



## フレキシブル光信号品質監視技術

NTT未来ねっと研究所

しゃげ いっぺい たから ひでひこ かわにし さとき  
社家 一平 / 高良 秀彦 / 川西 悟基

将来の光ネットワークを実現するためには、光信号品質を信号フォーマットやビットレートに依存せず（トランスペアレント）に検知できる、小型かつ低価格の光信号品質監視技術が必要です。NTT未来ねっと研究所では、複雑なクロック抽出回路や電気終端を使わず、短時間で光信号品質をモニタできる技術（Qモニタ）を確立しました。多種多様な光信号を取り扱う光ネットワークに対応できるフレキシブルな監視手段として利用可能です。

### 光信号品質監視の重要性

光信号品質監視（図1）は光ネットワークにおいて重要な機能の1つであり、その要求条件は用途に応じてさまざまである。これまでいくつかの方法が検討されてきています<sup>(1)~(3)</sup>（表1）。一般に、信号監視としてもっとも正確なのはビット誤り率（BER: Bit Error Ratio）監視です。しかしBER監視には、サービス運用中の監視が困難な点、信号品質が良い場合に測定時間が長くなってしまう点、ビットレートや信号フォーマットに依存する点などの短所があります。そのために、いかにしてビットレートや信号フォーマットに依存せず（トランスペアレント）、より正確に短時間で通信を妨げることなく光信号品質を監視するかが光信号監視法を検討するうえで問題となっています。これまで検討されてきた中でも特にQ値<sup>\*1</sup>を測定する方法は、上記の問題点の多くを克服する方法の1つとして注目されています。同期サンプリングにより得られる信号アイパターン<sup>\*2</sup>の振幅分布からQ値を測定する方法<sup>(4),(5)</sup>が従来の方法でした。この従来法では、信号とサンプリングクロックの同期にクロック抽出回路が必要ですが、特定のビットレートや信号フォーマットにしか対応できないため、

トランスペアレント性を実現するのが難しいという問題がありました（図2(a)）。

「Qモニタ」は、信号ビットレートと同期していないサンプリングクロックでバイナリ光信号をサンプリングする「非同期サンプリング技術」（図2(b)）と、得られるサンプリング信号の振幅をヒストグラム化し、「1」レベルと「0」レベルのそれぞれの振幅分布を評価する「振幅ヒストグラム評価技術」を用います。振幅分布から定義される光信号品質パラメータ（測定Q値： $Q_m$ ）を見積

- \*1 Q値：Quality factorのQをとってQ値と呼び、ここでは光信号品質を表します。バイナリ信号の「1」と「0」の振幅は雑音などでばらつきますが、その広がり（標準偏差）と平均振幅の差からQ値を定義します。例えば品質が劣化すると、信号の振幅ばらつきが大きくなったり、平均振幅の差が小さくなったりするためにQ値は小さくなります。
- \*2 信号アイパターン：現在の光通信は、光パルスのON/OFFで表されるバイナリ信号が用いられていますが、その光パルス列をビット単位で重ねて表示することにより、「1」や「0」の振幅ばらつきや振幅差が判別しやすくなります。重ね書きにより、「目」が開いているような表示になるため「アイパターン」または「アイダイヤグラム」と呼びます。

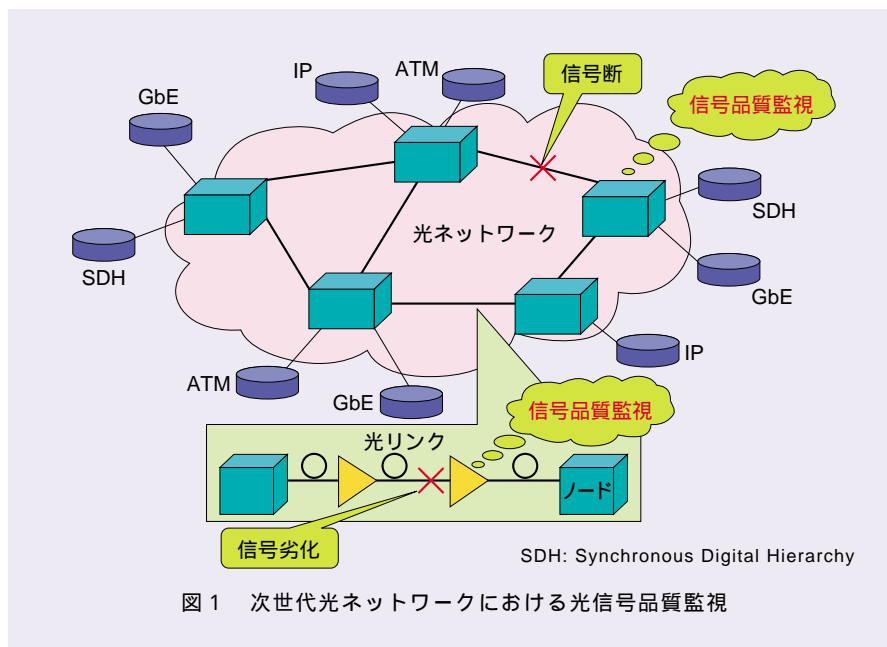


図1 次世代光ネットワークにおける光信号品質監視

もり、その絶対値または相対変化によって光信号品質をモニタします。

### 光信号品質パラメータ $Q_m$

バイナリ光信号をサンプリングし、その振幅分布をヒストグラム化し、得られた振幅ヒストグラムから光信号品質パラメータ $Q_m$ を求める手順の説明を図3に示します。マーク「1」とスペース「0」のそれぞれの分布の広がり（標準偏差： $\sigma_1, \sigma_0$ ）は、光信号に重畳された雑音振幅を表します。一方、マーク「1」とスペース「0」の分布の平均振幅の差（ $\mu_1 - \mu_0$ ）は、光信号振幅を表しています。よって、

$$Q_m = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

で表されるパラメータ $Q_m$ は、光信号対雑音比に関係しており、光信号品質を表すパラメータとなります。従来は、光信号のビットレートと同期したサンプリングクロックを用いて、マーク「1」とスペース「0」の振幅分布を正確に測定することでQ値を測定していましたが、同期に必要なクロック抽出系が信号フォーマットやビットレート依存のために、トランスペアレント性を実現できませんでした。そのため、将来の光ネットワークとして、接続するクライアントが多様化し光信号ビットレートやフォーマットが変わるような場合〔例えば、ギガビットイーサ、10ギガビットイーサ、SDHフォーマットの2.5 Gbit/sや10 Gbit/s、OTN（Optical Transport Network）フレームの10.7 Gbit/sや43 Gbit/sなど〕には対応できませんでした。しかしQモニタでは多様なクライアントの光ネットワークに対応できます。

### 非同期サンプリングによる平均化Q値評価法の原理

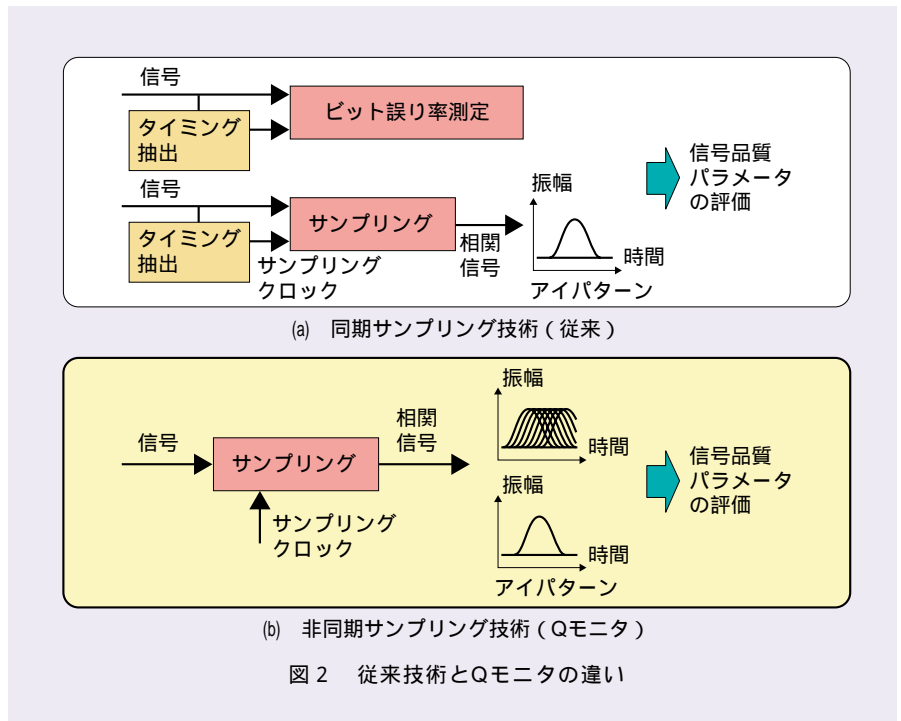
Qモニタは前述のクロック抽出系を用いずに、光信号とは非同期のクロックによってサンプリングし、得られる振幅ヒストグラムを評価する方法を行います。平均化Q値（ $Q_{avg}$ ）の定義<sup>(3)</sup>を説明す

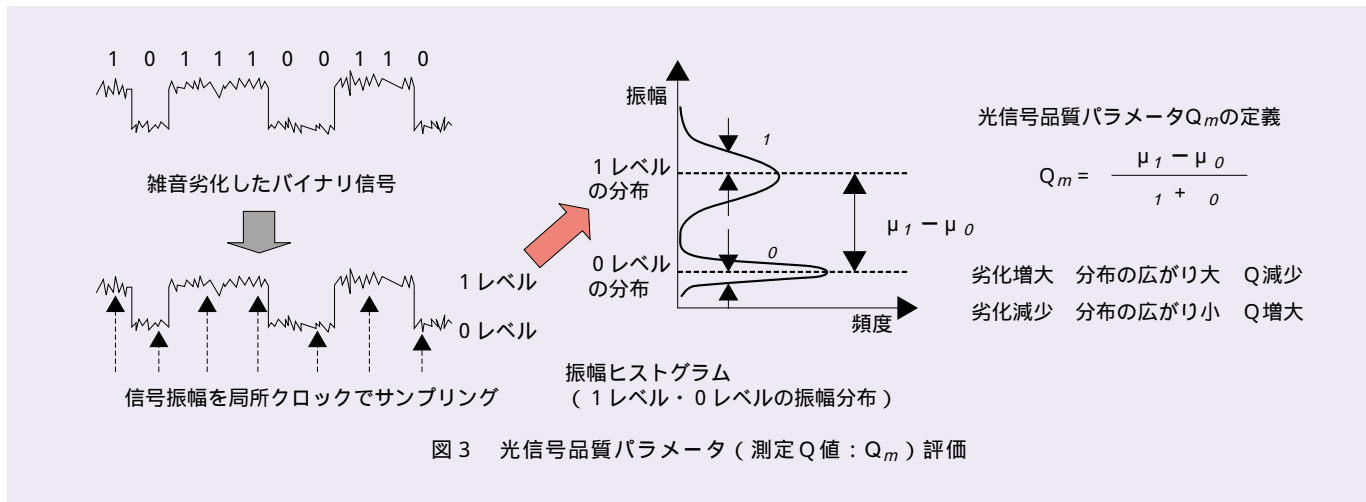
る典型的な非同期アイパターンと非同期振幅ヒストグラムを図4に示します。非同期アイパターンとは、時間的にドリフトしたアイパターンのことです。光信号とサンプリングクロックが同期していないために、マーク「1」の部分とスペース「0」の部分のほかに、マークからスペースに変化する途中（スペースからマークに変化する途中）の部分がサンプリングされ振幅ヒストグラムに含まれます。

この途中の部分を以下ではクロス部分といいます。つまり、この非同期振幅ヒストグラムには、Q値評価に不要なクロス部分の振幅分布までもが含まれるわけです。これが測定するQ値の不確定性に影響します。したがって、クロス部分を除去するために2つのしきい値 $\mu_{th1}$ および $\mu_{th0}$ を設定し、クロス部分を一定の割合で除去します。そして、あらかじめ設定したしきい値 $\mu_{th1}$ よりも振幅の大き

表1 従来技術とQモニタの特徴比較

	監視法	構成	監視機能			フォーマット・ビットレート透明性
			信号断	SNR劣化	波形劣化	
従来技術	BER測定 パリティチェック	×複雑 (タイミング抽出, 高速O/E・ 電子デバイス必要)				× (固定フォーマット・ ビットレート)
	波形測定	×複雑 (タイミング抽出, 高速O/E・ 電子デバイス必要)				× (固定フォーマット・ ビットレート)
	パワーモニタ	簡易		×	×	
	スペクトルモニタ	やや複雑 (スペクトル解析)			×	
本技術	Qモニタ (非同期)	簡易				





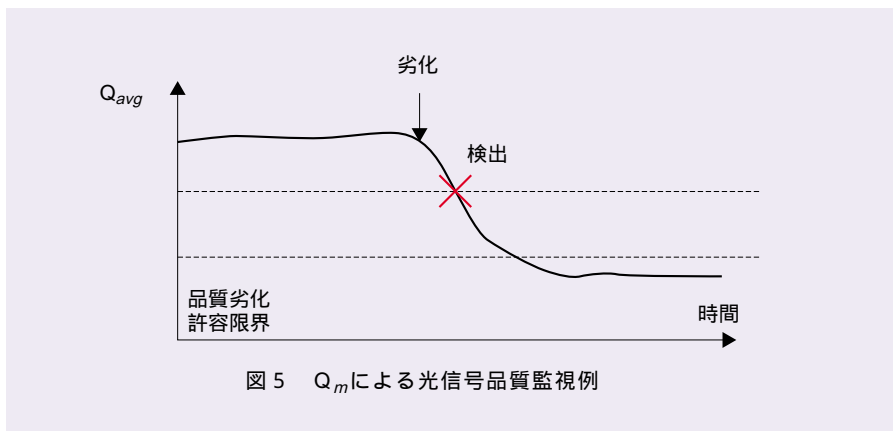
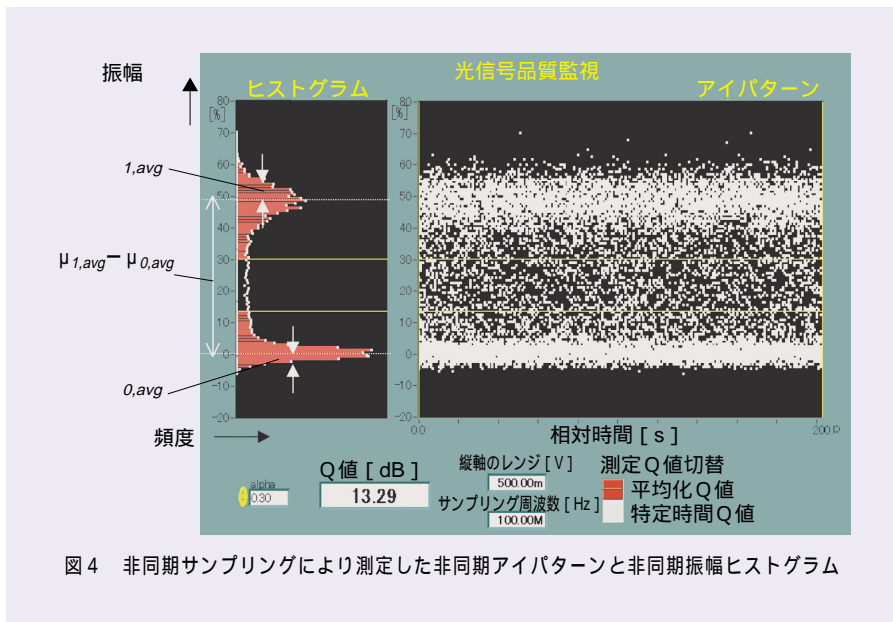
い部分をマークレベル「1」の分布、あらかじめ設定したもう一つのしきい値 $\mu_{th0}$ よりも振幅の小さい部分をスペースレベル「0」の分布と定義し、式(1)と同様に測定する $Q$ 値を平均化 $Q$ 値( $Q_{avg}$ )として、

$$Q_m = Q_{avg} = \frac{\mu_{1,avg} - \mu_{0,avg}}{\sigma_{1,avg} + \sigma_{0,avg}} \quad (2)$$

で定義します。ここで $\mu_{i,avg}$ と $\sigma_{i,avg}$ はそれぞれマーク( $i=1$ )とスペース( $i=0$ )部の振幅分布の平均と標準偏差を示しています。平均化 $Q$ 値( $Q_{avg}$ )の不確かさや、雑音劣化した場合のBER依存性は、クロス部分の除去割合によって変化します。そのため、しきい値を最適に設定することにより $Q_{avg}$ を精度よく測定し、相対的な劣化をモニタすることが可能です(図5)。また $Q_{avg}$ とBERの関係をあらかじめ測定して補正係数を求めておけば、それを用いて測定した $Q_{avg}$ からBERを求めることもできます。

### 非同期サンプリングによるアイパターン測定および特定時間 $Q$ 値( $Q_t$ )の評価

ここまでは、従来の $Q$ 値が同期サンプリングによって得られるものであり、そのままでは透明性を実現できないこと、そのために非同期サンプリングにより得られる非同期振幅ヒストグラムを評価するアルゴリズムを開発し、平均化 $Q$ 値( $Q_{avg}$ )により光信号品質監視が可能であることを述べまし



た。ここでは、さらに、従来法(同期サンプリング)でしか得られなかったアイパターン測定および特定時間 $Q$ 値( $Q_t$ )を非同期サンプリングによって得る方法

について解説します。

従来の同期サンプリングで得られる $Q$ 値は平均化 $Q$ 値( $Q_{avg}$ )より正確ですが、それは、サンプリングによって得ら

れる振幅分布がマーク「1」とスペース「0」だけの分布になっており、 $Q_{avg}$ の場合と違ってクロス部分に相当する不確定な要因を含んでいないからです。つまり同期サンプリングだと、固定のアイパターンが測定でき、アイ開口のもっとも開いた部分の時間 $t$ の分布を正確に求められるので、正確な測定Q値（特定時間Q値： $Q_t$ ）を得ることができます。

信号からタイミング抽出を行わない非同期サンプリングの場合、一般に信号波形が時間軸上で流れてしまいアイパターンは図4のように閉じてしまいます。しかし、サンプリング速度を速くして波形が流れる前に短時間でサンプリングしてデータを取り込むことができれば、それによってアイパターン波形を測定し、非同期サンプリングでもアイ開口のもっとも開いた部分のQ値（ $Q_t$ ）を求めることができます。ただし、信号およびサンプリングクロックの周波数の設定のずれが大きいと波形の流れる速度が高すぎてサンプリング速度が追いつかず $Q_t$ を測定することができません。したがって、この方法は、信号ビットレートの種類（例えば、SDHフォーマット、ギガビットイーサ等）がある程度分かっている場合や、サンプリングクロック周波数を掃引して合わせ込むことが可能な場合に適用できます。

NTT未来ねっと研究所では以上の方法を提案し、実験的に検証することに成功しました。測定により得られたアイパターン、アイ開口が最大の時間 $t$ の振幅ヒストグラム、および $Q_t$ を図6に示します。パラメータ $Q_t$ は、 $Q_m = Q_t = \mu_1 - \mu_0 / (\sigma_1 + \sigma_0)$  (3) により求められます。図6中の2本の白線の間が時間 $t$ であり、2本の白線間のサンプリング点を振幅分布の評価に用いています。

### OEサンプリングを用いた光信号品質監視回路

前述したような非同期サンプリング型の光信号品質監視回路を作成しました。ブロック図を図7に示します。本回路

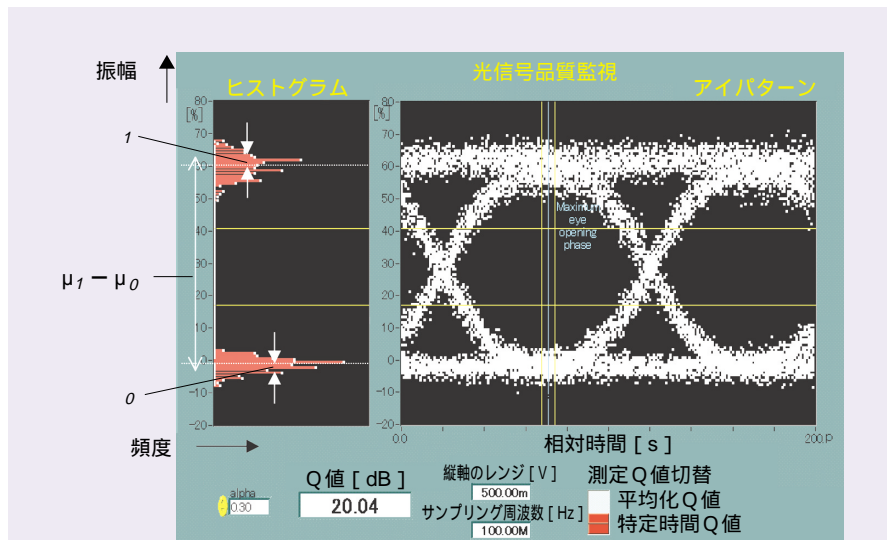


図6 非同期サンプリングにより測定した固定のアイパターンとアイ開口が最大時の振幅ヒストグラム

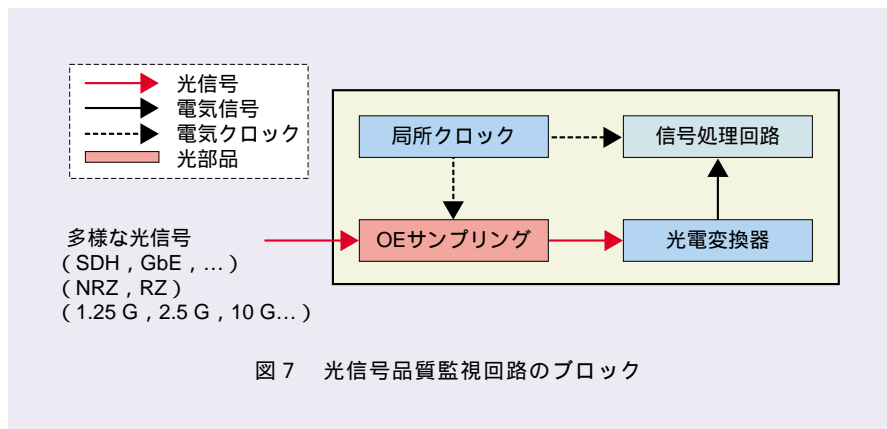


図7 光信号品質監視回路のブロック

は、局所クロック、光 - 電気（OE: Opto-Electrical）サンプリングモジュール、光電変換器、信号処理回路で構成されます。OEサンプリングは、電気パルスにより光信号をサンプリングするゲート動作を利用します。電気パルスの繰り返し周波数は最大約1GHzで、OEサンプリングモジュールとして電界吸収型光変調器（EA変調器）を使用しました。これらは、全光型サンプリングに用いられる非線形光学媒質や短パルス光源などの構成部品よりも小型です。また従来の電気サンプリングに用いられるサンプリング回路やAD変換回路と比べて、信号帯域やサンプリング速度の点でより高いスペックが比較的容易に実現できるメリットがあります。光段でサンプリングするので、光電変換回路以降の帯

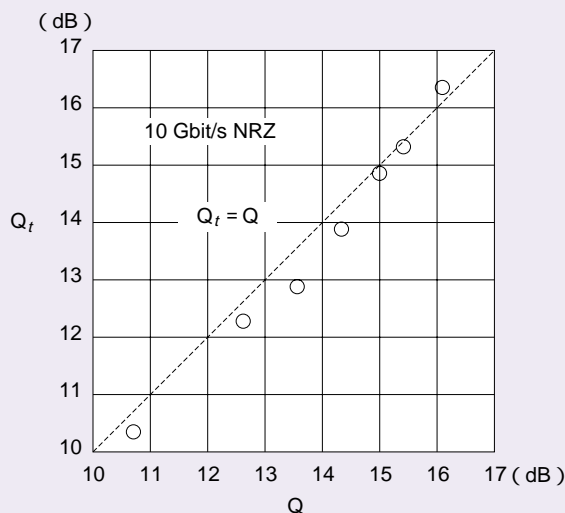
域も信号ビットレートよりも低く済みます。

EA変調器におけるゲート動作の分解能は、8ps程度まで向上でき、その場合40Gbit/s程度の光信号ビットレートまで対応できると考えられます。また波長依存性はEA変調器によるものが支配的であり、約40nmの測定帯域でした。C-バンド全域に1つの回路で対応することが可能です。主な性能諸元は表2のとおりです。

OSNR（Optical Signal to Noise Ratio）を変化させたときに測定で得られるQ値（ $Q_m$ ）と、BERと直接関係式で結びついているQの関係を図8に示します。光信号には、10Gbit/sのNRZ（Non Return to Zero）光信号を用いています。図8から、 $Q_t$ とQの良好な関

表2 光信号品質監視回路の主要性能諸元

パラメータ	性能
サンプリング周波数	100 MHz ~ 1 GHz
時間分解能	8 ps
信号ビットレート	43 Gbit/s
測定波長領域	40 nm ( 1543-1583 nm )
入力パワー	- 5.0 ~ +5.0 dBm
偏波依存損失	< 1.0 dB

図8 測定パラメータ $Q_m (= Q_t)$ とBERから計算で求められる $Q$ の関係

係が確認でき、 $Q_t$ が $Q$ に対して傾き1の関係で変化することが分かります。これはすなわち、 $Q_t$ の測定により、BERの絶対値が直接推定可能となることを示しています。例えば10 Gbit/s光信号について測定により得られた $Q_t$ が16.4 dBであれば、BERは $10^{-10}$ であると推定できます。

## 今後の展開

多様なクライアントを特徴とする将来の光ネットワークに適したトランスパレント光信号品質監視技術について解説しました。バイナリ光信号を、信号ビットレートとは非同期のサンプリングクロックでサンプリングし、得られるサンプリング信号の振幅をヒストグラム化して $Q$ 値を見積もることで、光信号品質を評価できます。また光電気サンプリング技術を用いた光信号品質監視回路

について述べました。さらに高速サンプリングによって、非同期で、かつ、時間的なドリフトのない固定の信号アイパターンを測定することにも成功しました。そのようなアイパターンから得られる $Q$ 値( $Q_t$ )は、BERに直接変換でき、より正確な光信号品質評価が可能となります。今後は波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)信号への対応とさらなる分解能の向上に取り組む予定です。

### 参考文献

- (1) G.Bendelli, C.Cavazzoni, R.Girardi and R. Lano: "Optical performance monitoring techniques," in Proc. 26th European Conference on Optical Communication (ECOC 2000), Vol.4, pp.113-116, 2000.
- (2) R. Giles: "Monitoring the Optical Network," in Proc. Symposium on Optical Fiber Measurement, 2002, pp.19-24, 2002.
- (3) I.Shake and H.Takara: "Averaged Q-factor Method using Amplitude Histogram Evaluation for Transparent Monitoring of Optical Signal-to-Noise Ratio Degradation in

- Optical Transmission System," J.Lightwave Technol., Vol.20, No.8, pp.1367-1373, 2002.
- (4) S.Ohteru and N.Takachio: "Optical signal quality monitor using direct Q-factor measurement," IEEE Photonics Tech. Lett., Vol.11, No.10, pp.1307-1309, 1999.
  - (5) S. Norimatsu and M. Maruoka: "Accurate Q-factor estimation of optically amplified systems in the presence of waveform distortion," J. Lightwave, Tech., Vol.20, No.1, pp.19-29, 2002.
  - (6) I.Shake, H.Takara and S.Kawanishi: "Simple Q factor monitoring for BER estimation using opened eye diagrams captured by high-speed asynchronous electrooptical sampling," IEEE Photonics Tech. Lett., Vol.15, No.4, pp.620-622, 2003.



(左から) 社家 一平/ 高良 秀彦/  
川西 悟基

OADM・OXC・光ルータ等を用いた次世代の光ネットワーク環境を実現するために、必要な技術の研究開発を行っています。Qモニタもそのハードウェア技術の1つです。今後の展開にご期待ください。

### 問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所  
フォニクトランスポートネットワーク研究部  
TEL 046-859-8864  
FAX 046-859-5541  
E-mail shake.ippei@lab.ntt.co.jp