーム信号を用いるべきである。



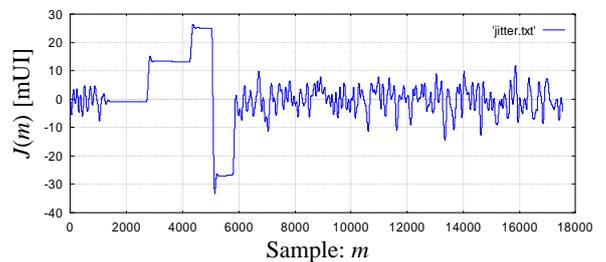
(No. 1) 10kHz-HPF, No-LPF



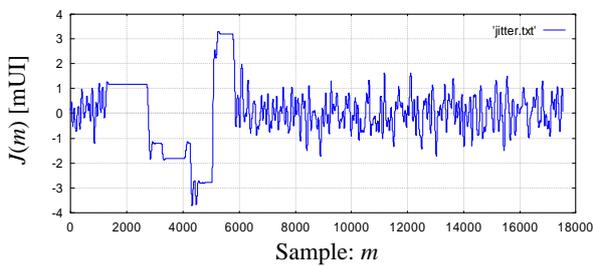
(No. 2) 1MHz-HPF, No-LPF



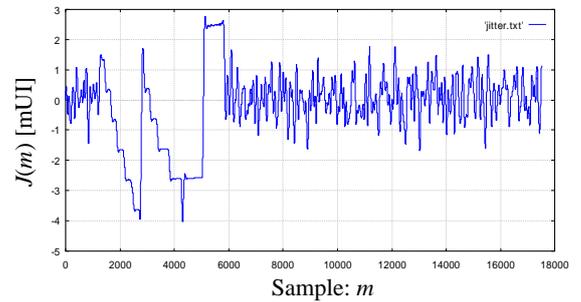
(No. 3) No-HPF, 7.5GHz-LPF



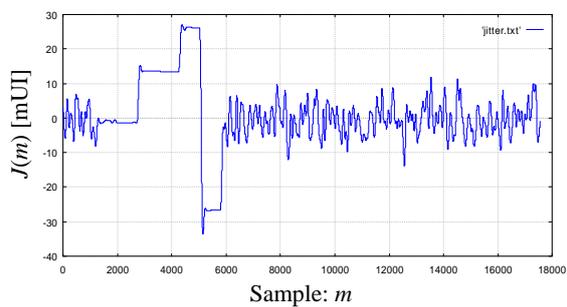
(No. 4) No-HPF, 6GHz-LPF



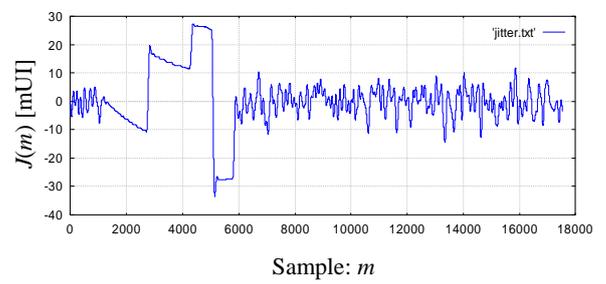
(No. 5) 10kHz-HPF, 7.5GHz-LPF



(No. 6) 1MHz-HPF, 7.5GHz-LPF



(No. 7) 10kHz-HPF, 6GHz-LPF



(No. 8) 1MHz-HPF, 6GHz-LPF

図4 表2のSHDフレーム信号に対するDDJ時系列 $J(m)$

5. 結論

DUTの低域および高域周波数カットオフに起因してDDJが生じ、DDJppは送信データパターンに依存することを、計算機シミュレーションによって検証した。評価1によって、多くのジッタテストが採用しているジッタ測定法によるDDJの理論誤差は5mUIpp以下(@9.95Gbit/s)であることが明らかになった。また評価2によって、DUTモデルにHPFとLPFを組み合わせて使用した結果、HPFよりもLPFの方がDDJppを増大させることがわかった。さらにノンフレーム信号のPRBS 2^7-1 パターンとPRBS $2^{31}-1$ パターンとのDDJppの差は、HPFとLPFの組み合わせに依存し、5倍から45倍のひらきがあった。SDHフレーム信号の場合、LPFの効果によってスクランブルされないヘッダ部でペイロード部よりも大きなDDJが発生する。そのため、SDHフレーム信号のペイロード部がPRBS $2^{31}-1$ パターンでも、SDHフレーム信号とノンフレーム信号とではジッタ量の整合が取れないことがわかった。すなわち、ジッタ評価に使用するテストパターンには、最終試験に使用するフレームパターンを使用する必要があることが明確になった。

参考文献

- [1] K. Kim, J. Hwang, Y.B. Kim, and F. Lombardi, "Data Dependent Jitter (DDJ) Characterization Methodology," *IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, Monterey, CA, October 3-5, 2005, pp294-302.
- [2] K. Mochizuki, "Phase insertion algorithms for Appendix VIII/O.172," ITU-T SG4, Q5, Contribution WD.09, South Queensferry, September 27 - 30, 2004.
- [3] "Interfacing maxim laser Drivers with laser diode," Maxim Integrated Products, Inc., Sunnyvale, CA, Application Note HFAN-2.0, rev. 0, May, 2000.
- [4] K. Ishibe, "The importance of calibration standards in jitter measurements," *IEEE Optical Communications*, pp. S6-S8, Nov. 2003.



お見積り、ご注文、修理などのお問い合わせは下記まで。記載事項はおことわりなしに変更することがあります。

アンリツ株式会社

<http://www.anritsu.co.jp>

本社	TEL046-223-1111	〒243-8555	神奈川県厚木市恩名5-1-1
T&M営業本部			
第1営業部	046-296-1202	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第2営業部	046-296-1203	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第3営業部	03-5320-3560	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
第4営業部	03-5320-3567	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
ネットワークス営業本部			
第1営業部	046-296-1205	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第2営業部	03-5320-3551	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
第3営業部	03-5320-3565	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
東京支店	03-5320-3559	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
北海道支店	011-231-6228	060-0042	札幌市中央区大通西5-8 昭和ビル
東北支店	022-266-6131	980-0811	仙台市青葉区一番町2-3-20 第3日本オフィスビル
関東支社	048-600-5651	330-0081	さいたま市中央区新都心4-1 FSKビル
千葉営業所	043-351-8151	261-0023	千葉市美浜区中瀬1-7-1 住友ケミカルエンジニアリングセンタービル
東関東支店	029-825-2800	300-0034	土浦市港町1-7-23 ホープビル1号館
新潟支店	025-243-4777	950-0916	新潟市米山3-1-63 マルヤマビル
中部支社	052-582-7281	450-0002	名古屋市中村区名駅3-22-4 みどり名古屋ビル
関西支社	06-6391-0111	532-0003	大阪市淀川区宮原4-1-14 住友生命新大阪北ビル
東大阪支店	06-6787-6677	577-0066	東大阪市高井田本通7-7-19 昌利ビル
中国支店	082-263-8501	732-0052	広島市東区光町1-10-19 日本生命光町ビル
四国支店	087-861-3162	760-0055	高松市観光通2-2-15 第2ダイヤビル
九州支店	092-471-7655	812-0016	福岡市博多区博多駅南1-3-11 博多南ビル

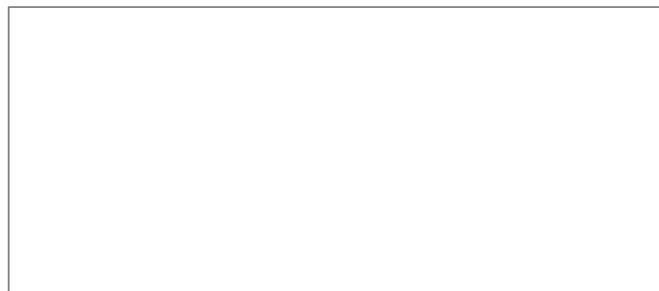
計測器の使用法、その他についてのお問い合わせは下記まで。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221、FAX: 0120-542-425
受付時間/9:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@cc.anritsu.co.jp

●ご使用前に取扱説明書をよくお読みの上、正しくお使いください。

0604



■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

No. MP1590B-J-R-1-(1.00) **公知** 2006-9 AKD



古紙配合率70%再生紙を使用しています。