

光位相同期回路による コヒーレント検波技術の開発

藤井 亮浩 村井 仁

近年のインターネットトラフィックの爆発的増加を受け、光基幹回線では大容量化が進められてきた。これを実現する技術として、多数の光波長を使う波長多重技術が標準的である。しかし、トラフィックの増加量は、波長多重技術のみで収容可能な帯域を遥かに凌駕すると予想されたため、従来のOOK (On Off Keying) に対して帯域利用効率を向上させることが可能なコヒーレント光伝送技術が開発されてきた。コヒーレント光伝送技術は、光搬送波に位相変調や振幅変調により光信号の状態を多数作り、それらに複数ビットのデジタルデータと対応づけることで、1つのシンボルで複数ビットを伝送することができる。現在、すでに100Gb/s級の長距離コヒーレント光伝送方式が普及し、大容量基幹回線の根幹を成している。さらに、近い将来、400Gb/s級光伝送システムが市場に現れようとしている¹⁾。このようなコヒーレント光伝送システムでは偶発的に生じる故障、部品の破損などによる波形劣化を検出し、いち早く障害を除去するために必要不可欠となる品質モニタ装置は、現状、高速デジタル信号処理方式に依っており、50GSample/s以上の超高速A/Dコンバータ、超高速ロジック回路などが必須なるため、装置の消費電力が大きく、コストも高くなる課題がある。

このような課題を解決するため、当社では2015年に国立研究開発法人情報通信研究機構により公募された委託研究「光信号の低コスト受信・モニタリングのための小型光位相同期回路の研究開発」に、株式会社アルネアラボラトリ、日本電信電話株式会社、東京大学、東北大学と共に参画し、アナログ処理に基づく低コストな光コヒーレント伝送方式の検波・監視手法として有望な、光位相同期技術を利用した品質モニタ装置の開発に取り組み、当社は光位相同期回路の方式設計・動作検証を担当している。

本委託研究では、現状の100Gb/s級基幹回線で標準的である25Gbaud-QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) で利用可能な品質モニタ装置の実現を目指し、光位相同期技術を開発している。本稿では、本委託研究での当社の取組み、及び研究成果を紹介する。

光位相同期技術の概要と課題

(1) 光位相同期技術

光位相同期技術は、受信した光位相変調信号から搬送波を再生するものであり、伝送されたデジタル符号を復調するための中核技術として1980年代から精力的に研究されている。しかし、長期安定動作をさせることが難しく、実用レベルでの技術確立にいたっていない。図1に、位相変調信号の代表例であるBPSK (Binary Phase Shift Keying) の復調概略を示した。振幅が一定の搬送波の位相にデータビット0と1が、それぞれ0と π の位相反転として重畳されている。これに、局発光と呼ばれる同一周波数を持つ光波を同位相で重ね合わせることで、この位相反転部分は強度変化に変換される。これにより、同位相の部分は1に、逆位相の部分は0に対応付けられ、データ検出が可能となる。そのために、BPSKから周波数と位相が同一の局発光を高精度に生成する光位相同期回路が必要となる。

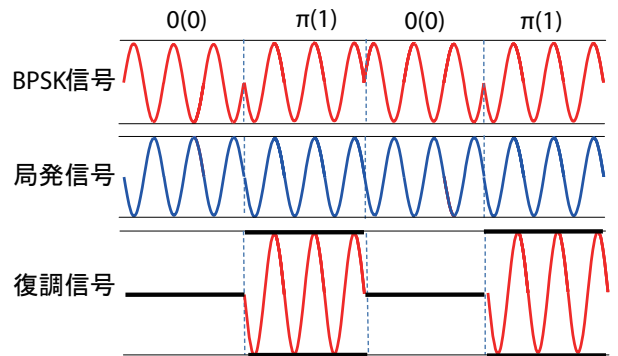


図1 BPSKの検波例

図2に、光位相変調信号を復調するための光位相同期回路の基本構成を示す。受信した光位相変調信号は、局部発振光源からの出力と90°光ハイブリッドで合波され、光電変換器で搬送波と同相であるI (In-phase) 成分、及び搬送波と直交したQ (Quadrature-phase) 成分の二つの電気信号に変換される。この二つの成分に対して累乗器にて適切な乗算処理を施すことにより光位相変調信号の搬送波と局発信号の位相誤差が抽出される。さらに、

ローパスフィルタにて平滑化された位相誤差信号を局部発振光源にフィードバックすることにより、最終的に位相誤差が0となるような制御が施される。

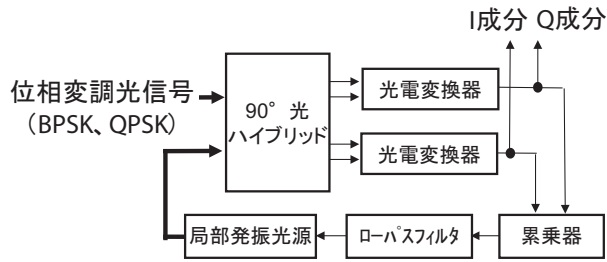


図2 光位同期回路の基本構成

この構成では累乗器は重要な機能をもつため、その機能を説明する。図3(a)はBPSKの信号配置図で、信号のI成分、Q成分をそれぞれ横軸、縦軸に表したものである。図3(a)の黒点は局部発振光源に位同期したデータ点を表している。BPSKの場合は、Q軸方向に値を持たず、I軸に成分が現れ、位相0と π に位置する黒点のI軸座標値がそれぞれデータ0および1に対応する。入力された光位相変調信号と局部発振光源との間に位相誤差 θ があると、図中の白丸で示す位置に対応する。このとき、黒丸と白丸との差が位相誤差になるが、データ位置が位相差 π 離れて2箇所あるので、位相差が θ と $\theta + \pi$ の2通りとなりこのままでは区別がつかない。

これを解消するために累乗器を用いる。累乗器は複素数の累乗演算に相当する機能を持つ。BPSKの場合、2乗演算を行う。この演算により位相角は2倍となるので図3(b)のように局部発振光源に同期した信号配置は1点(図中の黒丸)になり、またの位相変調信号も1点に重なる(図中の白丸)。このように位相差が1通りとなり、その位相差は元の位相誤差の2倍となる。このように入力信号の搬送波と局部発振光源との位相差を検出できる。この成分がゼロとなるようにフィードバック制御をすることにより位同期が実現される。次にQPSKでの位同期について見てみる。図4(a)はQPSKの信号配置図であり、ちょうど $\pi/2$ ずつ位相の異なる4つの状態がある。図中で黒丸が局部光発振器の位同期したデータ点を表している。入力された光位相変調信号と局部発振光源との間に位相誤差 θ があると、図中の白丸で示す位置に対応する。QPSKの場合は、累乗器は4乗演算を行う。すると位相角はそれぞれ4倍となるので、図4(b)のように同期した信号点は一つの黒丸に重なり、入力された位相変調信号も一つの白丸に重なる。このとき位相誤差は 4θ となる。実際の累乗器の演算構成例を図5に示す。この演算処理によ

ると、最終的にデータ部分が相殺され、位相誤差の4倍である 4θ の成分が抽出される。この成分を誤差信号としてフィードバック制御を行い、誤差信号が0とすることで、光位相変調信号に同期した局発信号が得られる。

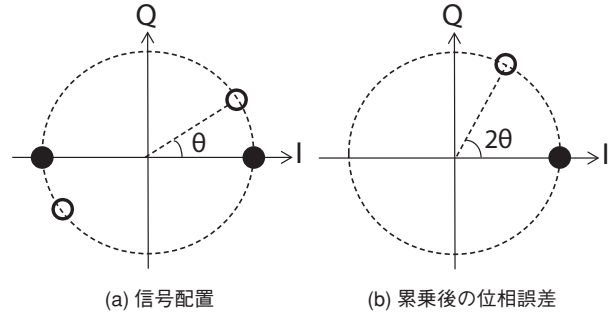


図3 BPSKの信号配置図

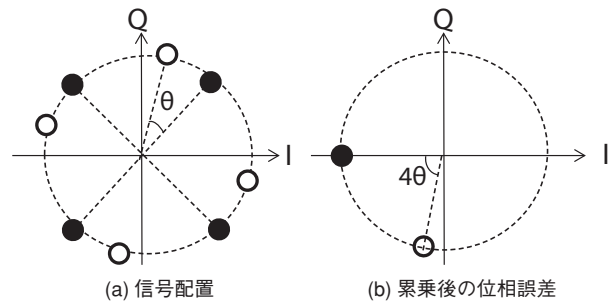


図4 QPSKの信号配置図

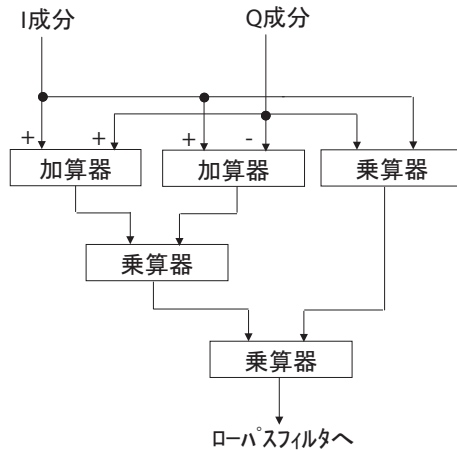


図5 QPSKに対する位相誤差抽出に必要な演算

(2) 光位同期技術

前節で示した手順を実現するために、主に次に示す二つの技術課題解決が必要となる。

① 技術課題1

一つ目は数十Gbaudのシンボルレートに対応する累乗

器を実現する技術である。一般に光位相変調信号のシンボルレートは数十Gbaudであるため、I成分、及びQ成分は電子回路の動作限界を超えた帯域となり、直接の乗算処理は困難である。著者らが以前に行った10Gbaud-QPSKの80kmの伝送実験では、この乗算・加算をFPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたデジタル処理で実現していた²⁾。しかし、シンボルレートが2倍以上である25Gbaud-QPSKの復調では、入出力・デジタル演算による処理時間が大きくなることによりフィードバック遅延が顕在化するため、位相揺らぎに敏感な高シンボルレートではむしろ性能を劣化させる可能性があった。

②技術課題2

2つ目は累乗器から90°光ハイブリッドに至るフィードバック系の遅延時間を短縮する技術である。局部発振光源であるレーザーは、水晶発振器に代表されるRF (Radio Frequency) 発振器と異なり、コヒーレンスが格段に劣っており、周波数不安定性が大きい(1秒あたりで高精度高周波発振器の10倍~1000倍程度)。さらに、光波のような搬送波周波数が高い(例えば携帯電話の電波に比べて10~20万倍)搬送波を扱う場合、外乱等により生ずる位相変動が従来の電気信号より相対的に大きくなる。よって、堅牢な動作を担保するためには、電気領域における位相同期回路に比較して格段に高速な動作が要求される。したがって、長期間の高性能動作を保証するためには、フィードバックループ部分を、集積化技術を用いてなるべく小さく構成し、フィードバックに要する遅延時間をなるべく小さくする必要があり。これにより、信号光・局部発振光源に内在する位相揺らぎに対する耐性が向上し、光位相同期時の長期安定性が格段に向上する。同時に、光位相同期システム全体のサイズ的大幅な小型化が可能となり、センサー・計測領域で応用する際にも実用性を大幅に向上させることが可能である。

光QPSK復調用光位相同期回路の開発と実験結果

本委託研究では、前述の2つの課題に対して、以下の解決策を検討している。技術課題1に、著者らは以下の手法を提案した。トラック&ホールド回路を用いて、I成分、及びQ成分を十分低速(シンボルレートの1/250)でサンプリングを行うことにより信号の間引きを行い、間引いた部分のビット長をサンプリング周期まで拡大する。この処理は、見かけ上シンボルレートを下げることに対応しており、市販のアナログ電子回路で十分処理が可能な程度まで帯域を落とし込むことが可能となった。さらに、これにより、累乗器での乗算・加算をアナログ処理で行うことが可

能となり、前述のデジタル演算に比較して高速な演算を実現した。これは、フィードバック回路の低遅延化の意味でも効果があると考えられる。技術課題2の抜本的解決に関しては、日本電信電話株式会社、東京大学がシリコンフォトニクスによる光電子集積技術を用いた小型光位相同期回路用のデバイスを開発し、プロジェクト全体で超小型の光位相同期回路を実現する。これに向けて現在、光部品、電気部品の光電子集積化の方式検討を進めている。2019年の本委託研究の最終年度に著者らが提案した手法と合わせて最終結合評価実験を行う予定となっている。

次に、著者らが提案した技術課題1に関する解決手法を織り込んだシステムの1次試作を行い、基本動作検証を行った結果を述べる。今回の実証実験は、提案手法の有効性を示すために、25Gbaud-QPSKの80km伝送前後における復調特性評価を実施した。図6に復調信号の伝送前後における符号誤り率と図7にその際のI成分、およびQ成分の波形を示す。両チャンネルとも良好な性能を生示し、エラーフリー(<10⁻⁹ @-25dBm)を実現した。これにより、提案手法の有効性が検証された。なお、光位相同期回路による25Gbaud-QPSKの80km伝送実験の詳細は文献3)を参照されたい。

今回の1次試作機は、低コストな市販品を組み合わせることで構成されている。今回の1次評価結果から、現状で波形劣化が顕在化しない短距離ネットワーク(例えば、スーパーコンピュータネットワーク、データセンターネットワーク)で利用可能な、低コスト品質モニタとしての有用性が十分に示せたと考える。今後は、5~10年後にアクセス系等で想定される伝送速度及び広範囲な光周波数帯域での動作確認、有用性を検証しつつ、利用可能領域の拡大に向けて取り組む。最終的に本技術が完成した際には、高ビットレートな光位相変調信号の品質を低コストで常時かつ容易にモニタリングすることが可能となり、光通信ネットワークの安全な運用に大きく貢献できると考えられる。

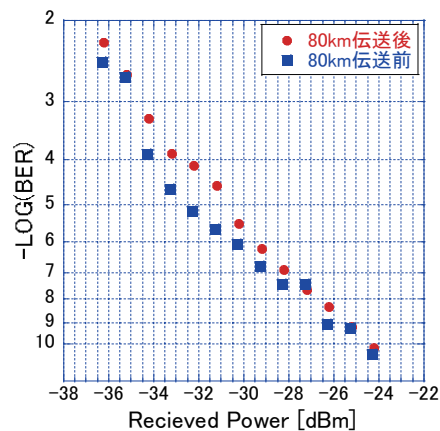
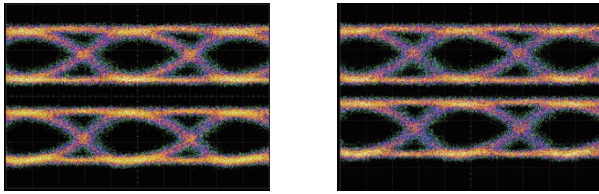


図6 25Gbaud-QPSKの符号誤り率



(a)80km 伝送前

(b)80km 伝送後

図7 復調波形のアイパターン

まとめと今後の課題

本稿では、国立研究開発法人情報通信研究機構による委託研究「光信号の低コスト受信・モニタリングのための小型光位相同期回路の研究開発」に基づき開発している光位相同期技術の概要を述べ、25Gbaud-QPSK信号の80km伝送実験評価結果を紹介した。光位相同期技術は、通信のみならず、近年、IoT (Internet of Things) 機器の普及に伴い重要性を増すセンシング分野、特に光ファイバーセンサー、レーザードップラーセンサーをはじめとする各種光波計測領域でも重要となる技術である。そこで、今後は、光波センシングへの応用も念頭に置き、開発を進める。

謝辞

本稿の内容は、国立研究開発法人情報研究機構からの委託研究「光信号の低コスト受信・モニタリングのための小型光位相同期回路の研究開発」の成果の一部です。関係者各位に感謝します。◆◆

参考文献

- 1) The Ethernet Alliance., The 2016 Ethernet Roadmap, <http://www.ethernetalliance.org/roadmap/> (2017年3月10日)
- 2) A. Fujii et al.: Stable QPSK Demodulation using a Digital Optical Phase-locked Loop with a 2nd-order Active Loop Filter, IEEE Photonics Technology Letters, Vol26, Issue18, p1847-1850, 2014.
- 3) 藤井、他：50Gb/s-QPSK の光位相同期回路による復調実験に関する報告、2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集、B-10-26、2016.

筆者紹介

藤井亮浩：Akihiro Fujii. 情報・技術本部 研究開発センター ネットワーク・端末技術開発部

村井仁：Hitoshi Murai. 情報・技術本部 研究開発センター ネットワーク・端末技術開発部

TIPo 【基本用語解説】

シンボルレート

一回の変調により伝送可能なデジタルデータをシンボルという。一回の変調で2bit分の情報を送信可能ならシンボルは4種類となる。このシンボル単位での1秒あたりの伝送速度をシンボルレート (baud) という。

コヒーレンス

波の持つ性質の一つで、位相の揃い具合、すなわち、干渉のしやすさ (干渉縞の鮮明さ) を表す。コヒーレンスが高いほど、位相の揃い具合が高い。

トラック&ホールド回路

アナログ信号のある時刻の値をサンプリングし、コンデンサの積分動作を用いて一定時間この値を保持することにより0次ホールド波形に変換する回路のこと。

OOK (On Off Keying)

搬送波の振幅にデータビットを強度の変化として重畳する変調方式である。

BPSK (Binary Phase Shift Keying) 、 QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)

搬送波の位相にデータビットを位相反転として重畳する変調方式である。代表的なコヒーレント変調方式である。