

100Gbit/s以上の容量を目指す マルチレベル変調フォーマット

アブハイ・M・ジョシ、シューバシシュ・ダッタ、アンドリュー・クロフォード

コヒーレント検出を組み合わせたマルチレベル変調フォーマットは、スペクトル効率を向上して将来の光ファイバリンクの情報容量を大幅に拡大する。

1980年代の終わりごろからの光ファイバネットワークは、世界規模で絶え間なく拡大する光ネットワークの基盤になった。1988年に敷設された大西洋横断海底通信ケーブルTAT-8などの初期の光ファイバリンクは、今日の標準的な比較的簡単なシステムから構成され、光ファイバ1本あたり毎秒数百メガビット(Mbit/s)のオンオフ信号を送っている。

1992年になると波長分割多重(WDM)が採用され、それぞれのチャンネルに独自の光搬送波周波数が割り当てられた複数光チャンネルが、同一の光ファイバ内を同時に伝搬するようになった。WDMは光増幅器の技術革新を組み合わせる単一ファイバの情報容量の指数関数的増加を実現し、「情報化時代」の到来を告げた。

最新のWDMネットワークは1本の光

ファイバに50GHzのグリッド間隔をもつ80もの光チャンネルを組み込み、システムに使われる光ファイバ増幅器のスペクトル限界に到達している。その結果、光チャンネルの「水平積層」の増加による情報容量のさらなる拡張は不可能になった。しかしながら、主としてビデオ伝送により点火された情報伝送の世界需要はさらに成長すると予測されている(図1)⁽¹⁾。最近ではWDMを補足するハイレベル変調フォーマットのコヒーレント検出方式が光ファイバ基幹ネットワークのさらなる高度化の解決策として登場している。

ハイレベル変調フォーマット

情報チャンネルは基本的に二値電子論理回路が組み込まれたさまざまな信号処理システム間で二値データ流の伝送を行う。物理媒体上での情報の高効率

伝送には独立した直交次元の多重二値流の集合が必ず含まれる。

波長分割多重は、このような次元の一つの光搬送波周波数を利用して、多重光チャンネルの集合を可能にしている。従来のそれぞれの光チャンネルは1bit/symbolのスペクトル効率をもつオンオフ変調(OOK)や差動位相偏位変調(DPSK)などの二値信号伝送方式を使用している。その結果、単一光チャンネルの情報スループットは対応する符号速度と光電子および電子サブシステムのアナログ帯域幅を広げることで、40Gbit/sへの拡大が着実に進展した。

現在の50GHzのWDMグリッド間隔を前提にすると、光チャンネル間のクロストークを回避しながら符号速度をさらに増加して100Gボーを実現することは難しい。したがって、符号速度の増加ではなく、その他の直交次元、つまり光位相や偏光を利用したハイレベル変調による情報スループットの増強が必要になる(図2)。

光位相を利用すると、四位相偏位変調(QPSK)用の信号配置が実証したように、同相(I)と直交(Q)の2つの二値データ流の多重化が同一の光搬送波で可能になる。このような2つのQPSK信号は直交偏光状態での独立した変調が可能となり、4bit/symbolのスペクトル効率を得られる。確かに、通信業界は二重偏光QPSK(DP-QPSK)を使用して100Gbit/sへの光チャンネルの高度

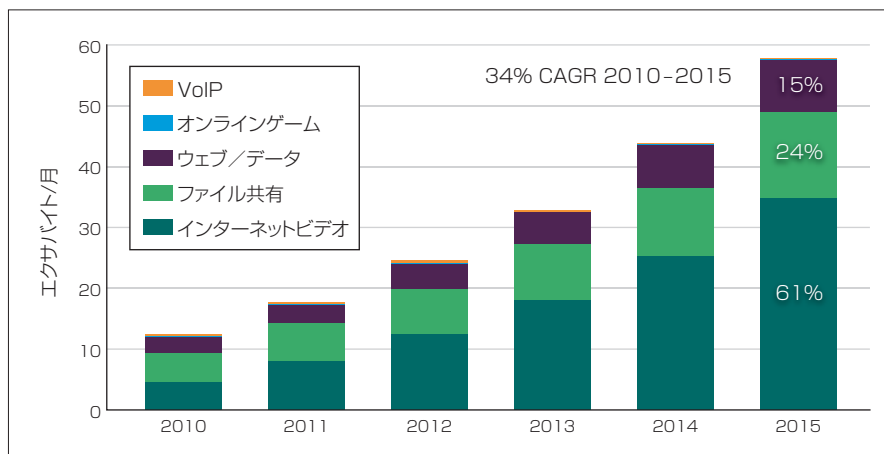


図1 シスコが2011年に予測した世界のインターネットトラフィック需要。

化を25Gボーの符号速度で行うことに合意している⁽²⁾。

スペクトル効率のさらなる増加は単一直交次元上での多重二値データの組み合わせ、つまり、二重偏光16直交振幅変調(DP-16QAM)の場合のように、光搬送波周波数、位相および偏光の組み合わせが必要になる。DP-64QAMなどのさらに複雑な非常に高いスペクトル効率をもつ変調方式も研究されている。残念なことに、符号の次元を増やすと、送受信機的设计が複雑になる。

DP I-Q 送信機

二値変調フォーマットのOOKやDPSKを光搬送波に使用する光送信機は1つのマッハ-ツェンダー変調素子(MZM)しか必要としない。光位相と偏光の両方を利用すると、4つのMZM、つまり、それぞれの直交次元に対してそれぞれ1つのMZMが必要になる。MZMはいずれも入力電気信号を単一偏光状態にして送信機のレーザー信号(光搬送波)と同相にする。関係する二値データ流を他の3つの次元に移すには2つの光移相器と1つの偏光回転子が必要になる(図3)。DP-QPSKよりも高いスペクトル効率をもつ変調フォーマットは、光変調の前に多重二値信号を集めるためのデジタル-アナログ変換器(DAC)が必要になる。

コヒーレントDP I-Q 光受信機

光強度の変動はOOK光受信機と同様に、十分な帯域幅をもつ光検出器を使うことで直接検出できる。対照的に、光位相と偏光は参照光信号による決定が必要になる。したがって、高次変調フォーマットを解読するにはコヒーレント受信機内の局部光発振器を用いて受信信号を混合しなければならない。

さらに、コヒーレント検出は受信光

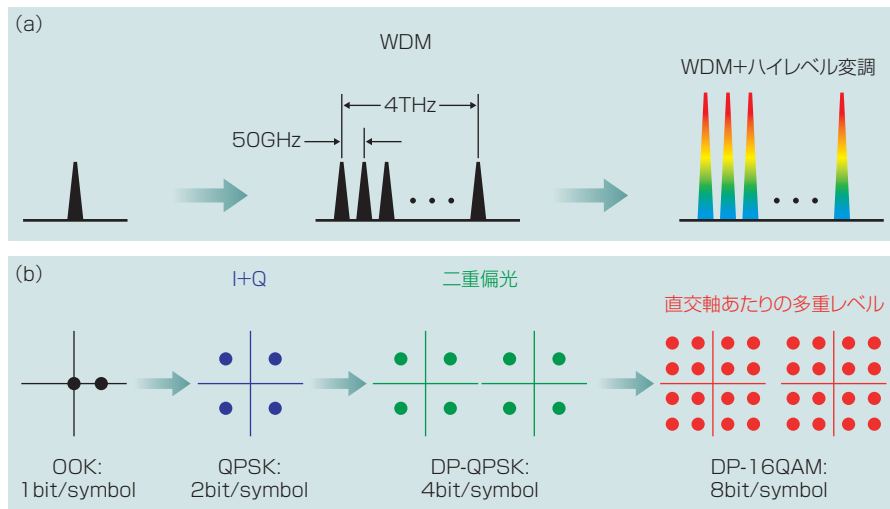


図2 (a)は単一光ファイバ伝送における波長分割多重(WDM)による情報チャンネルの「水平積層」とハイレベル変調フォーマットによる「垂直積層」を図示している。(b)は単一光チャンネルにおけるスペクトル効率の増加による変調フォーマットの増加を示している。

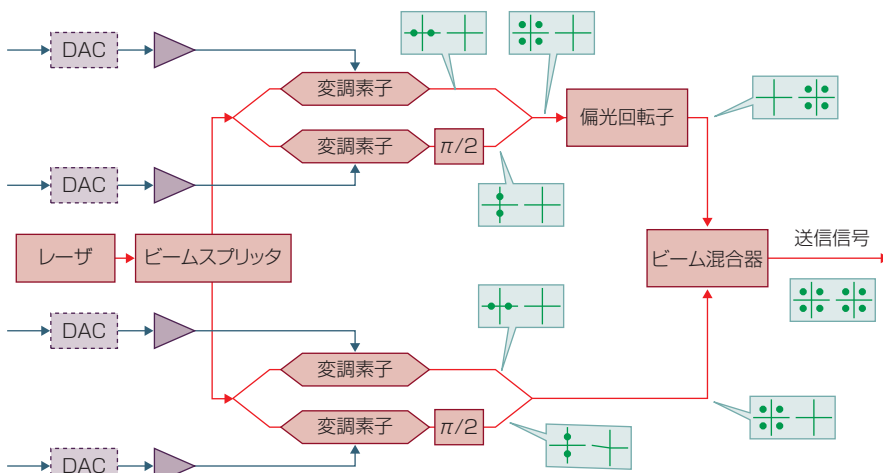


図3 DP四位相偏位変調(DP-QPSK)信号配置の進展を実証する二重偏光(DP)同相/直交(I-P)光送信機概念図を示している。DP-16QAMなどのハイレベル変調フォーマットには電子的デジタル-アナログ変換(DAC)が必要になる。注:この送信機はWDMシステムのそれぞれの光チャンネルに必要となる。

と電気出力との間に伝達関数の線形性が成立する。その結果、デジタル信号処理(DPS)半導体チップを集積した超高速アナログ-デジタル変換器(ADC)を使用し、電子領域の波長分散や偏光モード分散などを補正して、光ファイバに必要な伝搬線形性を確保する(図4)。DPI-Q送信機とは違って、DP-16QAMなどのハイレベル変調フォーマットを受信する場合でも受信機部品の追加は

必要でない。

挑戦課題

ハイレベル変調フォーマットの光信号の発生と受信は、受信機設計の部品点数の大幅な増加を引き起こし、受信機サイズの制約が問題になる。また、4つの直交次元の多重化と逆多重化は平行する信号光路間の振幅と位相の対称性を注意深く考慮しなければならない。

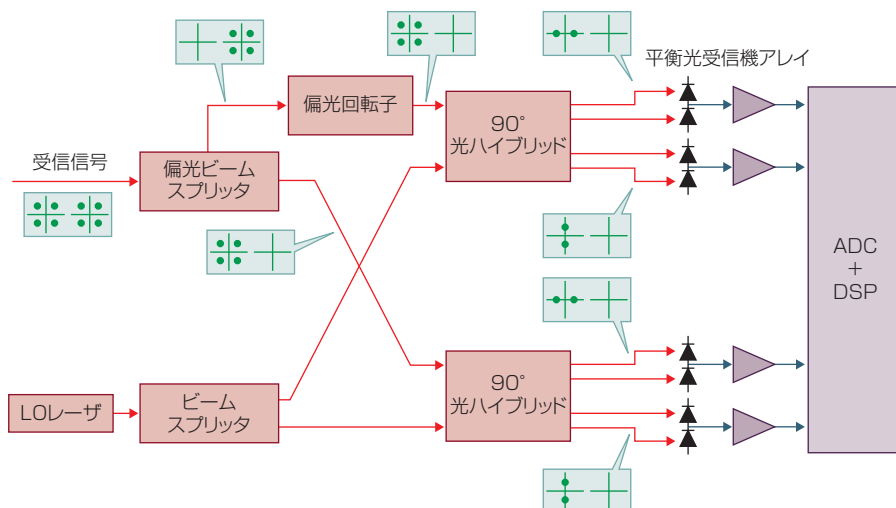


図4 DP-QPSK信号配置を分解するコヒーレント二重偏光I-Q光受信機概念図を示している。この信号配置はLOレーザと受信信号との光位相と偏光の不整合を無視している。

しかしながら、業界標準 (IA) にもとづいて相互運用通信ネットワークソリューションの開発と採用を推進しているコンソーシアムの光インターネットワーキングフォーラム (Optical Internetworking Forum) が想定したように、これらの問題はフォトニック集積を用いることで合理的に対応できる^{(4)、(5)}。また、フォトニック集積は送受信機のサブシステムの光実装に必要な製造コストの低減も期待できる。

ADCとDSPをコヒーレント受信機に組み込むには、もう1つの技術課題、つまりダイナミックレンジの確保が必要になる。OOKとDPSKの二値フォーマット用の光受信機は基本的にクロック・データ回復(CDR)チップに組み込まれた高速コンパレータを使用して、光受信機の電気的アナログ出力を電子のデジタル領域に変換しなければならない。

光学的に分解された直交軸のそれぞれが二値(1ビット)情報を完全に含むことが必要になるDP-QPSKは、このようなCDR回路が4つあれば十分だと思われるかも知れない。しかしながら、受信機的设计には偏光安定器と光位相

固定局部発振器がないので、平衡光検出器アレイの4つの電気的アナログ出力には大きな相互結合が起こり、その分離はデジタル領域だけで可能になる。

したがって、前方誤り訂正(FEC)が 1×10^{-3} のビット誤り率(BER)をエラーフリー性能に変換できると仮定すれば、有効ビット数(ENOB)をもつ電気的アナログ信号が必要になる。その結果、DP-16QAMやDP-64QAMなどの高次変調フォーマットを適用するには、約3

ビットのオーバーヘッドが必要になる⁽⁶⁾。パワー損失と同期の問題を考慮すると、このようなダイナミックレンジやENOBをADCとDSPにおいて実現することは容易でない。

最近の進歩は25Gボー(100Gbit/s) DP-QPSK伝送用の解決策をもたらし、ADCとDSPの両方の機能を組み入れた40nm補補性金属酸化物半導体(CMOS)特定応用集積回路(ASIC)が開発された⁽⁷⁾。高次変調フォーマットはADCのさらなる改良に加えて、送信機用のDACにも同様の性能が要求される。

光WDMリンクの情報容量を現在の50GHzのグリッド間隔を維持した状態で増加するには、変調フォーマットのスペクトル効率のさらなる増加が必要になる。高次変調フォーマットの光コヒーレント検出は、従来は使用されなかった光位相と偏光を利用することで、光チャンネルの情報容量を100Gbit/s以上に高度化できる。フォトニック集積と電子処理技術の顕著な進歩によって高度化が実現した光WDMリンクは、全世界の通信をますます拡大すると予測される。

参考文献

- (1) Cisco white paper, "Broadband Access in 21st Century: Applications, Services, and Technologies," www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/white_paper_c11-690395.pdf (2011).
- (2) Optical Internetworking Forum Implementation Agreement on "100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document," OIF-FD-100G-DWDM-01.0 (June 2009).
- (3) F. Buchali, "Technologies towards Terabit Transmission Systems," 2010 European Conference on Optical Communication (ECOC), tutorial paper We.6.C.1, Turin, Italy (2010).
- (4) Optical Internetworking Forum Implementation Agreement on "Implementation Agreement for Integrated Polarization Multiplexed Quadrature Modulated Transmitters," OIF-PMQ-TX-01.0 (March 2010).
- (5) Optical Internetworking Forum Implementation Agreement on "Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Intradyne Coherent Receivers," OIF-DPC-RX-01.1 (September 2011).
- (6) T. Pfau, S. Hoffmann, and R. Noe, J. Light-wave Technol., 27, 989-999 (2009).
- (7) I. Dedic, "High Speed CMOS DSP and Data Converters," 2011 Optical Fiber Communication Conference (OFC), paper OtuN1, Los Angeles, CA (2011).

著者紹介

アブハイ・M・ジョシ (Abhay M. Joshi) は米ディスカバリー・セミコンダクターズ (Discovery Semiconductors) の社長兼CEO、シューバシシュ・ダッタ (Shubhashish Datta) は同社のフォトニクスエンジニア、アンドリュー・クロフオード (Andrew Crawford) は同社のシステムエンジニア; e-mail: abhay@chipsat.com URL: www.discoverysemi.com.