

ネットワークの進化を支える光部品

FTTH (Fiber To The Home)、映像サービス、モバイル端末の急速な普及に伴い、ネットワークの大容量化および高度化が必要となっています。本特集では、フォトニックネットワークを支える光デバイス技術の進展について、特に近年注目を集めているデジタルコヒーレント通信方式に必要な光デバイス技術について紹介します。

むらた こういち さいだ たかし
村田 浩一 / 才田 隆志

NTTフォトニクス研究所

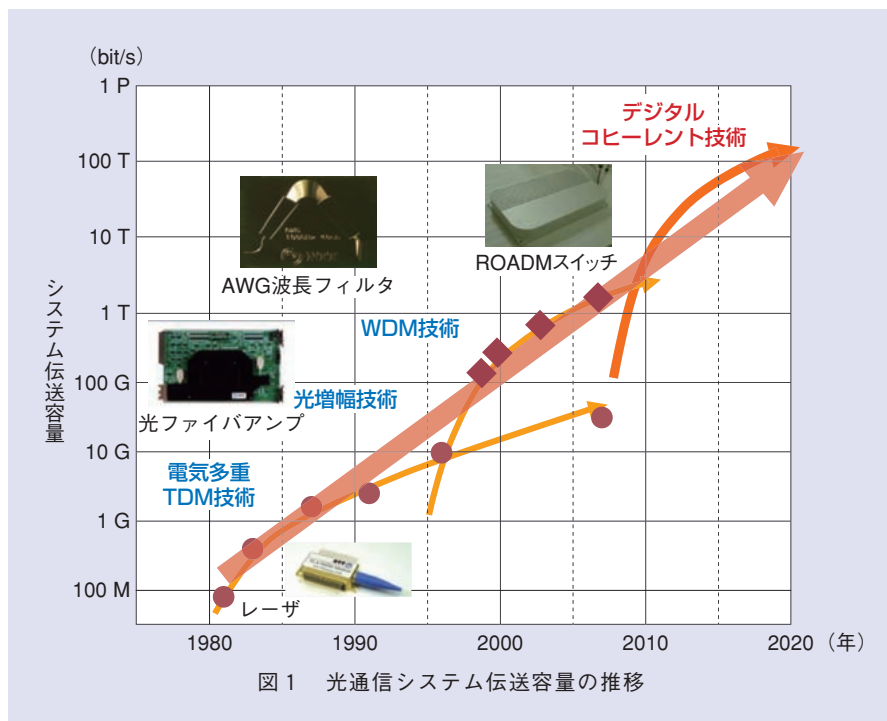
ネットワークの進化を支える光デバイス

インターネットとブロードバンドサービスの普及により通信トラフィックは年々大きく増大しています。このような情報通信を支えるため、光通信技術や光デバイス技術を用いてネットワークの高速大容量化が進展してきました。図1にコアネットワークにおける光通信システム伝送容量の推移を示しま

す。1980年代から1990年代初頭にかけては、光のオンとオフで信号を伝送し、時間軸上に信号を多重する時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing) 技術が用いられました。伝送容量の増大には高速でオンオフ動作を行う光デバイスや電子デバイス技術が必要とされ、伝送速度は10 Gbit/sに至りました。また、伝送距離の延伸には光増幅技術が大きく貢献しました。1990年代に入ると光

の合波・分波を行う光フィルタが開発され、光の波長軸上で信号を多重する波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術による大容量化が大きく進展しました。光デバイスとしては、石英系プレーナ光波回路 (PLC: Planar Lightwave Circuit) がその実現に重要な役割を果たしています。PLC技術は平面基板上に形成される光導波路で、基板にシリコン、導波路に石英ガラスが材料として用いられるため安定性、堅牢性、信頼性に優れています。

さらに、導波路設計によりアレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed-Waveguide Grating) による波長合分波機能や、熱光学効果を用いたスイッチ機能および可変減衰機能の実現可能であることからさまざまな機能回路を小型に実現することが可能です⁽¹⁾。その後、これらの光技術はメトロエリアネットワークにも展開され、光の特徴を活かした低遅延、柔軟性、拡張性に優れたOADM (Optical Add/Drop Multiplexer)^{*1}を用いたフォトニックネットワークが実用化



*1 OADM: 光分岐挿入装置の略。光波長多重通信で使用され特定の波長を有する光信号を選択的に分離・混合を行います。

されるに至りました。ここでは、AWGと光スイッチのPLC集積化技術に加えて光信号モニタ用フォトダイオードや複数のPLCを、ファイバを介さずに直接結合させる実装技術などにより小型で高機能なROADM (Reconfigurable OADM) *² スイッチが用いられています。また、WDMシステムやROADMシステムに適用する光源技術として、波長が異なる複数のDFB-LD (Distributed Feed-Back Laser Diode) *³ アレイと半導体光アンプを1チップ集積した波長可変光源素子やそのモジュール技術

が開発されました⁽²⁾。

現在、コアネットワークにおいては40 Gbit/sの高速信号を40波多重して伝送するシステムが導入され、システム伝送容量は1.6 Tbit/sに達しています。しかしながら、近年のFTTH、映像サービス、モバイル端末の急速な普及により、今後の通信トラフィックの急増に対応するためには、1波長当り100 Gbit/sまで高速化し、10 Tbit/s級の大容量通信を実現する新技術が期待されています。この期待にこたえる通信方式としてデジタル信号処理を用いたコヒーレント方式が近年

注目されています⁽³⁾。

光変調方式と光送受信構成

大容量光伝送システムに用いられている光変調方式と光変調器および光受信器の構成を図2に示します。強度変調 (OOK: On Off Keying) ・直接検波方式では光の強弱に応じて「1」

*2 ROADM：波長多重方式とパス管理の技術を組み合わせ、超高速・大容量の伝送ネットワークをうまく運用するための技術。

*3 DFB-LD：光の増幅部である半導体の活性層の近くに波状の回折格子を配置し、レーザ発振光に強い波長選択性を持たせることにより単一モードで発振できるようにしたレーザ。

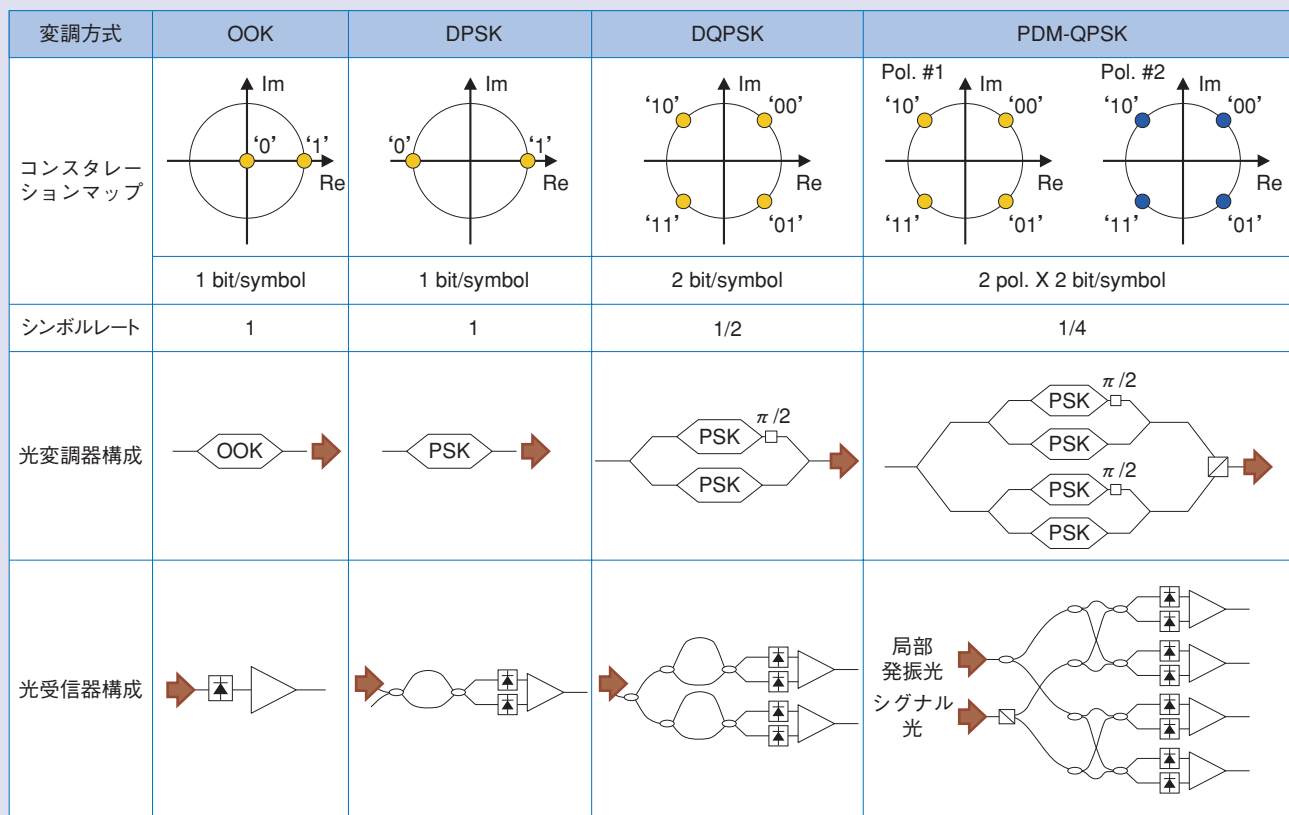


図2 変調方式と光送受信構成

と「0」を割り当てます。この変調方式では光送受信器が簡単な構成で実現できるというメリットがあり、10 Gbit/sまでのシステムで広く用いられました。一方、大容量かつ長距離伝送を行うためには、光雑音耐性を維持しつつ光の周波数利用効率を上げることが重要な課題となります。このような方法として、光の波としての位相情報を利用するDPSK (Differential Phase Shift Keying)^{*4}やDQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)^{*5}といった方式が提案されています。前述した40 Gbit/sの波長多重システムでは位相変調・差動検波方式であるDQPSKが採用されました。この変調方式では2 bitの情報を1シンボルに割り当てることから、OOKに比較して周波数利用効率を上げることができ、光ファイバの分散による伝送距離制限を緩和することができます。また、1波長当りの帯域を削減できることから、より多くの波長を多重することが可能となります。

次世代の100 Gbit/sシステムでは、受信側において局発光と信号光をミキシングして信号光の強度と位相情報を検出するコヒーレント検波方式を用い、変調方式としては2 bitの情報を4つの位相状態に対応付けた4値位相変調方式に加え、2つの偏波を多重化するPDM-QPSK (Polarization Division Multiplexed-QPSK) が検討されています。この変調方式では、信号シンボルレートを伝送レートの4分の1にすることができ、周波数効率を上げつつアナログ電気部品やデジタ

ル信号処理部での動作速度要求条件を大きく緩和できるという利点があることから、100 Gbit/s伝送システムを実現するうえで有力な変調方式と考えられています。

以上のように、強度変調から位相変調への移行、さらには多値数の増大や偏波多重が加わることによって、図2に示すように光送受信器の構成は複雑になります。高機能かつ高集積な光送受信器を小型に実現するための光デバイス技術やモジュール実装技術が重要な課題であることが分かります。

デジタルコヒーレント技術と光送受信器構成

デジタルコヒーレント方式は光の位相と強度の両方に情報を載せて伝送するコヒーレント光通信方式にデジタル信号処理を組み合わせたものです。デジタルコヒーレント方式ではさまざまな変調方式を適用することができるといった特徴があります。100 Gbit/s伝送を行ううえで有力な候補の1つであるPDM-QPSK変調方式を用いた光送受信器構成を図3、4に示します。ここでは、約20%の伝送レート上昇をもたらす誤り訂正技術を用いた場合の例を示しており、信号伝送レートは128 Gbit/sとなります。

図3に示すように、送信器はデジタル信号処理回路、送信光源、光変調器、光変調器を駆動するドライバ回路で構成されます。光変調器は光偏波に対応した2つのQPSK変調器と各々の変調光を合成する偏波合成器で構成されます。

デジタルコヒーレント技術と従来の強度変調方式、位相変調方式とのもっとも大きな違いは、図4に示すように出力されたアナログ電気信号をアナログ-デジタル変換器(ADC: Analog-to-Digital Converter)によりデジタル化し、デジタル信号処理回路で波形処理を行う点にあります。デジタル信号処理を用いることにより、従来困難であった①受信光信号と局発光の安定した位相同期および偏波分離、②デジタルフィルタによる高度な波形歪補償や大きな波長分散補償、③ハードウェアの最小限の変更により多彩な変調方式への適用、が可能となるという3つの大きな利点があります。

デジタルコヒーレント用光送信デバイス

従来の強度変調方式では、変調器を構成する干渉系での光の位相を0°から180°に変えることで光強度信号の「0」と「1」を実現していました。これに対してPDM-QPSKの位相変調では、強度変調方式の2倍となる360°の位相変化が必要となります。このため、変調駆動電圧も従来の2倍の電圧が必要となります。さらに、位相変調された2つの光信号を偏波多重して出力する必要があることから、光変調器の構成が複雑になります。したがって、

*4 DPSK：差動位相偏移変調の略。位相のずれた複数の波の組み合わせで情報を表現するデジタル変調方式PSKの実装方式の1つ。基準信号がなくても位相の識別ができるよう、1つ前に送られてきた波の位相を基準に次の波の位相を検出します。

*5 DQPSK：差動4値位相偏移変調の略。4種類の光の位相に2 bitのデータを割り当てる多値変調方式。

実用性の高い小型の光送信器を実現するためには、低駆動電圧でかつ複数の変調器と偏波合成器を集積した光変

調器の実現が求められます。これまでに、周波数の時間揺らぎが小さく低損失性に優れるLiNbO₃を用いて40

Gbit/s DQPSK光変調器が実現されています。図3に示すように、NTTフォトリソクス研究所では光カプラや偏

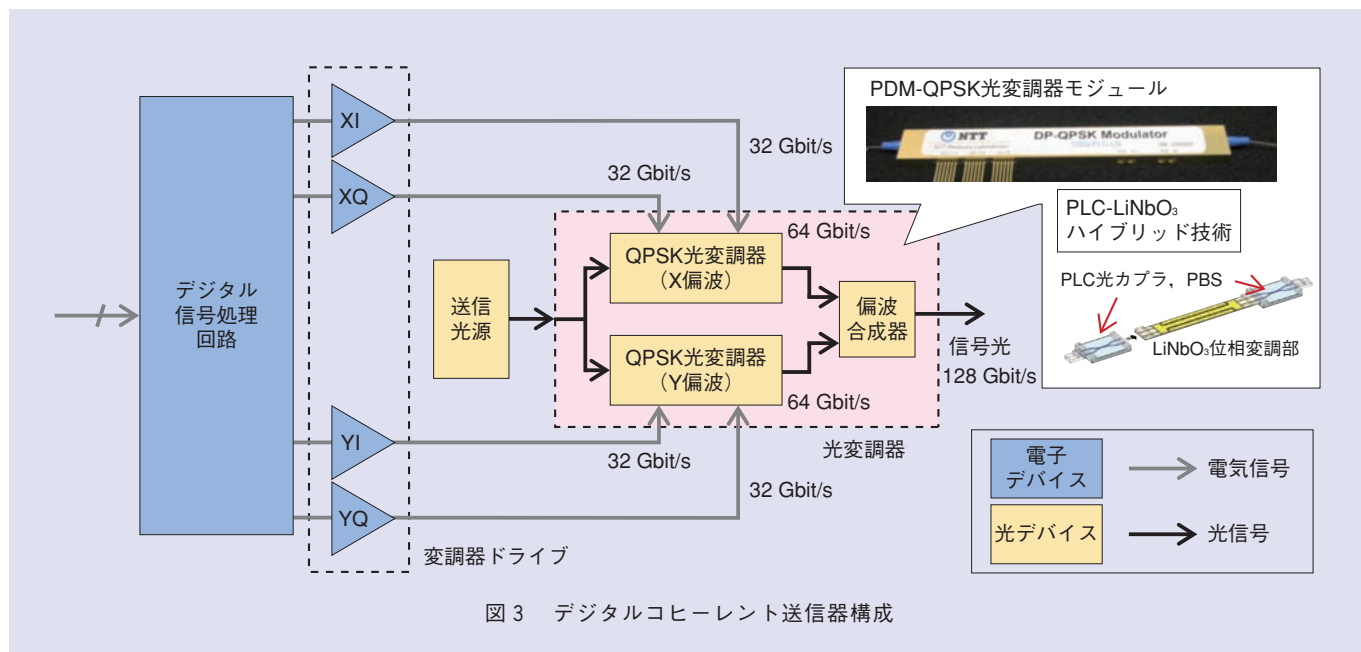


図3 デジタルコヒーレント送信器構成

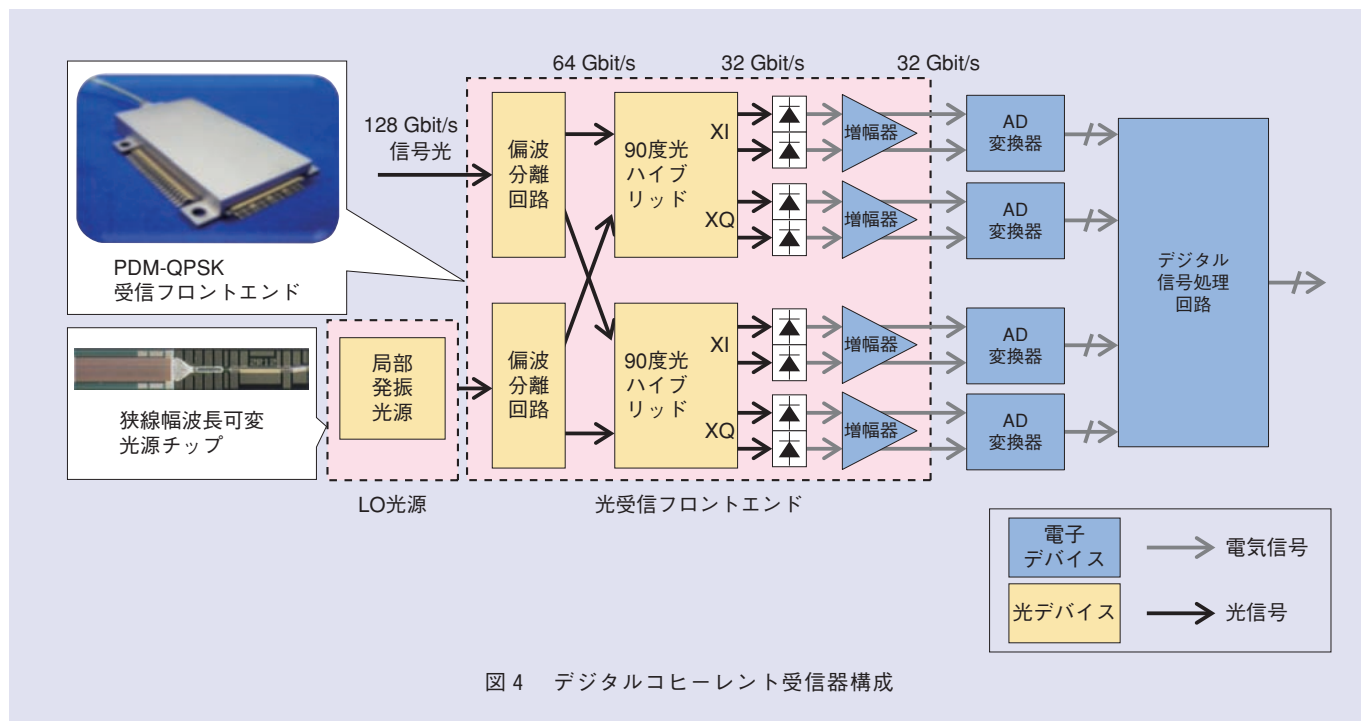


図4 デジタルコヒーレント受信器構成

波多重回路を集積したPLCと光変調を行うLiNbO₃とのハイブリッド実装技術により小型かつ高機能な光変調器の実現を目指しています⁽⁴⁾。

デジタルコヒーレント用光受信デバイス

図4に示すように、受信器に用いられる光デバイスには光受信フロントエンドと局部発振（LO: Local Oscillator）光源があります。ここで、光受信フロントエンドは、光偏波分離回路、90度光ハイブリッド、およびフォトダイオードと増幅器による光電変換器で構成されます。

光受信フロントエンドを実現するためには、光信号処理回路技術、光電変換・電気増幅技術ならびに、これらの光、電気部品を小型・低コストにモジュール化するための実装技術が必要となります。光信号処理では、後段のデジタル信号処理での安定な位相同期を確立するために、低位相誤差特性が求められます。光信号処理回路は、ファイバ部材、空間光学系を用いて実現する方法がありますが、受信モジュールの小型化には光偏波分離と90度ハイブリッドを集積化するアプローチが有効です⁽⁴⁾。一方、受信フロントエンドの光電気変換では、32

Gbit/sの信号レートに対応した広帯域特性と広い光入力ダイナミックレンジ特性を確保することに加え、後段のADCやデジタル信号処理への負荷を低減するために、チャネル間の振幅および位相特性バラツキのない理想的な線形増幅を行う必要があります。このことから、増幅器には高利得・広帯域、低歪み、低スキュー特性に加え、光入力変動した場合でも出力振幅を一定に保つための自動利得可変機能や振幅制御機能が要求されます。これらの要求条件を満たすためには高周波動作、高集積化、高耐圧特性が確保できる電子デバイス技術が有効であり、SiGe BiCMOS技術^{*6}やInP HBT技術^{*7}を用いた検討が進められています。

LO光源については、コヒーレント受信では信号光と局発光の周波数差を用いて検波を行うことから、低位相ノイズすなわち狭いレーザ線幅と高い出力パワーが要求されます。また、波長制御機構がモジュールレベルで集積化されたITLA（Integrable Tunable Laser Assembly）技術や、さらなる小型化技術が今後重要になると考えられます。

以上に述べた100 Gbit/sデジタルコヒーレント用光デバイスについてはOIF（Optical Internetworking Forum）にて標準化が進んでいます⁽⁵⁾。今後は、これら変調器、光受信フロントエンド、LO光源のさらなる性能向上を図るとともに、集積化技術を駆使してネットワークの進化に貢献できる付加価値の高い光デバイス技術の研究開発を進めていきます。

参考文献

- (1) 特集：“光ネットワークを支えるPLCデバイス技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.17, No.5, pp.6-31, 2005.
- (2) 特集：“フォトニックネットワーク用デバイスの最新技術動向,” NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.11, pp.42-69, 2007.
- (3) 中島・松岡・宮本：“100ギガビット長距離伝送技術,” 日経コミュニケーション, pp.82-83, 2009.10.
- (4) S. Mino, K. Murata, T. Saida, and I. Ogawa: “Coherent Optical Component Technologies for WDM Transmission Systems,” 7960-07, SPIE Photonics West, San Francisco, USA, Jan. 2011.
- (5) <http://www.oiforum.com/public/impagreements.html>



（左から）村田 浩一／ 才田 隆志

大容量光通信システムの実現に向けて光部品の効率的かつ迅速な開発が求められています。集積化技術を駆使した光デバイスの小型化・低コスト化を進めるとともに、通信ネットワークを支える革新的なデバイス技術の創出に向けて研究を加速していきます。

◆問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
第一推進プロジェクト
TEL 046-240-2871
FAX 046-240-2872
E-mail murata.koichi@lab.ntt.co.jp

*6 SiGe BiCMOS技術：Siに少量のGeを添加したバイポーラトランジスタとMOSトランジスタを同一基板上に作製する技術。高周波特性に優れたSiGeバイポーラトランジスタと集積性に優れたCMOSの両方の利点を持ちます。

*7 InP HBT技術：電子移動度の高い半導体材料であるインジウムリンを用いたヘテロ接合型のバイポーラトランジスタ技術。高周波特性に優れたという特徴があります。