

# 100 Gbps光伝送システムのための デジタルコヒーレント受信技術

## Digital Coherent Receiver Technology for 100-Gbps Optical Transport Systems

### あらまし

デジタルコヒーレント受信技術は、100 Gbps光伝送システムの必須技術として期待されている。富士通研究所および富士通は、その安定性・信頼性の確立に向け、光周波数オフセット補償回路・搬送波位相推定回路といった、デジタルコヒーレント受信の基本を成す回路を試作した。その性能を実験的に評価した結果、理論限界に1 dBと迫る良好な誤り率特性を確認した。

### Abstract

Digital coherent receivers are expected to be the most important building block of 100-Gbps optical transport systems. As a platform for evaluating their real-time operation stability and thus helping to realize product-level reliability, Fujitsu Laboratories and Fujitsu have fabricated a test circuit to implement basic algorithms such as carrier phase recovery and optical frequency offset compensation. The experimental results showed an excellent performance that is only 1 dB away from the theoretical limit.



Jens C. Rasmussen

ネットワークシステム研究所フォトニクス研究部 兼 ネットワークプロダクト事業本部 所属  
現在、100 Gbps光伝送システムの研究開発に従事。



星田剛司（ほしだ たけし）

ネットワークシステム研究所フォトニクス研究部 兼 ネットワークプロダクト事業本部 所属  
現在、100 Gbps光伝送システムの研究開発に従事。



中島久雄（なかしま ひさお）

ネットワークシステム研究所フォトニクス研究部 兼 ネットワークプロダクト事業本部 所属  
現在、100 Gbps光伝送システムの研究開発に従事。

まえがき

幹線系の光伝送ネットワークが扱う通信トラフィック容量は、3年間で4倍という高率で年々増大を続けている。この容量増大は、従来からのトラフィックである音声や低速イーサ信号（GbE, 10GbE）の量的増大にとどまらず、収容すべきクライアント信号の高速化という質的な変化も伴っている（図-1）。ネットワークにとっての主要なトラフィック発生源である大規模なデータセンターや画像配信センターに配置される大容量ルータには、IEEEで標準化が進められている100ギガビットイーサ（100GbE）などの高速インタフェースが搭載される見通しである。今後の伝送装置には、こうした高速従来型のトラフィックと従来型のトラフィックを効率良く収容し、長距離にわたり安価に伝送することが求められている。

このような要求に応える100 Gbps光伝送システム

を実現するに当たり、実用化が期待されているのがデジタルコヒーレント受信方式<sup>(注1)</sup>である（図-2）。現在実用化されている直接受信方式<sup>(注2)</sup>による40 Gbps波長多重伝送システムでは、伝送路で発生する各種の波形歪みをマネージするために、各種の光分散補償技術を用いているが、伝送速度が100 Gbpsとなると、このような光分散補償器によって実現できる補償量や補償精度が限界を迎える。デジタルコヒーレント受信方式では、光分散補償の限界を超えた広範囲・高精度の波形歪み補償が可能となるため、光分散補償器やその損失補償用の光増幅器を削減することが可能となり、システムの小型化・低コスト化が期待される。

このように、100 Gbps光伝送システムを実現する上でキー技術となるデジタルコヒーレント受信について、著者らを含むグループでは、デジタル信号処理アルゴリズムの研究開発と光伝送システム特性に対する影響について詳細検討を行ってきた。本稿

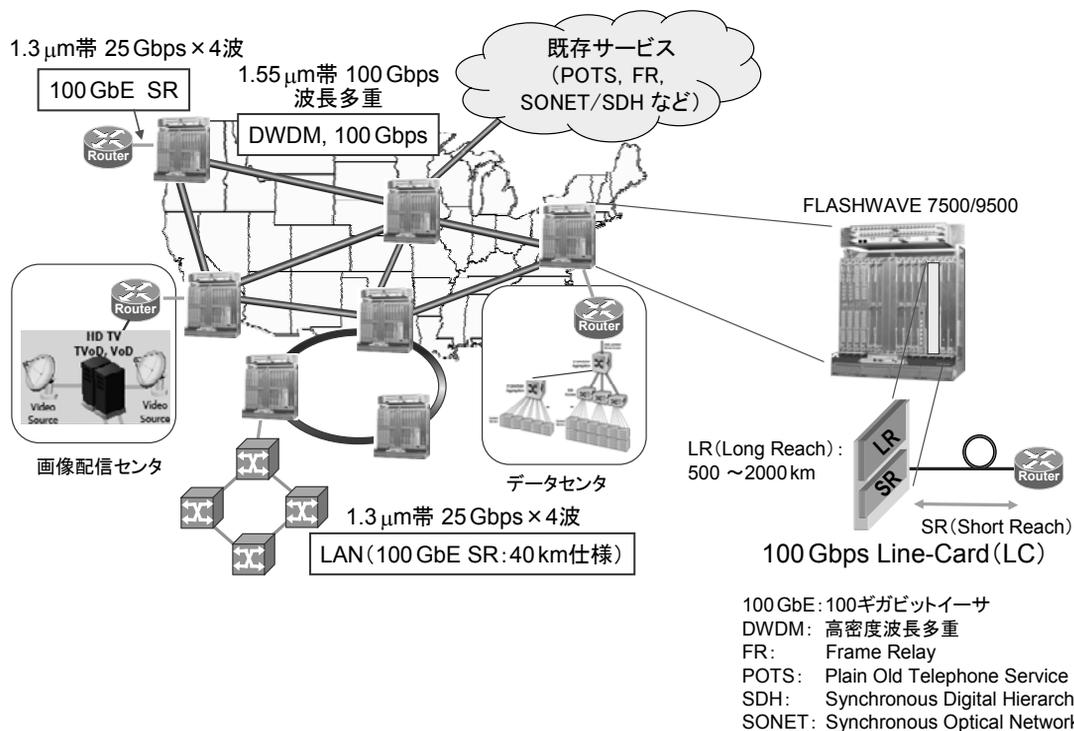


図-1 100 Gbps光伝送の適応領域  
Fig.1-Applications of 100 Gbps optical transport.

(注1) 光の振幅と位相の両方の情報を電流に変換して受信する方式。

(注2) 光の振幅情報のみを電流に変換して受信する方式。構成が簡素なため従来用いられてきた。

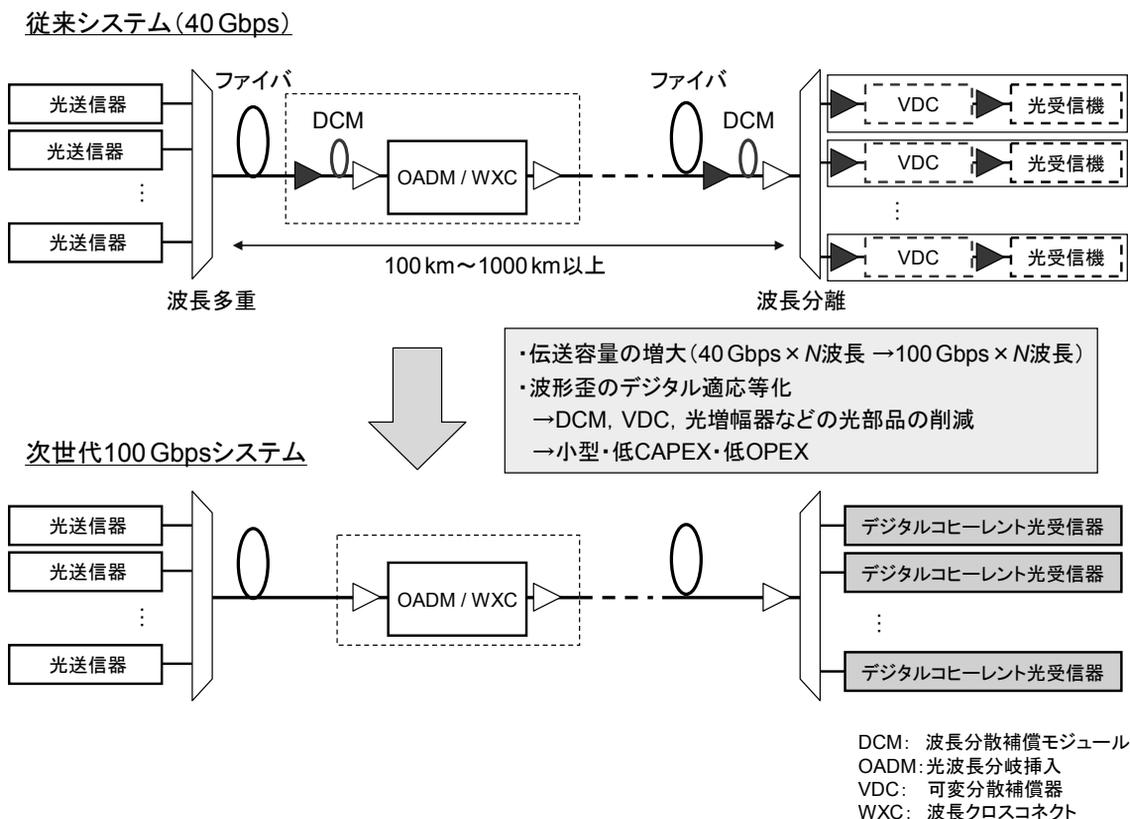


図-2 波長多重伝送システムの構成例とデジタルコヒーレント受信技術によるパラダイムシフト  
 Fig.2-Typical configuration of 100 Gbps wavelength division multiplexed transmission system and its paradigm-shift with digital coherent receivers.

では、まずデジタルコヒーレント受信の歴史的・技術的特徴と課題について説明した後、その動作の最も基本的な機能である光源周波数オフセット補償と搬送波位相推定の各機能の役割について概説する。続いて、これらの機能を実装した試作受信器による、リアルタイム動作確認実験結果について紹介する。

## デジタルコヒーレント受信方式とその歴史

デジタルコヒーレント方式の基本を成すコヒーレント受信方式<sup>(1)</sup>は、従来用いられてきた直接検波方式と比較して高い受信感度の実現が可能であることから、光ファイバ通信システムの再生中継距離拡大を目指して1980年代から1990年代の前半にかけて盛んに研究された。またこの時期から、そのバリエーションであるデジタルコヒーレント受信方式に関する先駆的な検討もなされた<sup>(2)</sup>。しかし、光中継増幅技術の登場や波長多重伝送方式の普及の結果、光ファイバ通信システムにコヒーレント受信を採用する動機付けはいったん失われ、約10年間にわたってこの分野の研究開発は停滞した。その後、デ

ジタルコヒーレント受信方式が再び脚光を浴びるようになった背景としては以下の4点が挙げられる。

- (1) 100 Gbpsという高速伝送システムでは、受信 OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) の不足が長距離伝送上の切実な問題であり、コヒーレント受信による OSNR 耐力の改善が再び魅力的になった。
- (2) デジタルコヒーレント受信によって実現できる強力な波形等化機能が、高速信号の長距離伝送時の波形歪対策として必須と考えられるようになった。
- (3) CMOS LSI 技術の急激な進歩に伴い、デジタル信号処理の能力 (ゲート数、動作周波数) が飛躍的に向上し、100 Gbps 級信号のデジタルコヒーレント受信の実現が現実味を帯びてきた。
- (4) ビットレートが高くなるにつれ、コヒーレント受信実現の最大の障害の一つであった光源位相雑音への対処が相対的に容易になった。

以上の背景のもと、デジタルコヒーレント受信技術に関する実験結果もいくつか報告されているが、

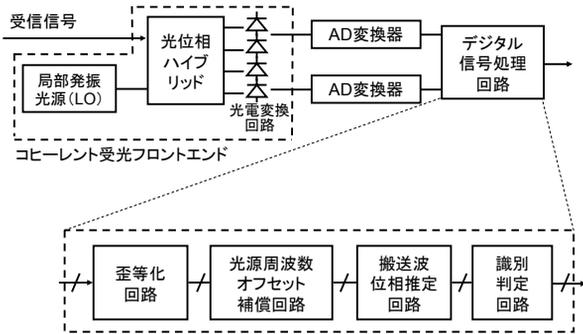


図-3 デジタルコヒーレント受信器の基本的な機能ブロック構成例  
Fig.3-Exemplified basic functional block diagram of digital coherent receiver.

実際にデジタルコヒーレント受信器を試作してリアルタイム動作させた実験報告は比較的少数<sup>(3)-(6)</sup>であり、それ以外の大多数の報告は、リアルタイムオシロスコープによるバースト波形蓄積とソフトウェアによる事後処理を組み合わせた、いわゆる「オフライン実験」によるものにとどまっている。そのため、実システム運用上の安定性にかかわるような課題を掘り下げる検討・報告が不足しているのが現状であり、実用化に向けた課題を残している。

### デジタルコヒーレント受信器の特徴

デジタルコヒーレント受信器の基本的な機能ブロック構成例を図-3に示す。従来型（非デジタル型）のコヒーレント受信器と比較した場合、コヒーレント受光フロントエンド { 局部発振光源 (LO : Local Oscillator), 光位相ハイブリッド<sup>(注3)</sup> 光電変換回路などで構成される } はほぼ同様であるが、その出力をAD変換した上でデジタル信号処理回路によって波形処理を行う点が相違点である。この相違が、以下の (1) ~ (4) の具体的なメリットをもたらす。

- (1) 送信光源と局部発振光源の周波数・位相を受信光に対して同期させるメカニズムをデジタル信号処理として実装することにより、実現難度の高い光PLLが不要となる。
- (2) その結果、市場で一般的に入手可能な波長多重用レーザ光源を、自走LOとして適用可能に

(注3) 局部発振光源と受信光を2種類以上の異なる位相で混合して出力する光学部品。

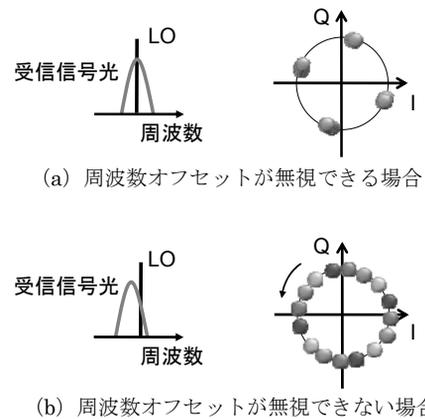


図-4 光源周波数ズレの影響 (QPSKの場合の模式図)  
Fig.4-Impact of laser frequency offset: schematic diagram assuming QPSK system.

なる。

- (3) デジタル信号処理回路によって、アナログ回路では実現困難な、高度な波形歪等化器の実現が可能になる。
- (4) ハードウェアのアーキテクチャの最小限の変更で、多彩な変調方式 { 多値PSK (Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) など } や、波長チャンネル内多重化方式 { 偏波多重, 直交周波数多重 (OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) など } との組合せに柔軟に対応できる。

以下では、リアルタイムコヒーレント受信の実現上最も基本的な機能である上記 (1) について、光源周波数オフセット補償回路と搬送波位相推定回路の二つに絞って解説する。

#### ● 光源周波数オフセット補償

一般的な波長多重用光源を用いた場合、送信器側の光源と受信器側のLO光源の間には、波長確度の範囲内で光周波数のズレ (オフセット) が発生し得る。現在市場で一般的な波長多重用光源の場合、この周波数オフセットは最大数GHz程度となる可能性がある。

光源周波数オフセットが存在する場合に発生する現象を、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 変調<sup>(注4)</sup>方式の場合を例にとった図-4を用いて説明する。光源周波数オフセットが十分小さい場合 { 図-4 (a) }, ある短時間にわたって観測した

(注4) 4値位相変調。2ビットの情報を光の四つの位相状態 (45°, 135°, 225°, 315°) に対応づけて伝送する方式。

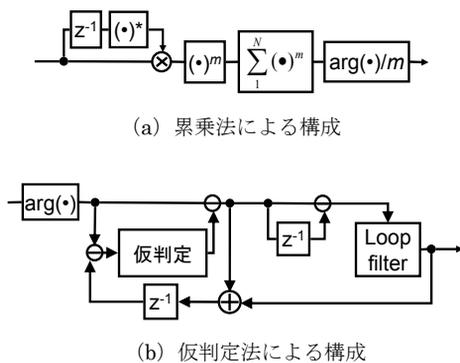


図-5 m値PSK信号用光源周波数オフセット推定回路の機能ブロック構成例

Fig.5-Functional block diagrams for laser frequency offset estimation circuit for mPSK signals.

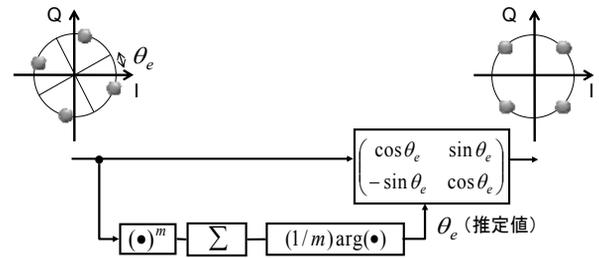


図-6 m値PSK信号用搬送波位相推定回路の機能ブロック構成例

Fig.6-Functional block diagrams for carrier phase recovery circuit for mPSK signals.

信号コンスタレーション<sup>(注5)</sup>には、位相ズレによる静的回転のみが観測される。一方、光源周波数オフセットが大きい場合 {図-4 (b)} には、周波数オフセットによって観測時間内にコンスタレーションが回転してしまうため、そのままではQPSK信号として処理・識別することが困難になる。

この問題に対処するためには、まず光源周波数オフセットを検出する、光源周波数オフセット推定回路が必要になる。光源周波数オフセット推定回路の例として、多値PSK変調方式に適用可能な2種類の構成を図-5に示す。図-5 (a) の構成は、後述するPSK信号用の搬送波位相推定と類似の発想によって、受信した複素電界情報からPSK符号化信号成分と雑音成分を除去し、光源周波数オフセットの成分を抽出するものである<sup>(3)</sup> 一方、図-5 (b) の構成では、信号の仮判定を行いその結果を差し引いてPSK符号化成分を除去する方法により、周波数オフセット推定範囲を更に拡大できるものである<sup>(6)</sup>

ひとたび上記のような回路によって周波数オフセット推定値を得れば、

- (1) LOの発振周波数を微調整するフィードバック型
- (2) デジタル回路内で周波数オフセットに相当するだけコンスタレーションを逆回転させるフィードフォワード型

のいずれかの方法を用いて周波数オフセット補償回路を実現することができる。

(注5) 光の振幅・位相の状態にどのように符号として割り当てているかを複素平面上に表示したもの。

### ● 搬送波位相推定

送信器側の光源と受信器側のLO光源の周波数オフセットが補償された後に残るのは、光源間の位相差である。これを検出して補正することにより、識別判定の準備を行う機能が搬送波位相推定処理である。

搬送波位相推定回路の例として、PSKに適用可能な累乗方式<sup>(7),(8)</sup>を適用した構成の一例を図-6に示す。この回路では、m値PSK信号の複素電界をm乗すると符号情報は複素平面上で一点に重なることを利用して消去する。さらに一定の数の符号間で平均化を行い雑音成分を低減することによって、雑音と比較すると比較的ゆっくり変動する搬送波位相  $\theta_e$  を算出するものである。ひとたび  $\theta_e$  が判明すれば、これを用いてコンスタレーションを回転させることによって搬送波位相の影響を除去し、特定の閾値<sup>いき</sup>を用いて識別判定を行うことが可能となる。

### リアルタイムデジタルコヒーレント受信実験

上述のようなデジタルコヒーレント受信用のアルゴリズム・回路の検証に当たっては、オフライン実験による動作原理確認のみでは不十分であり、リアルタイム受信実験を通じた検証が不可欠であると考えられる。

そこで今回、AD変換速度1 Gサンプル/秒という低速動作ではあるものの、デジタルコヒーレント受信器を試作し、その基本的な特性をリアルタイム実験により評価した。

なお、光源周波数オフセットや搬送波位相ズレの問題は、AD変換速度が低ければ低いほど深刻であ

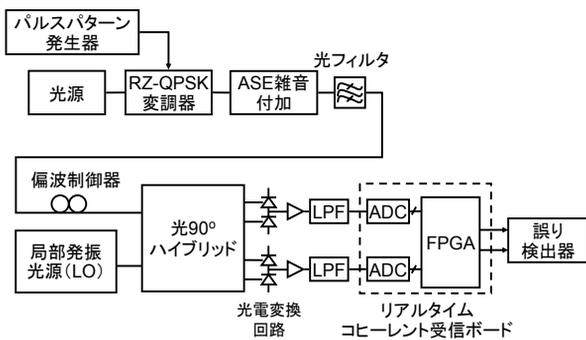


図-7 RZ-QPSKリアルタイムデジタルコヒーレント受信実験系  
Fig.7-Experimental setup for real-time digital coherent reception of RZ-QPSK signal.

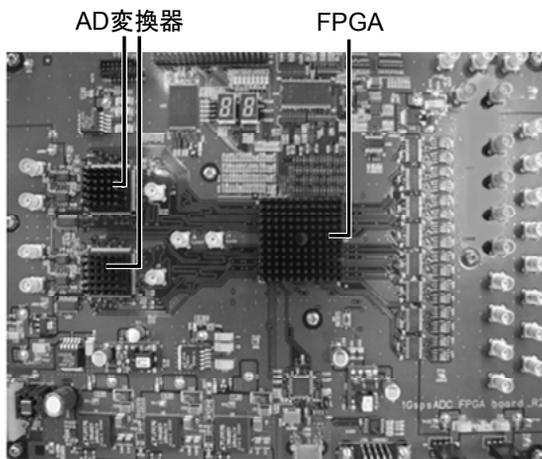
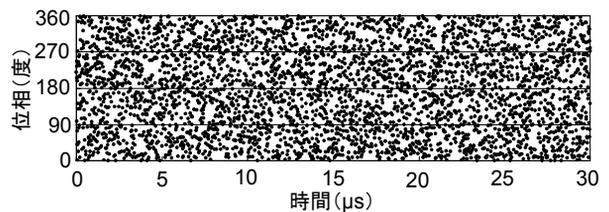


図-8 リアルタイムデジタルコヒーレント受信ボード  
Fig.8-Real-time digital coherent reception circuit board.

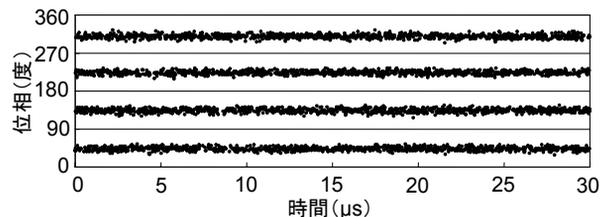
るため、今回の評価結果は高速動作に向けたアルゴリズム検証としては、むしろ厳しい評価となっていることに留意されたい。

実験系を図-7に示す。今回の実験では変調信号として1 Gbps (500 Mシンボル/秒) のRZ-QPSK<sup>(注6)</sup>方式を用いた。送信器・受信器内の光源としては、光源線幅約300 kHzの波長可変光源を用い、発振波長の微調整によって光源周波数オフセットを可変できるようにしている。信号光にASE (Amplified Spontaneous Emission) 雑音を付加してOSNRを調整し、さらに偏波を偏波制御器で制御した上で、コヒーレント受信器に入射した。コヒーレント受信器は光ハイブリッド・局部発振光源 (LO)・光電変換回路・低域通過フィルタ (350 MHz) およびリ

(注6) 各QPSK符号の振幅包絡線波形をRZ (return to zero) パルスとした。



(a) 入力位相波形



(b) 出力位相波形

図-9 デジタル信号処理入出力波形  
(位相情報のみを表示)

Fig.9-Input and output waveforms of the digital signal processing circuit (phase information only).

アルタイムコヒーレント受信ボードで構成され、その出力を誤り検出器で評価した。実験に適用した試作リアルタイムコヒーレント受信ボードを図-8に示す。1 Gサンプル/秒のAD変換器2チャンネルの出力がFPGAに入力されデジタル信号処理される。デジタル信号処理回路としては、最も基本的な機能ブロックである光源周波数オフセット補償回路・搬送波位相推定回路・識別判定回路を実装した。ここで光源周波数オフセット補償回路としては、図-5 (a)、同図 (b) に示す2種類のオフセット推定回路のいずれかによるフィードフォワード型補償方式を実装し、両者を比較評価した。搬送は位相推定回路としては前述の累乘法 (QPSKのため $m=4$ ) を採用した。累乗方式による搬送波位相推定には $360^\circ/4=90^\circ$ の位相不確定性が存在し、雑音などの影響によってバースト誤りが発生する恐れがあるため、これを回避するために、識別回路には差動デコード機能も実装した。

AD変換器出力および識別直前の位相情報を取り出して可視化した結果例を図-9に示す。図-9 (a) と同図 (b) を比較することにより、実装した周波数オフセット補償と搬送波位相推定回路により、光源の位相雑音や周波数ズレの影響が除去され、QPSK符号の四値位相情報が検出できていることが見て取れる。

つぎに、光源周波数オフセットをほぼ0 MHzに

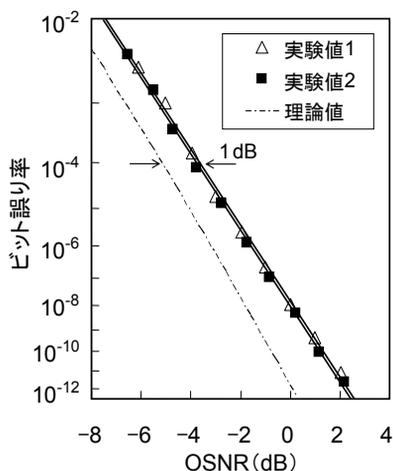


図-10 ビット誤り率性能測定結果  
Fig.10-Measurement result of bit error ratio performance.

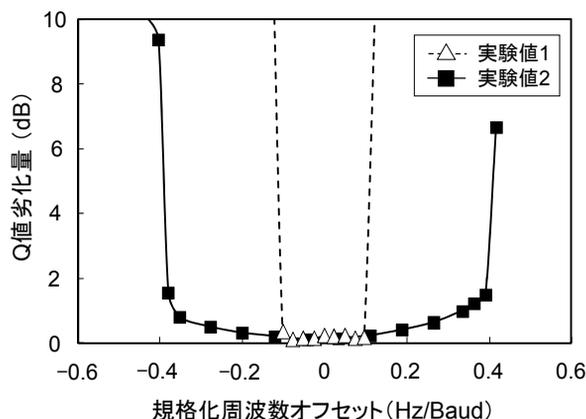


図-11 光源周波数オフセット耐力測定結果 (OSNR=-2 dB)  
Fig.11-Measurement result of laser frequency offset tolerance (OSNR=-2 dB).

設定した上でビット誤り率をOSNRの関数として測定した (図-10)。ここで、OSNRは、光帯域0.1 nmあたりのASE雑音光パワーと、全信号光パワーの比として定義しているため、場合により負の数となっている。図-10中の実験値1, 2は、それぞれ光源周波数オフセット推定回路として図-5 (a), 同図 (b) に示す構成を採用した場合の結果である。まず、いずれの方式を用いた場合も、誤り率 $10^{-12}$ に至るまでフロアの少ない良好な誤り率特性が得られていることが見て取れる (オフライン実験では、現実的な時間内に測定可能なビット数が限られるため、このような低BERの特性確認自体が困難である)。続いて、得られた測定結果をQPSK方式の理論限界と比較すると、OSNRにしてわずか1 dB程度の乖離にとどまっていることが見て取れる。この結果は、著者らの知る限り、これまで報告されたリアルタイムデジタルコヒーレント受信器の実測特性としては最も理論限界に近く、良好な結果であると考えられる。

続いて、OSNRが-2 dBの状況で測定した光源周波数オフセット依存性の測定結果を図-11に示す。ここで縦軸はBERから算出されたQ値の劣化量である。著者らのグループが提案した図-5 (b) の周波数オフセット推定方式を採用した場合 (実験値2)、従来技術 (実験値1) と比較すると2倍以上広い補償範囲を確保できることが確認された。今回確認された周波数オフセット補償範囲を、40~100 GbpsのQPSK信号の受信器の状況に換算して考えると、

一般的な波長多重用半導体レーザ光源 (周波数精度 $\pm 2.5$  GHz) の波長精度・安定度が十分適用可能であることを示しており、今回の基本的アルゴリズムが実用化に向けて十分有望であることが示唆される結果となっている。

## む す び

100 Gbps世代の光伝送システムの必須技術として期待されるデジタルコヒーレント受信技術の実力を見極め、実システム運用に耐える安定性を実現するために、光周波数オフセット補償回路・搬送波位相推定回路といった、デジタルコヒーレント受信の最も基本となる回路を試作し、リアルタイム実験により評価した結果、理論限界まで1 dBに迫る良好な誤り率特性を確認した。

なお今回の試作・実験では、信号ビットレートが低い状態で十分検証可能な基本機能に絞って試作・評価を行ったが、今後、波形歪等化や偏波制御といったデジタルコヒーレント受信ならではの高度な機能についても同様の検証を進める予定である。

本成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) からの委託研究「ユニバーサルリンク技術の研究開発」によるものである。

## 参考文献

- (1) 大越孝敬ほか：コヒーレント光通信工学. オーム社, 1986.

- (2) F. Derr : Coherent Optical QPSK Intradyne System : Concept and Digital Receiver Realization. *Journal of Lightwave Technology*, Vol.10, No.9, p.1290-1296 (1992).
- (3) A. Leven et al. : Frequency Estimation in Intradyne Reception. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.19, No.6, p.366-368 (2007).
- (4) T. Pfau et al. : Polarization-Multiplexed 2.8 Gbit/s Synchronous QPSK Transmission with Real-Time Digital Polarization Tracking . 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2007), 8.3.3, September 2007.
- (5) H. Sun et al. : Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system. *Optics Express*, Vol.16, No.2, p.873-879 (2008).
- (6) H. Nakashima et al. : Novel Wide-range Frequency Offset Compensator Evaluated with Real-time Digital Coherent Receiver . 34th European Conference and Exhibition on Optical Communication ( ECOC2008 ), Mo.3 . D.4 , September 2008.
- (7) D. -S. Ly-Gagnon et al. : Coherent Detection of Optical Quadrature Phase-Shift Keying Signals with Carrier Phase Estimation . *Journal of Lightwave Technology*, Vol.24 , No.1 , p.12-21 (2006).
- (8) A. J. Viterbi et al. : Nonlinear Estimation of PSK-Modulated Carrier Phase with Application to Burst Digital Transmission. *IEEE Transaction on Information Theory* , Vol.29 , No.4 , p.543-551 (1983).