

professional report

光多値変復調技術とその将来展望

Optical Multilevel Signaling and its Future Outlook

佐々木 慎也 Shinya Sasaki

次世代大容量光通信システムの変復調技術として光多値変復調技術が注目されている。

従来の光通信システムは、光/電子デバイスの高速化や波長多重技術の実用化によって通信容量を増加させてきた。インターネットの普及に伴ってますます増加するトラフィックに対応するには、さらなる大容量化が必要であるが、従来技術による大容量化は限界に近づきつつある。光多値変復調技術は、光の波としての性質を最大限に利用したものであり、上記の限界を突破するブレイクスルー技術として期待できる。

本稿では、光多値変復調方式について、日立の研究活動を中心に紹介するとともに将来展望を述べる。

1 はじめに

1970年代後半に本格的に商用化が始まった光通信システムは、大陸間や大都市間を結ぶ幹線システム、企業/キャンパス内でのLAN(Local Area Network), さらに最近では電話局から各家庭まで情報を運ぶFTTH(Fiber to the Home)システムまで、情報社会を支える社会インフラとしてわれわれの生活に密着したシステムに成長した。

この30年間に、一つの光が運ぶ情報量は数十Mビット/sから40 Gビット/sまでほぼ1,000倍に増加している。これらのシステムは、そのほとんどが光のオン/オフを利用してデジタル情報を運んでおり(On-Off Keying), 情報量の増加は、光をオン/オフさせるスピードを速める技術と、異なる波長の複数の光を束ねて1本の光ファイバで伝送する波長多重技術(WDM: Wavelength Division Multiplexing)とを駆使して実現してきた。

一方、インターネットを流れるトラフィック量は日本では3年に約2.5倍の勢いで増え続けており¹⁾、また米国のデータセンターのトラフィック量も3年で3倍以上に増加すると予測されている²⁾。今後これらの増加するトラフィックを収容するため1本の光ファイバで運ぶ情報量(以下、伝送容量と言う。)を従来技術の延長線上で増やそうとすると、次の問題にぶつかる。

(1) 光のオン/オフのスピードを高速化する場合、超

佐々木 慎也
1980年日立製作所入社
中央研究所 所属
現在、光通信システムの研究開発に
従事
工学博士
電子情報通信学会会員、米国IEEE会員



高速でオン/オフ動作する光/電子デバイスが必要である。光デバイスの場合、一般に高速動作させるための駆動電圧は速度とともに上昇する一方、この光デバイスを駆動する電子デバイスの耐圧は高速になるほど低電圧となり、両立が難しくなる。また、これらのデバイスを開発するには時間とコストがかかりすぎる。

(2) WDMの波長数を増やして大容量化を図る場合、伝送路(光ファイバ)の途中に設けられた光増幅器の増幅可能な波長帯域が有限であることが問題となる。On-Off Keyingで高速化を図る場合、スピードがN倍になると変調スペクトルもN倍に広がり、隣接波長からのクロストークの影響を避けて光伝送するためには、波長間隔を広げなければならない。つまり、波長帯域が有限な光増幅器を用いた伝送路では高速化と波長多重する波長数の数はトレードオフの関係になり、結局、高速化が実現できたとしても伝送容量は増加しない。

そこで最近、次世代大容量光通信システムの変復調技術として光多値変復調技術が注目されており、すでにDQPSK(Differential Quaternary Phase Shift Keying: 差動4値位相変調信号)を用いたシステムが一部実用に供されている³⁾。

日立では次世代の光通信システム、すなわち100 Gイーサ(イーサネット³⁾)や1T(テラ)イーサのシリアル伝送

³⁾イーサネットは、富士ゼロックス株式会社の登録商標である。

システム実現をめざし、光変復調方式の候補として光多値変復調技術を研究している。

ここでは、日立の研究活動、すなわち多値変調と光の遅延検波を用いたインコヒーレント受信(直接検波)とを組み合わせた変復調技術を中心に紹介するとともに、その将来展望について述べる。

2 光多値信号

一般に変調された光信号の電界 $s(t)$ は式(1)で表現できる。

$$\begin{aligned} \vec{s}(t) &= \vec{a}(t) \cdot \cos(2\pi f t + \phi(t)) \\ &= \vec{a}(t) \cdot \operatorname{Re}[S(t) \cdot \exp(j2\pi f t)] \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ここで $\vec{a}(t)$ は偏光ベクトル、 $a(t)$ は振幅変調成分、 $\phi(t)$ は位相変調成分、 f は光の周波数を表す。 $S(t)$ は変調信号を表しており、

$$S(t) = a(t) \cdot \exp(j\phi(t)) \quad \dots (2)$$

と書ける。つまり、変調された光信号は複素空間の点の軌跡として表現できる。この複素空間を信号空間、その空間の中での識別時刻での信号点の配置図をコンスタレーション(constellation: 星座)と呼ぶ。

図1は模式的に表示した光信号の時間波形と信号点の例である。例えば、従来の光通信システムで用いている強度変調方式(On-Off Keying)のコンスタレーションは図1(a)の右図である。光の二つの状態、つまりオンとオフの状態はデジタル情報信号の1と0にそれぞれ対応している。一方、光多値信号は複数の光の状態を用意し、そ

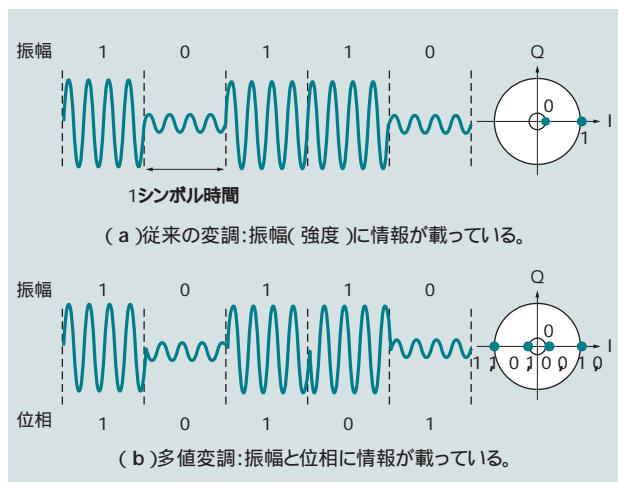
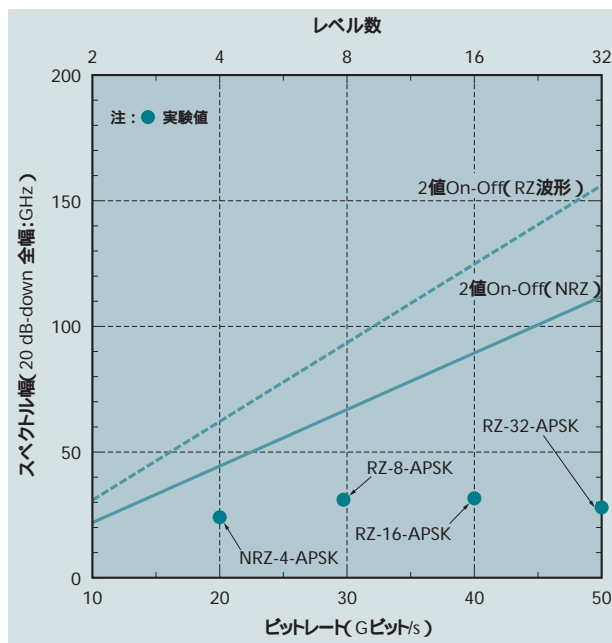


図1 信号波形の模式図とコンスタレーション
従来の変調では1シンボル時間の光に1ビットを載せているが、多値変調では複数ビットを載せることができる。

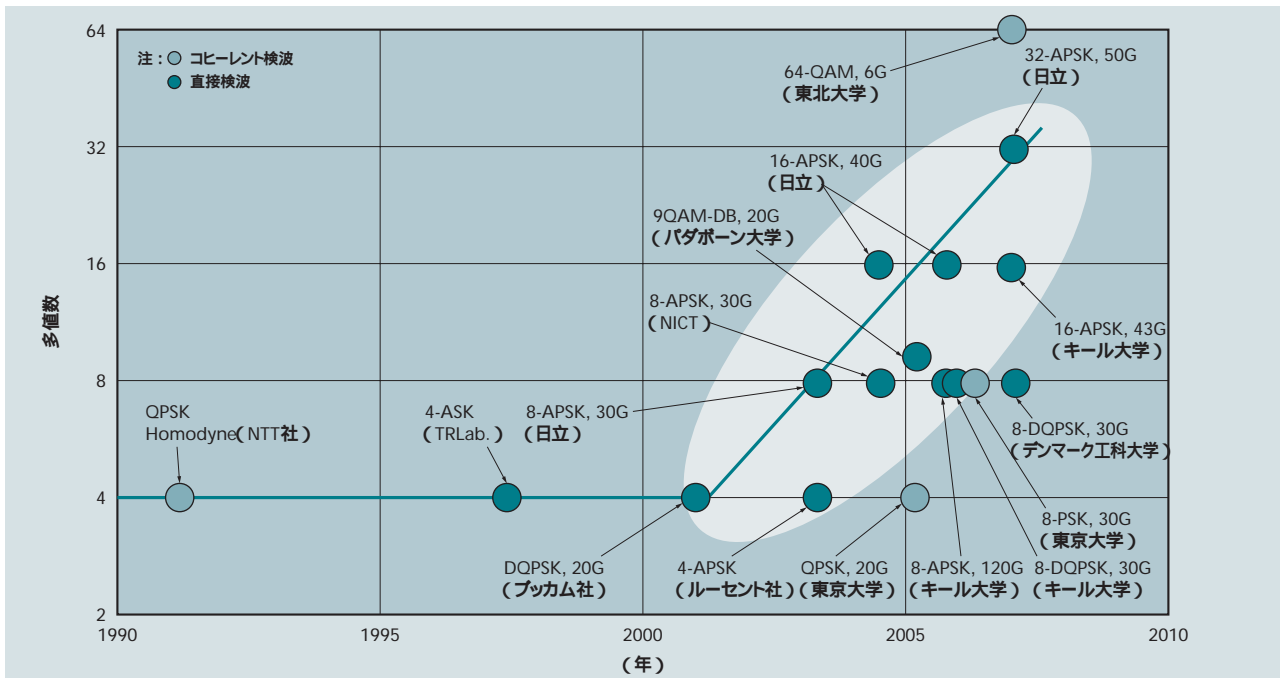


注: 略語説明 RZ (Return-to-Zero), NRZ (Non-Return to Zero), APSK (Amplitude and Phase Shift Keying)

図2 スペクトル幅のビットレート依存性(10 Gbaudの場合)
多値変調ではスペクトル幅はビットレートによらず、シンボルレートで決まる。

れぞれの状態に複数の情報ビットを対応させる。例えば、図1(b)は振幅2値と位相2値を組み合わせた4値APSK (Amplitude and Phase Shift Keying)信号を表現している。四つの異なる位相と振幅を持った光の状態に2ビットを対応させる。例えば振幅がオンで光の位相が0の信号点は1,0に対応し、振幅がオンで位相が $\pi/2$ の信号点は1,1に、振幅がオフ(この場合、光は完全にオフではない。)で位相が0の信号点は0,0に、振幅がオフで位相が $\pi/2$ の信号点は0,1にそれぞれ対応する。

次に多値信号の特徴について述べる。多値信号は、一つの光の状態に複数(M)ビットを表現しているため、同じ伝送容量(ビットレート)のシステムを実現する場合、光の状態を切り替えるスピード、つまりボーレート(Baud Rate: 1シンボル時間の逆数)は2値変調(従来のOn-Off Keyingは2値変調)のその $1/M$ となる。この結果、多値信号を用いた通信システムは、次の利点を持つ。すなわち、(1) ボーレートが低いため変調スペクトルが狭く、したがって各種分散(つまり波長、偏波、モード)に強く、WDM伝送において波長間隔を狭く設定できるので波長数を増やせるという利点である。図2は光の変調スペクトル幅(ピークから20 dBダウンの全幅で定義)とビットレートの関係を表している。図中の線は、従来の2値On-Off Keyingの場合を表しており、実線がNRZ (Non-Return-to-Zero)波形のスペクトル幅を、破線がRZ (Return-to-Zero)波形のスペクトル幅を表している。各点は各変調方式の実験で測定したスペクトル線幅を表して



注：略語説明 QPSK (Quaternary Phase Shift Keying), ASK (Amplitude Shift Keying), DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying), DB (Duo Binary), QAM (Quadrature Amplitude Modulation), PSK (Phase Shift Keying), NICT (独立行政法人情報通信研究機構)

図3 2007年までの主な光多値変復調の実験例

2003年以降、8値以上の多値変復調技術の研究が盛んになってきた。

おり、ボーレートは10 Gbaudである。この図からわかるように、ボーレートが一定の場合、多値数、すなわちビットレートを上げて光のスペクトル幅はビットレートに依存せず一定であることがわかる。したがって、従来の2値変調の高速度化によって所要のビットレートの信号を生成する場合と比べて、多値変調によって生成した場合のほうが、よりコンパクトなスペクトルを持った信号光を生成でき、その結果、ある決まった波長域の中により多数の信号を波長多重できる。また波長分散や偏波分散に強いシステムを実現できる。

多値信号は、そのほかに(2)動作速度がビットレートの $\frac{1}{M}$ の光・電子デバイスを用いることができる、その結果(3)低価格システムを構築できるといった利点がある。

多値信号の欠点は、On-Off Keyingと比べ信号点の間隔が短いので、同じ符号誤り率を得るには、より高いS/N (Signal to Noise Ratio) が必要であることである。

光多値信号を受信する方式としては、コヒーレント受信と遅延検波器を用いたインコヒーレント受信(直接検波)の2方式がある。コヒーレント受信の受信器では、送信光源と光の周波数が近い光源(局発光源)が必要である。またコヒーレント受信では位相ダイバーシティ受信と偏波ダイバーシティ受信を行うため、インコヒーレント受信に比べて2倍の個数のO/E (Optical/Electrical)変換が必要となる。日立は、局発光源が不要で、かつ受信器構成が簡単でその結果低コスト受信器が期待できる、インコ

ヒーレント受信方式に着目して研究を行っている。1 Gbaud以上の主な光多値変復調実験の年代推移を図3に示す。この図では、実験をコヒーレント受信とインコヒーレント受信(直接検波)に分けて表示している。なお、この図では偏波多重での実験は除いている。2002年までは多値数は4値であったが、それ以降多値数は徐々に増加し、インコヒーレント受信方式を用いた伝送実験では現在のところ日立の32値APSK(伝送容量50 Gビット/s)の実験⁴⁾が最大の多値数である。なお、コヒーレント受信を用いた伝送実験では64QAM(Quadrature Amplitude Modulation)による実験⁵⁾が最大の多値数であるが、伝送容量としては6 Gビット/sと小さい。

3 高感度受信を実現するための課題と日立のアプローチ

光多値信号は、信号点間距離は短いS/Nを高く保ち、かつISI(Inter-symbol Interference: 符号間干渉)を極力抑えることによって高感度受信を実現できる。高感度受信を実現するための課題とわれわれのアプローチを簡単に紹介する。

(1) 位相情報の可視化⁶⁾

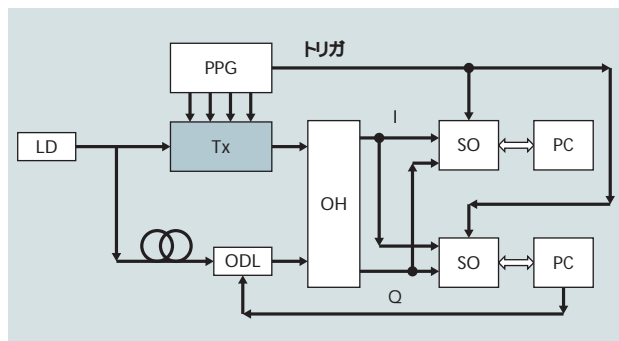
光多値信号では振幅変調とともに位相変調も使用するが、位相情報を正確に評価することは重要である。従来の光/電気(O/E)変換器ではこの情報を引き出すことは難

しい。そこでわれわれは電界の信号空間での軌跡を三次元(I, Q, 時刻)表示できる観測手法を考案した。これは自己ホモダイン検波方式を利用し、電界の振幅と位相の変化を電気信号のそれに変換する手法である。これによって位相のISIを正確に評価し、その原因を特定できる。その構成を図4に示す。半導体レーザー(LD)からの光の一部は局発光として用い、残りは光多値変調送信器で多値変調のかかった信号光となる。これら二つの光は光90°ハイブリッド回路で合波され、局発光と同相成分(I)の光と直交成分(Q)の光に分解され、それを2台のO/E変換器付きのサンプリングスコープ(SA)を通してパソコン(PC)にデータとして読み込む。時間軸を固定するためにPPG(Pulse Pattern Generator)のトリガ信号を用いて基準時刻を決定している。

この観測系を用いてRZ波形の16値APSK信号を観測した例を図5に示す。この観測手法を用いると各時刻での信号光の振幅と位相のISIの様子を把握できる。

(2) ISIを抑圧した変調方式⁷⁾

光多値変調では極力ISIを抑圧する必要がある。ISIが大きい場合は、信号点間距離が短くなる。送信信号の振幅のISIが大きい場合、光ファイバ中の非線形光学効果によって伝送中に振幅のISIが位相のISIに変化し、振幅方向



注：略語説明 LD(半導体レーザー), Tx(光多値送信器), PPG(パルスパターン発生器), ODL(光可変遅延線), OH(光90°ハイブリッド回路), SO(サンプリングオシロ), PC(パソコン)

図4 自己ホモダイン型電界観測系

光多値信号の電界を観測するための測定系を開発した。

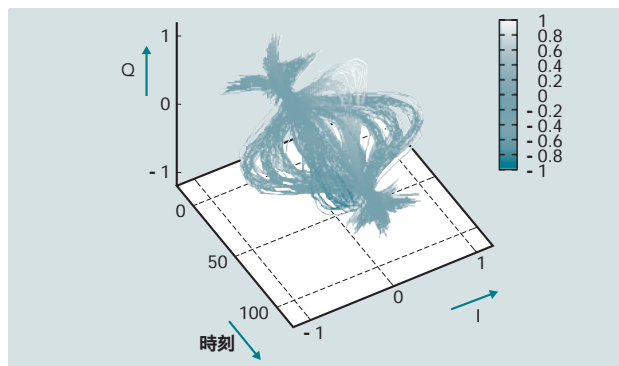
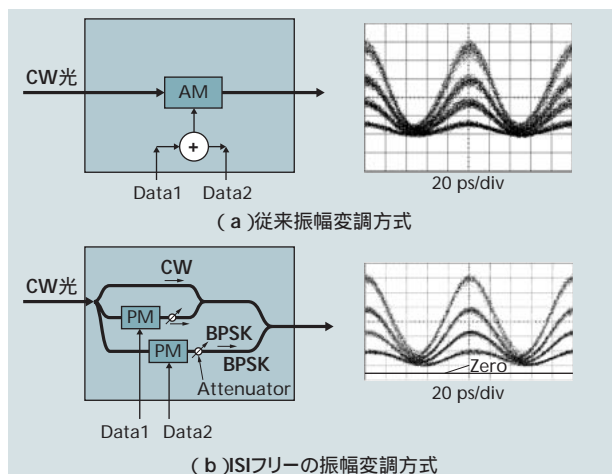


図5 電界観測の例(RZ-16APSKの場合)

電界の可視化によって、振幅ならびに位相のISI(符号間干渉)を定量的に把握できる。



注：略語説明 CW(連続), AM(振幅変調器), PM(位相変調器), BPSK(2値位相変調信号)

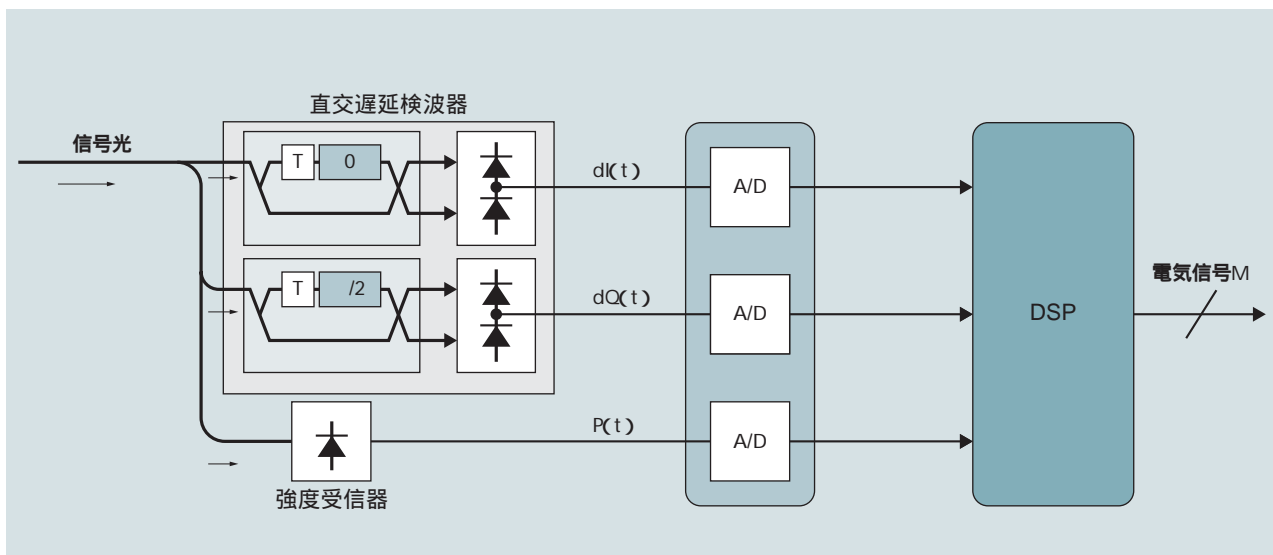
図6 ISIフリーの振幅変調方式

提案した振幅変調方式で生成した波形はISIが少ないことがわかる。

のみならず位相方向のアイ開口も閉じることになり、その結果受信感度が悪くなる。この光多値信号の振幅のISIは送信器での光変調器を駆動する電気信号の波形歪(ひずみ)が主な原因である。そこでわれわれは、電気信号のISIが大きいても光信号のISIが極力発生しない変調方式を提案している。具体的には、ISIフリーの位相変調を組み合わせると振幅多値変調を実現する方式である。位相を0とに変調する位相変調器(PM: Phase Modulator)ではISIフリーの変調が実現できることは以前から知られており、日立は、このISIフリーの位相変調を組み合わせることによってISIフリーの振幅変調(AM: Amplitude Modulation)を実現した。4値振幅変調QASK(Quaternary Amplitude Shift Keying)信号の送信器構成と波形を従来例(電気信号を4値化してこれを用いて振幅変調)と比較して図6に示す。この図の波形からわかるように、提案した送信器では符号間干渉が大きく低減されていることがわかる。この送信器を8値APSK信号(QASK+BPSK(Binary Phase Shift Keying))に適用した場合、ISIフリーの効果で感度が3 dB向上し、波長分散耐力が3.7倍増加した。

(3) 受信器の高感度化⁸⁾

インコヒーレント受信を用いる場合、位相成分の信号は差動符号化して送信する。受信器ではいかにこの光の位相情報を引き出すかが重要な課題である。日立は結合型インコヒーレント受信器を提案した。これを図7に示す。受信器は振幅方向の情報を取り出す従来の直接検波と2台の直交する遅延検波器を用いる。2台の遅延検波器は、互いに位相が90°ずれており、1ビット前の光との位相差を直交成分に分解して受信する。同相成分[$dI \cos(\quad)$]と直交成分[$dQ \sin(\quad)$]を受信し、これらの比のarctanを計算することにより、位相差空間での信



注：略語説明 DSP (Digital Signal Processing), P (Power)

図7 光多値信号用受信器

提案した光多値信号用受信器。この受信器は多値数によらず同じ構成で受信できるという特長がある。

号点の位置がわかる。直交した2台の遅延検波器の両方の情報を用いているので結合型直交遅延検波器と呼ぶ。この受信器を用いると、基本的には任意の位相点配置を持つ光多値信号を同一の構成の受信器で受信できるという特長がある。また、図7にも示したように、A/D (Analog/Digital) 変換で受信信号をデジタル化することによって、送信器、伝送路、受信器のアナログ部分で発生するISIをデジタル信号処理 (DSP: Digital Signal Processing) で補償する高感度受信器を実現できる。

4 光多値変復調技術の具体例と将来展望

この章では、光多値変復調技術の具体例として、日立が提案した32値APSK信号 (10 Gbaud) の変復調技術を紹介するとともに、光多値変復調技術の将来展望を述べる。

図8に提案した32値APSK信号の信号点配置を示す。無線システムで使われている16値QAM信号などの格子状配

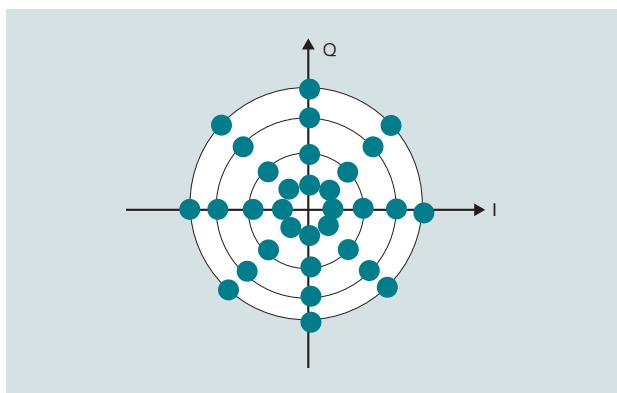


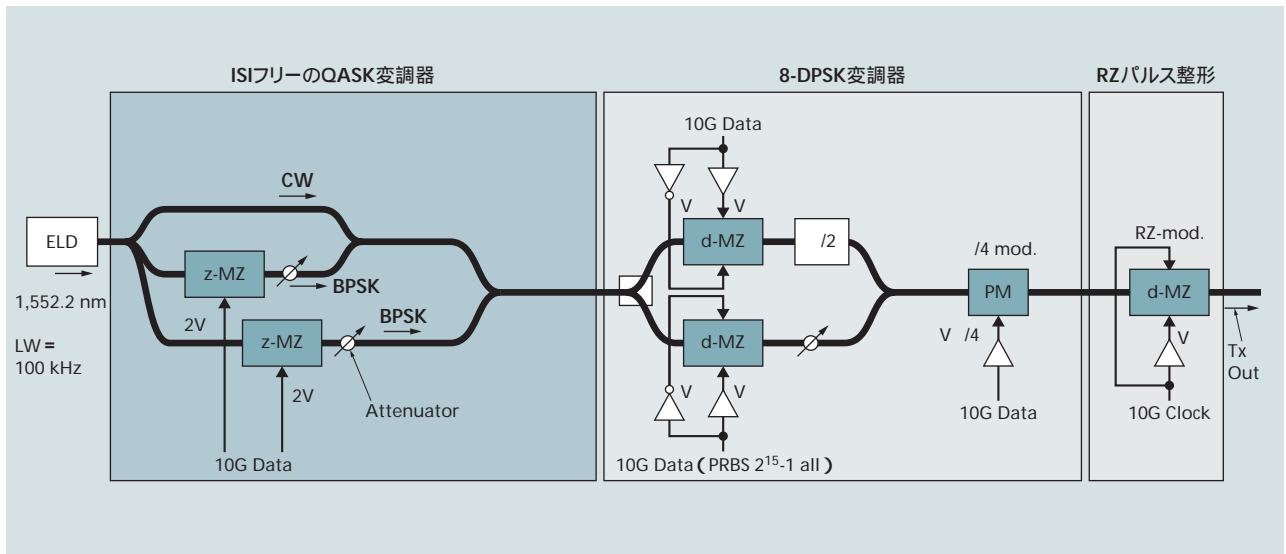
図8 32値APSK信号のコンスタレーション

信号点の位相方向の開口が45度あり、信号光の位相雑音に強い配置になっている。

置と比べると日立の32値APSK信号は隣接する信号点間の位相差が45度と大きく、位相雑音が大きな半導体レーザ光源に適した信号となっている。

この信号を生成する送信器の構成を図9に示す。波長1,552 nmの外部共振器レーザの出力光に第3章で述べたISIフリーの振幅変調器を用いて10 Gbaudで4値振幅変調QASKをかけ、次に差動8値位相変調8DPSK (Differential Phase Shift Keying) をかけて、最後にRZ波形に整形する。生成した光多値信号は10 Gbaudで32値のAPSK信号 (QASK+8DPSK) である。受信器は、第3章で述べたデジタル受信器 (図7参照) とし、デジタル信号処理では波長分散補償としてFFE (Feed Forward Equalizer) を用いている。この送受信機の組み合わせで100 kmの伝送に成功した。この成果は現時点でインコヒーレント受信を用いた光多値伝送の中では最大の多値数である。

最後に光多値変復調技術の将来展望を述べる。ここで示した32値APSK変復調技術を見てわかるように、受信器は簡素化されているが送信器が変調器6台を用い、電界を送信器内部でアナログ加算した複雑な構成となっている。これは将来超高速D/A (Digital/Analog) 変換回路と線形性のよい光I/Q変調器が実現することによって簡素化できる。この送信器が実現できると原理的には任意のコンスタレーションが生成可能となり、図7の受信器と組み合わせることで、デジタル送受信器が実現する。この送受信器の内部のデジタル信号処理としては、伝送路符号化、送信器ISI低減のためのデジタルフィルタ、伝送路での波長分散補償、受信器ISI低減のためのデジタルフィルタなどが考えられる。この送受信器によって、多値数に依存しない低コストシステムが実現できる。



注：略語説明 ECL (外部共振器レーザ), z-MZ (位相変調器), d-MZ (両側駆動位相変調器), PM (位相変調器), PRBS (擬似ランダムビット列), Lw (スペクトル線幅)

図9 32値APSK信号送信器の構成

提案したISIフリーの4値強度変調器と8値差動位相変調器をタンデム接続することによって図8の32値APSK信号を生成している。

5 おわりに

本稿では、光多値変復調技術の概説、光多値信号の高感度受信を実現するための課題と日立のアプローチ、さらにこれらのアプローチを用いた32値APSK信号の変復調技術を紹介し、最後に将来展望を簡単に述べた。

光多値変復調技術は光の波としての性質を最大限に利用しており、将来の光通信システムを実現するうえで重要な技術である。

光通信システムが実用化されてから30年あまりが経過するが、その歴史を振り返ると大きな技術革命が二度起こったことがわかる。第一の革命は1980年代後半の「光増幅器」の実用化であり、この技術の出現によって、1,000kmを越える長距離システムを低コストで実現できた。第二の革命は1990年代後半の「WDM」の実用化であり、これによって伝送容量の飛躍的な増加を実現できた。われわれは現在、第三の技術革命の真ただ中にいると考える。この革命は、第4章の将来展望で述べた「デジタル送受信器」の実用化である。この技術革命は光多値変復調に限らず、従来の2値On-Off Keyingの送受信器にも適用でき、このデジタル送受信器を用い送受信器内部でデジタル信号処理を施すことによって高価な波長分散補償ファイバ(光の等化器)が不要となり、システムコストの劇的な低減を実現できる。われわれはこの技術革命を推進して2010年以降の100 Gイーサや1 Tイーサの実現に貢献する。

最後に、この研究の共同研究者である、日立製作所中央研究所の菊池信彦氏、萬代浩平氏、株式会社日立コミュニケーションテクノロジーの関根賢郎氏に深謝する。

参考文献など

- 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フィックの集計・試算」平成20年2月21日、
http://www.soumu.go.jp/s-news/2008/080221_3.html
- 2) D.C.Lee : 100G and DWDM: Application Climate, Network and Service Architecture, OFC/NFOEC 2008, paper OThB1 (2008)
- 3) NTTコミュニケーションズ株式会社、
http://www.ntt.com/serviceinfo/2007/01/s_0125.html
- 4) N.Kikuchi, et al. : First Experimental Demonstration of Single-Polarization 50-Gbit/s 32-Level (QASK and 8-DPSK) Incoherent Optical Multi-level Transmission, OFC/NFOEC 2007, post deadline paper, PDP21 (2007)
- 5) J.Hongou, et al. : 1 Gsymbol/s, 64 QAM Coherent Optical Transmission over 150 km with a Spectral Efficiency of 3 bit/s/Hz, OFC/NFOEC 2007, paper OMP3 (2007)
- 6) N.Kikuchi, et al. : Time-Resolved Waveform Measurement of High-Speed Phase-Modulated Optical Signals Using Self-Homodyne Interferometry, paper We2.3.2, ECOC 2005 (2005)
- 7) N.Kikuchi : Inter-Symbol Interference (ISI) Suppression Technique for Optical Binary and Multilevel Signal Generation, IEEE. J. of Lightwave Technol., Vol.25, No.8, 2007, pp. 2060-2068
- 8) N.Kikuchi, et al. : Proposal and First Experimental Demonstration of Digital Incoherent Optical Field Detector for Chromatic Dispersion Compensation, ECOC 2006 post deadline paper Th.4.4.4 (2006)