

# 光位相変調アナライザ NX7000

## —変調位相揺らぎと復調時間波形を実時間で同時観測—

NX7000 Optical Phase-Modulation Analyzer  
—Real-time Simultaneous Measurement of Modulated Phase Distribution and Demodulated Waveform—

谷村 和紀<sup>\*1</sup> 前田 実<sup>\*1</sup>  
TANIMURA Kazunori MAEDA Minoru

赤堀 浩司<sup>\*1</sup> 太田 裕之<sup>\*1</sup>  
AKAHORI Hiroshi OHTA Hiroshi

40 Gbps といった高速大容量光伝送システムでは、光の ON/OFF を用いた強度変調方式 (OOK : On-Off Keying) だけでなく、DPSK (Differential Phase-Shift Keying) や DQPSK (Differential Quadrature Phase-Shift Keying) といった光の位相に情報を重畳する位相変調方式 (PSK : Phase-Shift Keying) が導入されている。そのような高速光位相変調信号の位相情報を実時間で評価・解析できる世界初の測定器として、光位相変調アナライザ NX7000 を開発した。この測定器では光位相の測定原理として遅延自己ホモダイン検波の手法を用いており、測定器内に参照基準レーザ光源を必要としないため、信号波長に依らず高精度・高安定な測定を可能としている。また、高時間分解能を有するデータ・サンプリング手法を導入することで、被測定信号の品質評価に必要とされる変調位相揺らぎと復調時間波形の同時観測を実現している。本稿では、NX7000 の概要について述べる。

We have developed a new measurement instrument, NX7000, for evaluating and monitoring the signal quality of phase-modulated optical signals in the next-generation 40-Gbps optical communication networks. Measurement of the differential constellation/phasor diagrams and demodulated signals of 40-Gbps differential phase-shift keying (DPSK) and differential quadrature phase-shift keying (DQPSK) signals using the NX7000 enables quantitative analysis and evaluation of the signals. The instrument will help users to develop and improve their products for 40-Gbps transmission systems. The NX7000 is based on our original technology in which we use 1-bit delayed self-homodyne detection and high time-resolution signal sampling in order to analyze DPSK/DQPSK signals directly. This paper outlines the basis and features of the NX7000.

### 1. はじめに

近年、FTTH (Fiber To The Home) を始めとしたブロードバンド通信網の普及・発展に伴い、また、電話回線網の収容や動画配信サービスの展開といった通信網そのものの利用形態の変化により、大都市間を結ぶいわゆる基幹系ネットワークにおける通信トラフィックは急速に増加している。総務省の発表<sup>(1)</sup>によれば、2007年11月時点での国内主要IX (Internet Exchange) で交換される平均

トラフィック総量は約 800 Gbps と算出され、2004年11月からの3年間で約 2.5 倍となっていることが明らかとなった。

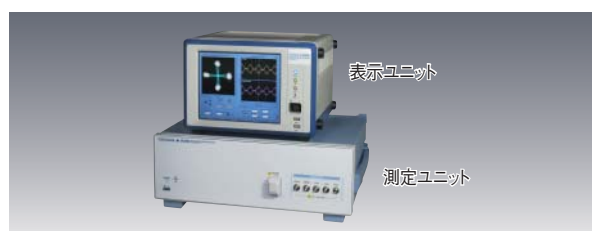


図1 NX7000 の外観

\*1 通信測定器事業部 要素技術開発部アプリケーションGr.

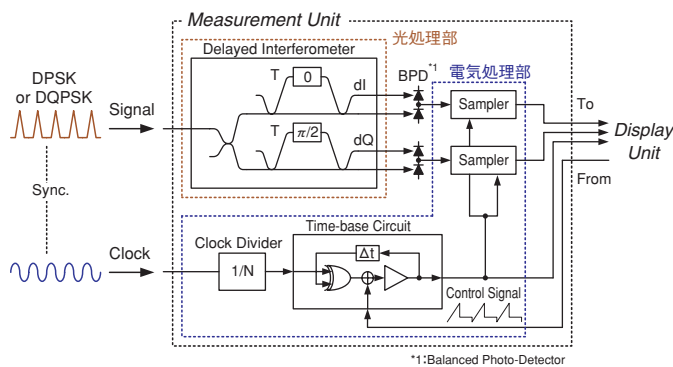


図2 測定ユニットの回路ブロック図

このような背景の下、通信事業者各社はNGN (Next Generation Network)構築の基盤として通信速度の高速化・大容量化を進めており、光伝送システムに対する投資が活発になってきている。波長分割多重方式(WDM: Wavelength Division Multiplexing)を基本とする現在の基幹系光伝送システムでは、光ファイバ1本、1波長当たりの伝送速度は10 Gbpsが主であるが、これを40 Gbpsに増強することでシステム全体の伝送容量を拡大することが検討されている。40 Gbpsの光伝送においては、1ビットのタイムスロットが25 psと非常に短時間であり、光ファイバ中の分散等による僅かな波形歪みによっても情報の読み誤りが起こり得る。このことから、光のON/OFFに(0, 1)のデジタル値を重畳する従来の強度変調方式(OOK: On-Off Keying)では長距離通信が困難であるため、分散耐力や非線形耐力に優れ、高効率長距離伝送を可能とする変調方式として、光波の進み/遅れに情報を載せる位相変調方式(PSK: Phase-Shift Keying)の導入が進められている。

光位相変調方式で用いられる伝送光信号の品質を正しく評価するためには、OSNR(Optical Signal-to-Noise Ratio)や光アイ・パターン解析だけではなく、従来とは異なる視点・指標での評価・解析手法が求められる。特に40 Gbps伝送での利用が有望視されているDPSK(Differential Phase-Shift Keying)やDQPSK(Differential Quadrature Phase-Shift Keying)といった差動位相変調方式においては、信号の復調結果に影響する信号ビット間での相対振幅・位相変化(差動変調量)の解析が重要となる。

当社は、各種研究開発機関が光位相変調方式の導入を検討し始めた当初から、独自の測定原理に基づく光位相変調信号の評価・解析手法を提案し、その優位性を実証してきた<sup>(2)(3)(4)(5)</sup>。今回、基幹系40 Gbps光伝送システムの開発や各種光伝送装置・デバイス開発の試験・評価に用いる測定器の一つとして、高速光信号の振幅・位相情報を実時間で評価・解析できる光位相変調アナライザNX7000を世界に先駆けて開発した。以下に、NX7000の概要を紹介

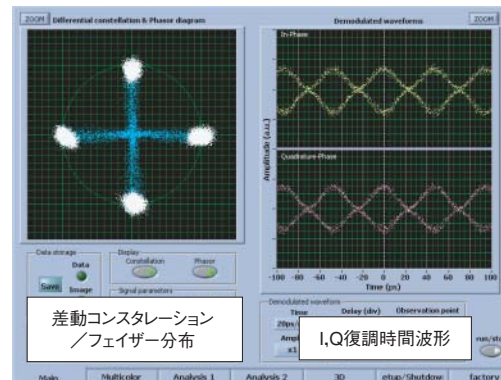


図3 NX7000による測定画面の例

する。

## 2. NX7000のシステム構成と特徴

図1に、NX7000の外観を示す。本測定器は、入力光信号の測定を行う測定ユニット(Measurement Unit)と、取得データの処理、表示、ハードウェア全体の制御を行う表示ユニット(Display Unit)の2つの筐体から成る。

図2に、測定ユニットの回路ブロック図を示す。測定ユニットは、大きく分けて、遅延干渉計(Delayed Interferometer)により被測定信号の位相角を検波する光処理部と、光电変換により得られた電気信号をデジタル・データとしてサンプリングする電気処理部から成る。

製品の特徴として、以下が挙げられる。

- ・参照基準レーザ光源を必要としない遅延自己ホモダイン検波を用いた手法により、40 Gbps DPSK/DQPSK信号を高精度かつ高安定に測定
- ・差動コンスタレーション / フェイザー分布と同相(In-phase) / 直交位相(Quadrature-phase)成分の復調時間波形を実時間同時観測
- ・C-band, L-bandの両WDM波長チャンネルの光信号を測定可能
- ・ヒストグラム解析を始めとする各種解析機能を搭載

図3に、上記の2番目の特徴を示す測定画面の一例を示す。同様の測定手法に基づく製品が市場に存在しないため、本測定器の優劣を直接判断することは困難であるが、その利用形態を考慮した時、想定するユーザーの期待に応える性能・機能を実現しているものと確信している。

## 3. NX7000の主な仕様(暫定仕様)

表1に、今回開発したNX7000の主な仕様、機能を示す。ここに示す仕様はDQPSK信号を対象としたものであり、DPSK信号については異なる。また、数値については試作段階のものであり、製品仕様とは異なる可能性があることをお断りしておく。図4に、解析機能を利用した表示画面の例を示す。

表1 NX7000 の主な仕様と機能

項目	仕様
対応変調フォーマット	差動位相変調信号 (DPSK, DQPSK)
測定信号ビットレート	39.8 Gbps~44.6 Gbps
測定波長範囲	1530 nm~1600 nm
光入力レベル	10 mW以下 (ピークパワー)
測定精度	±10%以下 (強度), ±5°以下 (位相)
残留ノイズ	±3% rms以下 (強度), 3°rms (位相)
偏波依存性	±10%以下 (強度), ±10°以下 (位相)
タイミングジッタ	1 ps rms以下 (入力クロックのジッタは除く)
解析機能	ヒストグラム, 平均値, 標準偏差, Q値解析, 推定BER

#### 4. NX7000 を実現するコア技術

ここでは、測定ユニットで用いている当社独自のコア技術について説明する。

##### 4.1 遅延自己ホモダイン検波による光位相測定

一般に、位相変調信号の位相変化を測定する手法としては、搬送波の周波数に同期した基準クロック源(ローカル・オシレータ)を用意し、同相成分と直交位相成分を取得して位相角を求める手法が用いられる。無線LAN(Local Area Network)や地上デジタル放送といったワイヤレス通信においてその技術が確立されている。しかしながら、光通信において同様の手法を用いるためには、搬送波である光信号の光周波数(およそ190 THz)に同期した基準クロック源(具体的には単一モード発振するレーザ光源)が必要であり、測定精度を得るためには、およそ±1 MHz以内で精度保証されたものが必要である。併せて、高い安定性と、WDMの各波長チャンネルに合わせた光周波数調整が必要であり、製品化されている一般的な波長可変光源の波長精度が±10 pm(光周波数で±1.25 GHz)程度である現状を考慮しても、そのような高性能なレーザ光源をシステムに組み込むことは現実的ではない。

そこで、本測定器では1 bit遅延自己ホモダイン手法を適用し、遅延干渉計により同相成分と直交位相成分を抽出することで、被測定信号の位相角を直交検波する設計とした。入力信号光自身を参照基準光として用いるため、原理的に信号光波長に依らず高精度・高安定な測定が可能である。また、この測定手法では、被測定信号の絶対位相を測定せずに測定対象とするDPSK/DQPSK信号の復調過程と同様の系により測定を行っているため、それら信号評価に必要な信号ビット間の差動変調量を直接求めることができる。

##### 4.2 タイムベース制御による差動コンスタレーション/フェイザー分布と復調時間波形の実時間同時観測

光処理部により得られた同相差動干渉信号成分dIおよび直交位相差動干渉信号成分dQは、それぞれBPD

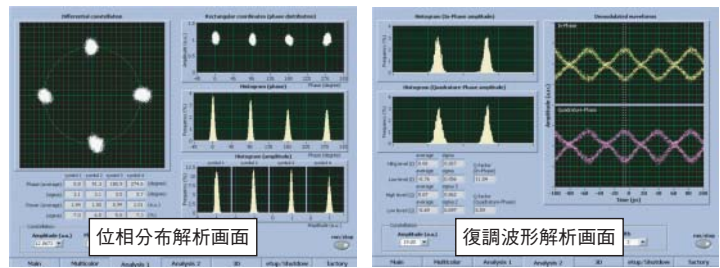


図4 解析機能を利用した表示画面の例

(Balanced Photo-Detector)にて光电変換した後、高時間分解能を有する電気サンプラにて同時にサンプリングし、デジタル・データとして取得する。取得データを(dI, dQ)座標平面上にプロットすることで、被測定信号の差動振幅・位相分布が得られる。また、サンプリング・オシロスコープに代表されるシーケンシャル・サンプリング手法により、サンプリングのタイミングを変えながら(時間掃引しながら)データ取得を行うことで、dI, dQ各々の時間波形(分布の時間遷移)を取得することが可能である。このようにして得られた(dI, dQ, 時間)の3次元データを処理・解析することで、被測定信号の差動フェイザー分布、同相成分および直交位相成分の復調時間波形が得られる。

ここで、対象としているDPSK/DQPSK信号の品質評価・解析においては、信号パルス中心時刻での振幅・位相状態を示す差動コンスタレーション分布(差動位相変調方式における信号シンボルの複素平面での位置分布に相当)の取得が重要である。時間掃引サンプリングにより取得したデータから所望のデータを選別することも可能であるが、この場合、解析に必要な十分なサンプル点を集録するために長時間の測定を要することとなる。そこで、本測定器では時間掃引を停止し、被測定信号に完全同期して差動コンスタレーション分布のみを取得する過程と、時間掃引サンプリングにより差動フェイザー分布・復調時間波形を取得する過程を交互に行う制御処理を導入し、両者をオルタネート表示する手法を採用した。上記機能の実現のため、制御信号に応じてサンプリング・タイミング(サンプリングのクロック位相)を動的に調整するPLL(Phase-Locked Loop)回路を実装したタイムベースを新規に開発した。

図3は、43 Gbps RZ(Return to Zero)-DQPSK信号の測定例である。被測定信号の差動コンスタレーション分布(白色点, 20000 pt), 差動フェイザー分布(青色点, 5000 pt), 同相復調波形(黄色点, 5000 pt), 直交位相復調波形(桃色点, 5000 pt)が秒間10フレーム程度で描画更新されており、測定精度を維持しつつ実時間観測を実現した。

##### 4.3 高い測定精度・確度を実現するためのデータ補正アルゴリズムの導入

本測定器では、光信号の干渉を用いているため、高い測



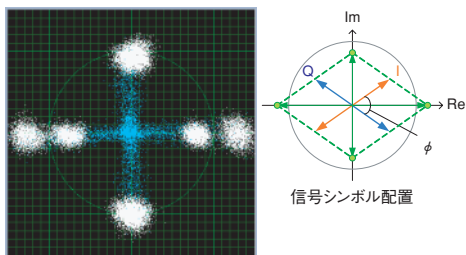


図5 アプリケーション測定事例1  
(信号発生器内の変調器のバイアス電圧がずれた場合)

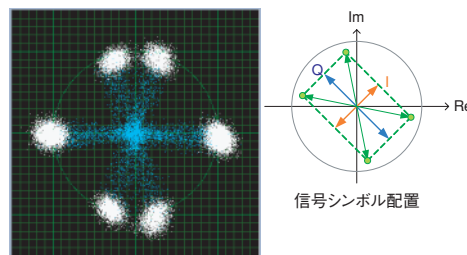


図6 アプリケーション測定事例2  
(信号発生器内の変調器の変調振幅がずれた場合)

定精度・確度を確保するためには、採用する光部品・電気部品にも高い精度が要求される。しかしながら、使用部品の個体ばらつきなどの制約により、ハードウェア的な調整のみでは限界がある。そのため、当社独自のデータ補正アルゴリズムを導入し、高精度に校正された補正テーブルを用いて測定精度確度の向上を図った。

## 5. アプリケーション測定事例

NX7000を用いた測定例として、43 Gbps RZ-DQPSK 信号発生器(送信機)の信号発生条件を変えた場合の観測分布を、図5、図6に示す。図5は、信号発生器内で用いられているMZI(Mach-Zehnder Interferometer)型光変調器のバイアス電圧を調整し、DQPSK信号を生成する同相成分および直交位相成分の直交位相差を変化させた場合である。この時、図に示すように、複素平面におけるDQPSK信号の4つの信号シンボルの絶対振幅・位相は、同相(In-phase)、直交位相(Quadrature-phase)電界ベクトルの合成により、振幅値の異なる「ひし形」の配置となる。遅延自己ホモダイン検波を用いる提案手法では、信号シンボル間の相互干渉の結果として分布が得られるため、その変化を一方向の振幅分布の分離として観測することができる。これは、受信機が受ける変動と同等のものを高感度に観測していることを示している。同様に、図6は、変調器駆動信号の片側変調振幅を変化させた場合の結果である。いずれの場合においても、信号の変化に応じた特徴的な分布が得られている。これらの観測分布を元に、送信機をより最適な信号品質の高い状態に調整することができる。

以上のように、本製品は40 Gbps 光伝送システム、装置・部品の評価・調整用途として、また、通信エラーが生じた際の不具合解析ツールとして利用することが可能である。

## 6. おわりに

40 Gbps DPSK/DQPSKを始めとする高速光位相変調信号を測定対象として新規開発した、測定器NX7000の概要について説明した。上述のように、本測定器には独自のコア技術が多数盛り込まれており、ネットワーク網の物

理層評価を対象としている。当社では、既に同じく40 Gbps 光伝送システムの研究開発・生産検査向け測定器であるトランスポートアナライザNX4000シリーズ<sup>6)</sup>を提供しているが、こちらはSONET/SDH(Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy)規格やOTN(Optical Transport Network)規格への適合判断といった、より上位ネットワーク層での試験・評価を対象としている。

40 Gbps関連市場は、2008年度より本格的に立ち上がると言われている。当社が提供するNGN向け測定ソリューションが、40 Gbps光伝送システム、高速光デバイス開発のスピードアップに貢献し、次世代情報インフラの構築に少しでも役立つことを期待している。

最後に、世界に先駆けて本測定器の開発、実現に至ったのも、偏に関係各位のご助言、ご尽力によるものである。この場を借りて、皆様に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 総務省報道資料，“我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算 2007年11月時点の集計結果の公表”，2008年2月21日発表
- (2) 谷村和紀，太田裕之，“遅延自己ホモダイン検波による光位相変調信号の位相分布測定”，電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集，2006，B-10-50
- (3) K. Tanimura, H. Ohta, “Measurement of Phase-Distribution of Phase-Modulated Optical Signals using Delayed Self-Homodyne Detection,” in Proc. ECOC2006, Cannes, 2006, Mo4.23
- (4) 谷村和紀，太田裕之，“1bit 遅延自己ホモダイン検波によるDPSK/DQPSK信号モニタリング”，電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集，2007，B-10-21
- (5) K. Tanimura, H. Ohta, “Monitoring of DPSK/DQPSK Signals using 1-Bit Delayed Self-Homodyne Detection with Optical Phase Diversity,” in Proc. ECOC2007, Berlin, 2007, P065
- (6) 大利賢治，志田 秀夫，堤成一，高橋 賢司，“40 Gbps トランスポートアナライザNX4000の測定アプリケーション”，横河技報，Vol. 52, No. 3, 2008, p. 85-88