

平成27年度 委託研究

課題 181

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

研究計画書



1. 研究開発課題

『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』

2. 研究開発の目的

現在、光ファイバ通信ネットワークにおいて、コヒーレントな光変復調方式が次世代の光通信技術として研究開発が盛んに進められている。その中心は、光信号をAD変換器によりデジタル化したのちに高速な電気の信号処理により光位相の揺らぎなどを補正する「デジタルコヒーレント技術」である。デジタルコヒーレントは信号復調に高度なデジタル信号処理を活用し光の波動としての特性を活かした多値変調による高速伝送を実現し、周波数利用効率、伝送特性の向上を目指すものである。LSI技術の飛躍的な向上を背景に今後の高速光通信を支える重要な要素技術として期待される。一方で、所要計算量の少ない光波形情報のリアルタイムな検出を実現する光計測技術の開発及び、リアルタイムに光伝送信号解析を行えるモニタリングシステムの開発が課題である。

これらの課題を解決する強力な手段となる技術として、情報通信研究機構（以下、「機構」という。）ではデジタル信号処理を活用した光位相同期技術の開発を進めている。これは、光電気信号処理回路により光位相同期を実現するもので、この方式ではコヒーレント光波形情報の取得が所要計算量の少ないDSPで可能となり、低消費電力化、低コスト化などのメリットがある。社会実装に向けては、多様な信号に対する適応動作や、モニタリング機能等の実装が重要で、そのためには本回路の小型化が本質的に不可欠となる。

本研究課題では、この方式に基づき、小型光位相同期ループと低速DSP処理を用いた、低消費電力、集積・小型なデジタル光位相同期技術（Digital Optical Phase Locked Loop: DOPLL）の開発を行う。また、簡易なコヒーレント光波形取得を実現し、光伝送信号等のリアルタイムモニタリング機能等の動作検証を行う。

3. 採択件数、研究開発期間及び予算

採択件数：1件

研究開発期間：契約締結日から平成31年度までの5年間。

予算：各年度、総額140百万円（税込）を上限とする。

（提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。）

4. 研究開発の到達目標

1) 集積・小型光位相同期回路の研究開発

半導体微細加工技術などの光回路製造技術を活用し、電子・光集積型の小型位相同期回路を開発する。開発対象となる小型位相同期回路では、光回路部分として①局発レーザ光源、②光周波数制御回路、③光ハイブリッドカップラを構

成し、これを集積する。小型 DOPLL の実現のために、先に述べた光回路部分の各要素に求められる性能は以下のとおりである。

① 線幅 10kHz 以下、出力光強度 10dBm 以上、光周波数調節可能範囲：3THz 以上

② 光周波数可変域 100MHz 以上、挿入損失 3dB 以下

③ 光挿入損失 2dB 以下、損失誤差 1 dB 以下、90 度位相誤差 5%以下

一方、電子部分には、①光を電気信号に変換するフォトダイオード、及び ②検出信号を増幅する TIA 回路を用いた光検出部分と、③高速信号をサンプリングする広帯域・高速サンプリング回路、④デジタル信号処理回路、⑤ループフィルタ回路を開発し、これを集積する。小型 DOPLL の所定の性能を満たすために、それぞれの部分に求められる性能は、以下のとおりである。

① 帯域 40GHz 以上

② 帯域 40GHz 以上、利得 10dB 以上

③ 帯域 40GHz 以上、100Msa/s 以上 2Gsa/s 以下

④ 100Msa/s 以上 5Gsa/s 以下

⑤ 可変制御性を備えること

これらの回路を、シリコンフォトリソグラフィまたはそれに準じた光、電子集積技術を活用し製作する。集積の度合いについては、小型化の効果を得るために、DOPLL のループ長を全長 5cm 以下とすることを最低目標（3cm 以下を努力目標）とし、現時点及び開発期間中の技術的背景を考慮し、よりループ長短小化に効果を発揮する集積技術を優先的に採用する。

2) DOPLL システムを用いた中・短距離光伝送及びモニタリングの研究開発

アクセス系や比較的短距離のネットワークへの適用を想定し、多様な光信号や、C、L バンド以外の例えば T、O バンド等の広い光周波数帯域に対する DOPLL 機能の動作可能性を示すと共に、光信号のモニター機能を示す。100Gb/s 超級のアクセス系等の光信号に対する光波形情報取得・モニタリング機能を実証する。

求められる機能は、以下のとおりである。

- 想定される任意の光周波数、並びに多様な光信号に対して、瞬時に光位相同期を確立する自律同期機能を備えること。
- 単一のモニタシステムにて複数チャンネルを監視する、マルチチャンネルモニタ機能を備えること。
- 劣化要因を含む信号品質の分析レポートおよび伝送路寸断などの異常時にはアラームを発生する機能を有すること。
- チャンネルレート 100Gb/s 超級の WDM 伝送システムにおいて、DOPLL の適応動作およびそれを用い QPSK 等の多値光信号のコンスタレーションおよび EVM 値を 10 秒以内で表示するモニター動作を

実証すること。

- 実波形との計測誤差を 10%以内（目標 5%以内）とし、検出する光信号の EVM、Q 値を評価出来る機能を備えること。

上記 1)、2) で目標とする小型光 DOPLL は、40GHz 級での動作帯域を持ち、100Gb/s 超級の QPSK 信号等の光信号を広い光周波数帯域で受信する能力を持つ。これは、5-10 年後にアクセス系等で想定される伝送速度及び広い光周波数帯域利用に対応するものである。この課題では、集積型 DOPLL を用い、これらの光信号を簡易にモニターする機能を実証する。

5. 研究開発の運営管理及び評価について

研究開発に当たっては、機構が自ら行っている高速信号の復調に関する研究及び広帯域波長空間利用技術の研究（光ネットワーク研究所光通信基盤研究室）との連携を図るものとする。光通信基盤研究室では自主研究として DOPLL の開発を行っているが、これは、光多値信号、光多重信号の復調等の新しい機能の原理実証を目的とするものであり、DOPLL 関連の評価系を備えている。本研究開発により製作する集積・小型 DOPLL 及びその製作段階の各研究開発と光通信基盤研究室における研究開発の連携を図るため、適宜、進捗などについて調整を行うことが望ましい。以下に、連携の具体例を挙げる。研究開発の進捗に応じ、4 節（研究開発の到達目標）にて上述の光回路①～③、電気回路①～⑤の単体を機構側 DOPLL 評価系にて評価する。また、機構内での原理実証用 DOPLL に組み込み、各回路の性能を確認する。そこでは、機構内で開発中の半導体レーザ等の光デバイスを検証信号として用いる等、DOPLL 各機能の特性評価を行う。DOPLL 内で用いられるデジタル信号処理は柔軟な書き換えによって、DOPLL 制御の多様な機能を可能とするが、機構側の原理実証用信号処理と互換性を保つことにより、機能実装、検証の進捗を効果的に進める。

研究開発の後半（4-5 年目）においては、集積・小型 DOPLL の試作版を、機構側の評価系により評価し、この全体性能を確認する。また、アクセス系等への適応は、機構側のテストベッドへの適用を検討し、全体の目標達成を管理・確認する。

また、複数の機関が共同で受託する場合には、代表提案者が受託者間の連携等の管理運営を行うこと。

機構は研究開発の進捗状況等を把握するために、ヒアリングを実施することがある。

平成 29 年度に中間評価（必要に応じて）を、平成 31 年度に終了評価を行う。終了評価の結果等を踏まえ、研究開発終了後に追跡評価を行う場合がある。

6. 参考

既存のデジタルコヒーレント方式の復調部は、光信号と受信器側で生成した局発光とをミキシングしてベースバンド信号に変換したのち、超高速 AD 変換器にてデジタル値に変換する。局発光と受信光信号の光位相差を前記超高速 AD 変換器に継続接続するデジタル信号処理 (DSP) 回路にて補正計算して、信号復調する。この方法ではデジタル信号処理にて上記補正以外にも様々な機能が実現できる反面、リアルタイムでの高い信号処理能力が要求され、大規模集積回路が必要となる。また、伝送速度は増大させるが全体の消費電力は下げていく大きな方向性の中、低消費電力かつ大規模演算回路の実現はハードルの高いものとなっている。一方、上記局発光と光信号の光位相差は、デジタル信号処理を用いなくてもフィードバック的手法で局発光の制御を行うことで補正することが可能である。すなわち、光信号と局発光とをミキシングした後の広帯域信号を低速サンプリングし、局発光の光周波数を適切に変えるような光 PLL システムを実現すればよい。通常、局発に用いる光源は半導体レーザであり、その光位相の変化速度は 10KHz~10MHz 程度と低速である。したがって、前記サンプリングのサンプリング速度はこの変化を PLL によってフィードバックできる速度でよく、既存のデジタルコヒーレントシステムに用いられる AD 変換器や DSP よりもずっと低速のものでよい。そのため位相を補正するための演算のための回路の消費電力を低減することができる。DSP での処理アルゴリズムは適用するフォーマットによって大きく異なるが、例えば、無線システムで用いられているコスタスループをベースとした手法をあげることができる。局発光の周波数、位相制御には光位相変調、光単側波帯変調などの技術の適用が可能である。ただし、サンプリング回路の入力部分はデータ変調された超広帯域信号であり、その信号をサンプリングするサンプリング回路に要求される特性は、入力回路の超広帯域特性である。このために、高速のサンプリングダイオードなどを用いたサンプリング回路を実現する必要がある。

このような DOPLL は、ループ長を短小化することによって、高安定性や、俊敏な制御機能性等実践的な性能が得られる。そのためには、各回路を集積した集積型 DOPLL の開発が重要となってくる。現在、シリコンフォトニクスなど半導体を用いた光集積技術は、多様な光回路をコンパクトに集積することを可能とする手法として有力視されている。電子デバイス開発で培われて半導体微細加工技術が転用できるため、高精度光回路を比較的容易に開発可能となる。また、電子回路と融合させ、光回路と混在も可能であり、この点は大きな魅力である。中でも、新しい材料である SiON や量子ドット等を適用した場合、環境温度の変動影響をうけにくい光・電子混在回路実現に有利と考えられている。これは、高コスト化につながる温度管理等を排することにつながり、アクセス系等のコストに厳しいシステム適用という視点でも、重要となってくる。さらに、アクセス系等の比較的短い距離での光通信やモニタリングを考えた時、大規模な光周波数チャネルが必要となってくる。C バンドでは 4.4THz の帯域しか存在しておらず、今後、T や O バンドなどのより広

い光周波数帯域の利用が検討されている。そのため DOPLL に関しても C や L バンド以外の、T や O バンドの帯域で光通信・信号モニタリングの動作を示すことが重要となる。

DOPLL は、上述のように、その回路中に光回路及び電気回路を併せ持つ上、小型化が求められる。また、アクセス系等への適用を考えた時、その低コスト化や広い波長帯域動作は避けられない。シリコンフォトニクス等により光集積化を図ることは必然的な流れと言える。