

# 超高速・大容量光伝送を実現する高速高精度 光変調技術

川 西 哲 也

## High-Speed and Precise Lightwave Modulation Techniques for Ultra High-Speed and Huge Capacity Optical Transmission

Tetsuya KAWANISHI

We reviewed recent research activities in high-speed and precise optical modulation for ultra high-speed and huge capacity optical transmission. In conventional optical fiber transmission systems, on-off-keying (OOK), which describes two digital symbols, 0 and 1, by whether optical power is zero or not, where high-speed operation of optical devices was a top priority. However, recently developed high-speed and precise lightwave modulation techniques provide advanced modulation format in high-speed region and play a very important role in huge capacity transmission over 20 Tbps.

**Key words:** optical modulation, quadrature amplitude modulation, phase shift keying

無線通信分野では限られた周波数資源の有効利用を目指して、電磁波の振幅・位相・周波数のすべてを活用し、さまざまな変調方式が実用となっている。無線通信・放送や ADSL モデムなどでは、振幅変調 (ASK)、位相変調 (PSK)、周波数変調 (FSK) を基本として、振幅位相の組み合わせで多値化を実現する直交振幅変調 (QAM) や、これらを高度に組み合わせたさまざまな変調方式が利用されている。多重化技術としては、周波数分割多重 (FDM) や時分割多重 (TDM)、符号分割多重 (CDM) が用いられており、さらに、地上波デジタル放送、無線 LAN などでは、直交周波数分割多重 (OFDM) により周波数利用効率向上と伝送特性の向上の両立が達成されている。また、変調方式を伝送路の状況により変化させ、安定性と通信速度の最適化を実現する適応変調も実用となっている。これに対して、光通信システムでは依然として、光のエネルギーの有無で 0/1 のデジタル信号を伝送するというシンプルなオンオフキーイング (OOK) が中心で、高度な変調方式の利用は進んでいないというのが現状であるが、近年の急速なデータトラフィック需要拡大に対応するべく、高度

な光変調方式に注目が集まっている。研究室レベルではさまざまな変調方式が実現しつつあり、特に 2005 年以降、40 Gbaud を超える高速多値変調技術の研究開発が進展し<sup>1)</sup>、搬送波の実軸成分と虚軸成分の両方を活用したベクトル変調による高速伝送が可能となってきている。2000 年前後の伝送容量競争のあと、しばらくはファイバー 1 本あたりの伝送容量記録は更新されていなかったが、2006 年から 2007 年にかけて、多値変調技術による記録更新が相次ぎ、ベクトル変調のうち最もシンプルな差動四値位相変調 (DQPSK) によりファイバー 1 本あたり 20 Tbps を超える大容量伝送が達成されている<sup>2,3)</sup>。さらに、16 値直交振幅変調 (16 QAM) による高速伝送も実験室レベルでは実現しつつある<sup>4)</sup>。これまで、光通信システムを支える各デバイスに求められた性能は高速性が第一であったが、これに加えて高い精度で光の波動としての 3 つの要素：振幅・位相・周波数の制御能力が重要となっている。

高度な変調方式により、周波数利用効率の高い伝送が可能となる。現在、光ファイバー通信で実用となっている帯域は C, L バンド (1530~1565 nm) に限られており、従

来のOOKなどの二値変調方式では波長多重(WDM)を利用した大容量伝送で総容量が10 Tbps程度であった。一方、多値変調を利用すると1回の変調で複数ビットが伝送され、限られた帯域で伝送容量の向上が可能である。また、同じ伝送速度で比較すると、多値化することにより占有帯域幅が低減され、ファイバー伝送で生じる波長分散、偏波モード分散などの影響を抑えることができるというメリットもある。

複雑な変調方式による大容量・高密度伝送を実現するためには、変調、復調の両方で新規技術の開発が必要となる。復調に関してはデジタル信号処理を駆使したデジタルコヒーレント技術が注目を集めており、さまざまな信号の復調に対応し、また、ファイバー伝送に伴う、非線形歪み、波長分散などのデジタル的等価技術に関する研究が多数報告されている<sup>9)</sup>。本稿では、もう一方のキーテクノロジーである光変調技術、光変調デバイスの最近の研究動向を紹介する<sup>9)</sup>。各種変調方式を概観し、その中でニオブ酸リチウムのもつ電気光学効果を利用した光変調デバイスを取り上げる。デバイスサイズが大きい、所要電圧が高いなどの問題点はあるものの、最も高速に、最も正確に光を制御できるデバイスで、高速伝送において広く用いられている。上述の通り、高速性のみならず、光を高精度に操作する能力の重要性が高まっており、本稿では変調器特性の精密評価方法についても論じたい。

## 1. 各種光変調技術

光を変調する方法は、大きく2つに分類できる。1つは光源から出力される光そのものを変化させるもので、直接変調とよばれる。もう1つは、光源からの無変調光を変調器で変化させるもので、外部変調とよばれる。高速通信には狭線幅で安定した光源が望ましく、レーザーの利用が一般的である。レーザー直接変調は半導体レーザーの注入電流を直接変化させ強度変調(IM)を実現するというもので、簡単な構成が特徴であるが、レーザーの応答速度に限界がある。また、強度変化時に位相・周波数が同時に変化することによる信号品質の劣化(チャープ効果)への対策も大きな課題であり、短距離用途が中心であったが、最近では、レーザー直接変調による光周波数変調(FM)と、フィルターによるFM-IM変換の組み合わせによる低チャープ高速変調を用いたチャープ制御技術が報告されている<sup>7)</sup>。外部変調は、高速の電気的変化に追従する材料定数の変化を利用して、光振幅、位相などを制御するものである。半導体材料における電界印加による光吸収率変化、いわゆる電界吸収効果(EA効果)を用いたEA変調器と、

電界印加による屈折率変化、いわゆる電気光学効果(EO効果)を用いたEO変調器が実用となっている。EA変調器は小型で高速変調が可能であるのが特徴で、半導体レーザーと集積したデバイスが実用化されているが、EA変調器においてもチャープの抑圧が大きな課題である<sup>8)</sup>。また、基本的には、強度変調器として利用されるが小型という特徴を生かして、高度な変調方式の実現を目指した研究報告もある<sup>9)</sup>。一方、EO効果によるEO変調器は高速性と高い信号品質(低チャープ性)の両立が可能であることが特徴で、長距離高速通信を中心に広く利用されている。直接変調やEA変調器ではチャープの影響で光強度を変化させる際に位相が変化し、また、波形の符号制御も容易でないため、振幅だけを任意に制御することは困難であるが、EO変調器では理想に近い振幅変調が実現できる。このことがより複雑な変調方式への応用を可能としており、振幅・位相・周波数の光波のもつ3つの要素すべての高精度・高速変調が達成されている<sup>6)</sup>。EO効果を示す材料としてはニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>:LN)、タンタル酸リチウム(LiTaO<sub>3</sub>:LT)などの強誘電体、ガリウムヒ素(GaAs)、インジウムリン(InP)などの化合物半導体、ほかにEOポリマー材料などがあげられる。EO効果自体は光位相を制御するものであるが、干渉計などの光回路によりさまざまな変調方式への対応が可能である。広く実用となっているのはLNによるもので、40 Gbps対応の高速変調器が普及しつつある。また、後述する通り、高度な変調方式への適用が容易であるという特徴があり、すでに、差動四値位相変調(DQPSK)が実現しており、100 Gbps DQPSK対応(変調速度50 Gbaud)のLN-EO変調器が実現されている<sup>1)</sup>。InP-EO変調器は集積化に適しており、複数のレーザーと変調器をシングルチップ化し、チップあたりの伝送能力を向上するという取り組みがなされている<sup>10)</sup>。InP変調器はデバイスサイズの点ではLN変調器に比べ有利であるが、制御精度の点ではEO効果に強度変化が寄生するなどの課題があり、デバイス単体としての性能では依然としてLN変調器に優位性があると考えられており、最先端の大容量伝送に関する研究ではもっぱらLN変調器が使われている<sup>2,3)</sup>。以下では、LNによる高速・高精度・多機能変調デバイスについて説明するが、原理的には他の材料によるEO変調デバイスにおいても同様の構成は可能である。EO効果による光位相変化を振幅変化に変換するために、マッハ・ツェンダー(MZ)干渉計が一般に用いられる。図1に示すようなMZ干渉計の2つのアームに高速光位相変調器をもうけたものがMZ変調器で、各位相変調器は光導波路とそれに沿った電極から

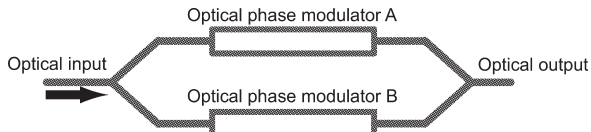


図1 マッハ・ツェンダー変調器の構造.

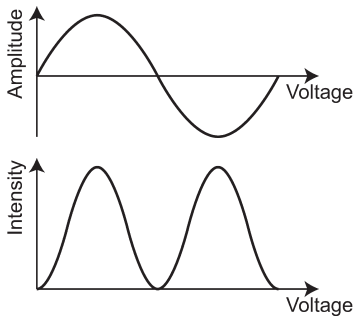


図2 電気入力に対する光振幅・強度変化.

なる。光と電気信号の速度を一致させることで、相互作用長を確保しながら高速応答を得ることを可能とする進行波構造が用いられるのが一般的である。40 Gbps 程度の高速度信号に対応した高速変調器が実現されている。MZ 変調器は単体で広く利用されているのみならず、複数集積することでベクトル変調、多値変調を可能とする<sup>4,6)</sup>。以下で、MZ 変調器の基本原理と制御精度の評価方法について概説する。

## 2. マッハ・ツェンダー (MZ) 変調器の基本原理と特性評価

MZ 変調器において両アーム間の光位相差がゼロの場合で出力では光信号が干渉で強めあい、“on”状態が実現し、振幅最大の出力が得られる。一方、光位相差が $180^\circ$ のとき両アームの合波部分で放射高次モード光へと変換され、“off”状態となり、理想的には出力ゼロである。アーム間の位相関係は光位相変調器に印加する電圧で制御可能であるので、電圧変化を光強度変化へと変換できることになる。図2はMZ変調器の印加電圧に対する応答を示す。強度をオンオフできるのみならず、振幅を連続的に制御することも可能である。複数のMZ変調器を集積することで、より高度な変調方式への対応も可能である。1つの電気入力からMZ変調器の両アームにある光位相変調器を同時駆動できる構造（誘起される位相の符号は逆）が一般的である。アーム間の光位相差が $180^\circ$ となる電圧を半波長電圧とよび、これが上記の“on”と“off”を切り替えるために必要となる電圧（図2の振幅変化の周期の半分、強度変化の1周期）に相当する。実際の変調器では“off”状

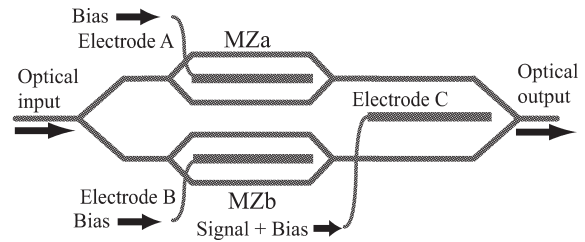


図3 2並列MZ変調器 (DPMZM: dual parallel MZ modulator).

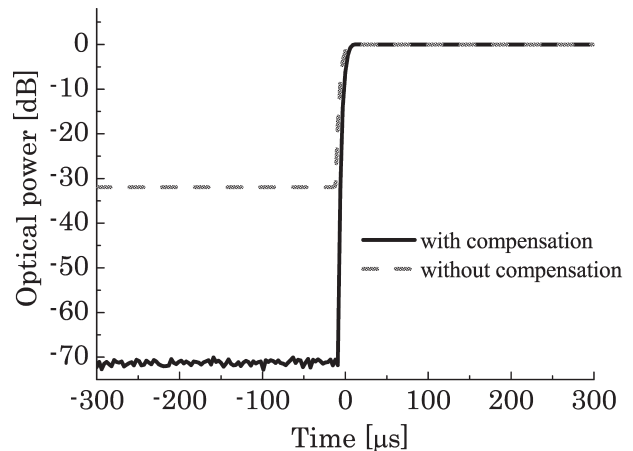


図4 低周波オン/オフスイッチング特性 (実線: バランス補正あり, 破線: バランス補正なし).

態のときに出力ゼロとならず、高次モード光の導波基本モード光へのクロストークやアーム間の強度アンバランスにより残留成分が存在する。変調器のオンオフ消光比は、この残留成分と“on”状態の強度の比で定義される。

図3に示す2並列MZ変調器 (DPMZM: dual parallel MZ modulator) で、製造誤差などによるMZ干渉計のアーム間での光強度差を2つのサブMZ干渉計 (MZa, MZb) で補償が可能で、消光比向上が実現できる。この変調器は、当初、光FSK変調信号を発生するために開発されたもので、3つの電極をもつ<sup>11)</sup>。光FSK変調器として市販されている変調デバイスを用いて消光比向上の効果を測定した例を図4に示す。強度アンバランスを補正した場合と、補正がない場合の消光比は、それぞれ71.4 dB, 31.9 dBであった<sup>12)</sup>。偏光状態をより精密に制御することで、75 dBを超える消光比も報告されている<sup>13)</sup>。

高速信号に対しての応答はさらに、2つの位相変調器で誘起される光位相変化量の差、位相変化の時間波形にタイミング誤差などの理想的なMZ変調器からのずれを考慮に入れる必要がある。解析を簡単にするために、MZ構造を用いた光変調器をRF信号（正弦波）駆動した場合の出力光信号について議論する。各アームでの光位相変化量を

$A_1 \sin(\omega_m t + \phi_1) + \phi_{B1}$ ,  $A_2 \sin(\omega_m t + \phi_2) + \phi_{B2}$  とすると、変調器出力光は

$$E = K' \frac{E_1 e^{i\omega_0 t}}{2} \left[ e^{i\{A_1 \sin(\omega_m t + \phi_1) + \phi_{B1}\}} \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) + e^{i\{A_2 \sin(\omega_m t + \phi_2) + \phi_{B2}\}} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \right] \quad (1)$$

$$= K' \frac{E_1 e^{i\omega_0 t}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\omega_m t} \left[ J_n(A_1) e^{in\phi_1 + i\phi_{B1}} \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) + J_n(A_2) e^{in\phi_2 + i\phi_{B2}} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \right] \quad (2)$$

で表すことができる。ここで、 $J_n$  は  $n$  次第一種ベッセル関数であり、式 (2) の第  $n$  項が  $n$  次サイドバンドに相当する。 $K'$  は変調器内部での光損失を表す係数である ( $|K'| \leq 1$ )。変調器への入力光は  $E_1 e^{i\omega_0 t}$  とした。 $A_1$  と  $A_2$  が、各アームでの RF 信号による光位相変化の振幅 (誘導位相量) を表す。位相変調器のバランスがとれている場合には  $A_1 = -A_2$  となり、後述するチャープパラメータがゼロとなるが、現実の変調器は有限の値をもつ。また、 $\eta$  は光回路のアンバランスを表しており、各アーム間のロスの差や、分岐部分の非対称などの影響が含まれる。上述の通り、 $\eta$  は DPMZM のサブ MZ 干渉計をトリマーとして用いることで調整可能である。アーム間光位相差  $\phi_{B1} - \phi_{B2}$  は変調電極に印加するバイアス電圧により、高精度に制御可能である。この光位相差  $\phi_B \equiv -\phi_{B1} + \phi_{B2}$  を、ここではバイアス位相差とよぶ。アーム間の RF 信号位相差  $\phi \equiv -\phi_1 + \phi_2$  がある場合には、一般に、出力光の上側波帯 (USB) と下側波帯 (LSB) の間に強度差が生じる。一般に LN 光変調器でキャリアーに対して顕著な非対称なスペクトルが観測されることはまれで、ここではこの影響を無視し  $\phi = \phi_1 = \phi_2 = 0$  と仮定できる場合が多い。この RF 信号の位相差は 2 つの同期しているべき信号のタイミングずれとみなすことができるので、ここではスキューとよぶ。変調器に印加した RF 信号電圧が  $V_{0p}$  (zero-to-peak),  $V_{pp}$  (peak-to-peak) であるとすると、半波長電圧は

$$V_\pi = \frac{\pi V_{pp}}{2|A_1 - A_2|} = \frac{\pi V_{0p}}{|A_1 - A_2|} \quad (3)$$

となる。また、MZ 変調器をアーム間光位相差  $\pi/2$  で小信号動作させたときの位相変調成分と振幅変調成分の比で定義されるチャープパラメータが

$$\alpha_0 = \frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2} \quad (4)$$

で表される<sup>14)</sup>。各サイドバンドの強度を光スペクトラムアナライザーで測定し、式 (2) より、非線形連立方程式が得られ、これを解くことで、誘導位相量  $A_1$ ,  $A_2$ , 光回路

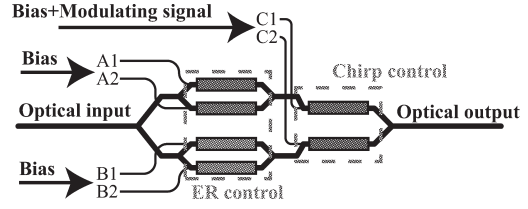


図5 バランス補正機能付き2並列 MZ 変調器。

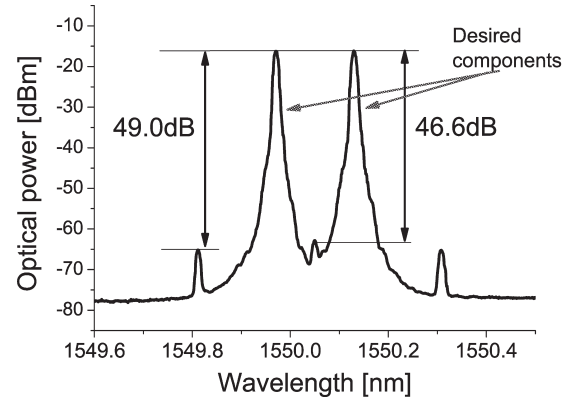


図6 高精度にバランスされた MZ 変調器による DSB-SC 変調スペクトル。

のアンバランス  $\eta$ , スキュー  $\phi$  などが得られる。変調電極に直流電圧が印加できない変調デバイスなどの場合、バイアス位相差  $\phi_B$  を求める必要があるが、これもあわせて算出可能である。これら 6 つの未知数を同時に求めるためには 6 つ以上の非線形連立方程式が必要で、一般に解くのは容易でないが、実際の変調器のもつ各パラメータの特徴などに即した測定法が提案されている<sup>14,15)</sup>。

### 3. 超高精度光変調

図5に示すような各アームに強度補正用のトリマーをもちアーム間の光強度アンバランス  $\eta$ , 変調強度アンバランス  $\alpha_0$  の補正を可能とする変調器において消光比向上, チャープパラメータの極小化が達成できる<sup>16)</sup>。また、この変調器では  $\eta$ ,  $\alpha_0$ , さらにスキュー  $\phi$  の個別制御が可能である。 $\eta$ ,  $\alpha_0$  はともにバランスした理想的な変調器では抑圧されるべき不要なスペクトル成分発生と関連があるが、 $\eta$  による効果と  $\alpha_0$  による効果が打ち消し合い、不要成分を抑圧することが可能である。図5に示すバランス調整が可能な DPMZM で  $\alpha_0$ ,  $\eta$  をほぼゼロに近づけ、不要成分の小さい両側波帯搬送波抑圧 (DSB-SC) 変調を実現した例を取り上げる<sup>16)</sup>。変調周波数 10.5 GHz で、周波数間隔 21 GHz の two-tone (DSB-SC) 信号を発生させた。図6に示すように、高消光比 ( $\eta$  がほぼゼロ), 低チャープ ( $\alpha_0$  がほぼゼロ) により不要成分がほぼ抑圧 (抑圧比

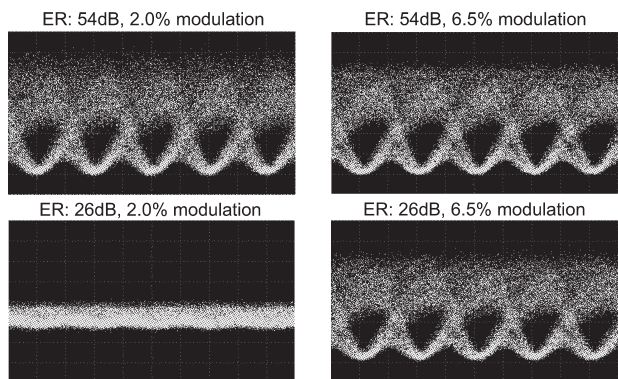


図7 デュオバイナリー変調信号波形と消光比 (ER) の関係。変調深さが小さいとき (2.0%) にはアイ開口が ER に大きく依存。

46.8 dB) されていることがわかる。0 次成分の強度から消光比 66 dB と見積もられる。2 次成分と 1 次成分の強度比から  $|a_0| < 0.01$  と算出される。

電波望遠鏡の基準信号などの高い信号純度と広い周波数可変範囲が要求される分野では、上記のような高精度光変調を活用したマイクロ波帯からミリ波帯に及ぶ超広帯域フォトニックローカル信号源が提案されている<sup>17)</sup>。また、256 QAM といった高度な変調方式や微弱信号によるデュオバイナリー変調での消光比向上の必要性が指摘されている<sup>18,19)</sup>。図7は、デュオバイナリー変調信号波形と消光比の関係を示したものである<sup>19)</sup>。消光比は変調器の光制御性能を表す指標として重要であり、高精度光変調の意義を示す好例である。

#### 4. ベクトル変調技術

多値光変調は3つ以上の光波状態をシンボルとすることで、1回の変調で複数ビットの伝送を可能にする。多数のシンボルを設定するためには、複素平面上的任意の光波状態を得られるベクトル変調が用いられることが多い。強度と位相を独立に制御する方法や、光波を複素表示した場合の実数成分と虚数成分を独立に制御する方法などで実現できる (図8)。本稿では、直交振幅変調に適した後者の方法を紹介する。レーザーからの無変調光を分岐し、90°位相差をつけ、それぞれを振幅変調し、ベクトル的に合波する。図8(下)の X, Y への入力信号で光出力の実軸成分、虚軸成分のそれぞれを独立に制御することが可能となる。最もシンプルなケースは、X, Y を二値信号とするもので、四値直交振幅変調 4 QAM (四値位相変調: QPSK と等価) が得られる。X, Y を多値信号とするとより複雑な変調が実現する。例えば、X, Y が 16 値の場合、256 QAM が得られる。上述の通り、MZ 変調器は精密な振幅変調器として利用できる。DPMZM で図8(下)に示すベクトル変調が実現する (図9)。QPSK 信号発生はこれらの変調器にそれぞれ二値信号を印加することで達成されるが、二値信号に対してはすでに 50 Gbaud を超える高速電気アンプが実用化されており、100 Gbps 以上の超高速 QPSK 信号発生が報告されている<sup>20)</sup>。さらなる多値化実現には、高速多値電気信号を MZ 変調器に印加することが不可欠である。LN 変調器駆動には一般に 5 V 程度が必要であるが、大振幅かつ高速多値信号の発生は容易ではない。

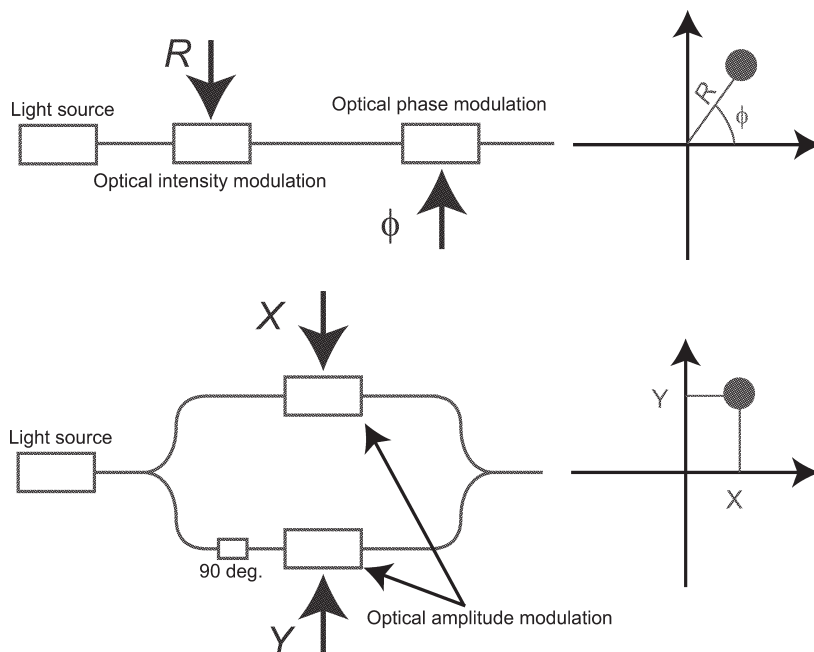


図8 ベクトル変調。

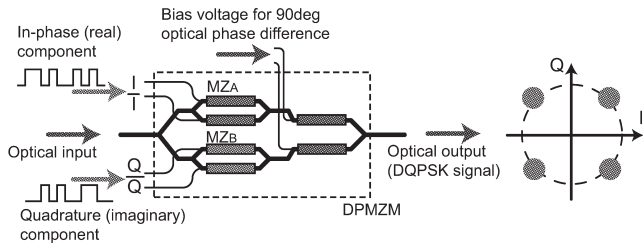


図9 DPMZMによるDQPSK信号発生.

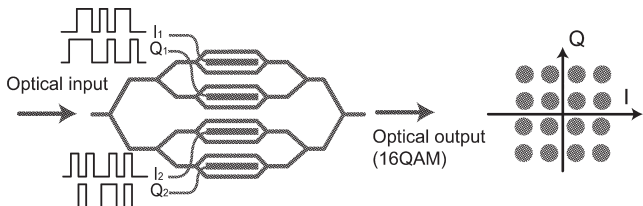


図10 QPMZMによる16QAM信号発生.

変調器内部で多値信号を合成する実例として、図10に4並列MZ変調器(QPMZM: quad parallel MZ modulator)による16QAM信号発生の原理を示す。QPMZMは2つのDPMZMから構成されており、それぞれでバイナリー信号からQPSK信号を発生させる。図11に動作原理を示す。2つのQPSK信号に振幅差をもたせて、光回路でベクトル的に合成させることで16QAM信号が得られる。変調器内部で実軸成分、虚軸成分のDA変換が光回路で実現しており、これに関する速度制限要因は実際上ほぼ無視できるといえる。これまでに、12.5 Gbaud (50 Gbps)伝送が実現しているが、変調器に入力されるのは4つのバイナリー信号であり<sup>4)</sup>、変調デバイス、駆動回路の性能から50 Gbaud程度までの高速化が期待される。受信器などの研究開発が必要であるが、偏波多重を併用するとすれば、送信側としてはトータルで400 Gbps程度の伝送速度への対応が可能となる。

今後、さらなる伝送能力の向上を実現するためには、高度な変調方式への対応と、デバイスの高速化を両立していく必要がある。DPMZM/QPMZMを構成する振幅変調器の高速化について精力的に研究が進められており、87 Gbaudでの高速変調特性評価についての報告がある<sup>21)</sup>。

## 文 献

- 1) T. Kawanishi, T. Sakamoto, M. Izutsu, K. Higuma, T. Fujita, S. Mori, S. Oikawa and J. Ichikawa: "40 Gbit/s versatile LiNbO<sub>3</sub> lightwave modulator," *ECOC 2005*, Th2.2.6 (Glasgow, 2005).
- 2) H. Masuda, A. Sano, T. Kobayashi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, Y. Hibino, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta

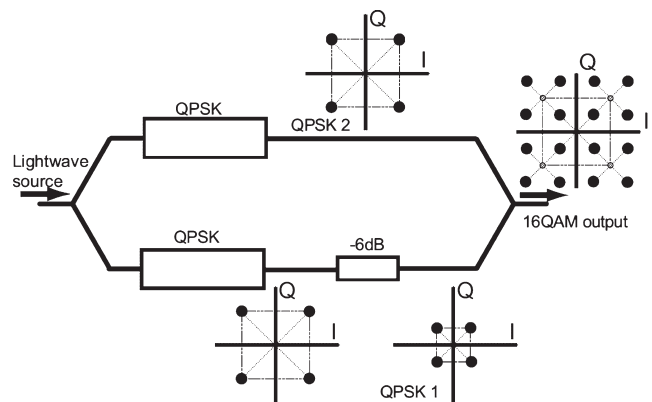


図11 光回路内の16QAM合成の原理.

and H. Fukuyama: "20.4-Tb/s (204×111 Gb/s) transmission over 240 km using bandwidth-maximized hybrid Raman/EDFAs," *OFC 2007*, PDP20 (Anaheim, 2007).

- 3) A. H. Gnauck, G. Chalet, P. Tran, P. Winzer, C. R. Doerr, J. C. Centanni, E. C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto and K. Higuma: "25.6-Tb/s C+L-band transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signals," *OFC 2007*, PDP19 (Anaheim, 2007).
- 4) T. Sakamoto, A. Chiba and T. Kawanishi: "50-Gb/s 16 QAM by a quad-parallel Mach-Zehnder modulator," *ECOC 2007*, PDP2.8 (Berlin, 2007).
- 5) K. Kikuchi: "Coherent transmission systems," *ECOC 2008*, Th.2.A.1 (Brussels, 2008).
- 6) T. Kawanishi, S. Sakamoto and M. Izutsu: "High-speed control of lightwave amplitude, phase, and frequency by use of electrooptic effect," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 79-91.
- 7) Y. Matsui, D. Mahgerefteh, X. Zheng, C. Liao, Z. F. Fan, K. McCallion and P. Tayebati: "Chirp-managed directly modulated laser (CML)," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **18** (2006) 385-387.
- 8) Y. Miyazaki, H. Tada, T. Aoyagi, T. Nishimura and Y. Matsui: "Extremely small-chirp electroabsorption-modulator integrated distributed feedback laser diode with a shallow quantum-well absorption layer," *IEEE J. Quantum Electron.*, **38** (2002) 1075-1080.
- 9) C. R. Doerr, P. J. Winzer, L. Zhang, L. Buhl and N. J. Sauer: "Monolithic InP 16-QAM modulator," *OFC 2008*, PDP20 (San Diego, 2008).
- 10) S. Corzine, P. Evans, M. Kato, G. He, M. Fisher, M. Raburn, A. Dentai, I. Lyubomirsky, R. Nagarajan, M. Missey, V. Lal, A. Chen, J. Thomson, W. Williams, P. Chavarkar, S. Nguyen, D. Lambert, T. Butrie, M. Reffle, R. Schneider, M. Ziari, C. Joyner, S. Grubb, F. Kish and D. Welch: "10-Channel×40 Gb/s per channel DQPSK monolithically integrated InP-based transmitter PIC," *OFC 2008*, PDP18 (San Diego, 2008).
- 11) T. Kawanishi, T. Sakamoto, S. Shinada, M. Izutsu, K. Higuma, T. Fujita and J. Ichikawa: "LiNbO<sub>3</sub> high-speed optical FSK modulator," *Electron. Lett.*, **40** (2004) 691-692.
- 12) T. Kawanishi, T. Sakamoto, M. Tsuchiya, M. Izutsu, S. Mori and K. Higuma: "70 dB extinction-ratio LiNbO<sub>3</sub> optical intensity modulator for two-tone lightwave generation," *OFC 2006*, OWC4 (Anaheim, 2006).
- 13) H. Toda, K. Fukuta, D. Arai, A. Chiba, K. Sasagawa, T.

- Kawanishi, M. Tsuchiya and M. Izutsu: "Performance improvement of high-extinction-ratio LiNbO<sub>3</sub> optical intensity modulator by means of polarization crosstalk reduction," *MWP 2007*, B4P-E (Victoria, 2007).
- 14) T. Kawanishi, K. Kogo, S. Oikawa and M. Izutsu: "Direct measurement of chirp parameters of high-speed Mach-Zehnder-type optical modulators," *Opt. Commun.*, **195** (2001) 399-404.
  - 15) S. Oikawa, T. Kawanishi and M. Izutsu: "Measurement of chirp parameters and halfwave voltages of Mach-Zehnder-type optical modulators by using a small signal operation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (2003) 682-684.
  - 16) T. Kawanishi, T. Sakamoto, A. Chiba, M. Tsuchiya and H. Toda: "Ultra high extinction-ratio and ultra low chirp optical intensity modulation for pure two-tone lightwave signal generation," *CLEO 2008*, CFA1 (San Jose, 2008).
  - 17) H. Kiuchi, T. Kawanishi, M. Yamada, T. Sakamoto, M. Tsuchiya, J. Amagai and M. Izutsu: "High extinction ratio Mach-Zehnder modulator applied to a highly stable optical signal generator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **55** (2007) 1964-1972.
  - 18) T. Kawanishi, T. Sakamoto, A. Chiba and M. Izutsu: "Study of precise optical modulation using Mach-Zehnder interferometers for advanced modulation formats," *ECOC 2007*, 6.2.3 (Berlin, 2007).
  - 19) T. Kawanishi, T. Sakamoto, A. Chiba, M. Izutsu and P. J. Winzer: "Duobinary signal generation using high-extinction ratio modulation," *OFC 2008*, OWL2 (San Diego, 2008).
  - 20) P. J. Winzer, G. Raybon, S. Chandrasekhar, C. R. Doerr, T. Kawanishi, T. Sakamoto and K. Higuma: "10×107-Gb/s NRZ-DQPSK transmission at 1.0 b/s/Hz over 12×100 km including 6 optical routing nodes," *OFC 2007*, PDP24 (Anaheim, 2007).
  - 21) T. Kawanishi, T. Sakamoto, A. Chiba, M. Izutsu, K. Higuma, J. Ichikawa, T. Lee and V. Filsinger: "High-speed dual-parallel Mach-Zehnder modulator using thin lithium niobate substrate," *OFC 2008*, JThA34 (San Diego, 2008).

(2009年1月6日受理)