

採 択 番 号 : 18101
研究開発課題名 : 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
副 題 : 光電子集積技術を活用した光位相同期回路の小型化とシステム検証

(1) 研究開発の目的

現在の光通信ネットワークとしては、インターネットを流れる情報トラフィックが年率 40%程度の増加率で伸び続けている。従来は光の強度変調を信号として伝送する光強度伝送方式が採用されていたが、昨今の大容量コンテンツの配信などを目的としたブロードバンドアクセスの普及により、光ファイバ通信システムの更なる超高速・大容量信号伝送能力の増大が要求された。その要求に答える形で、現在では光の位相情報を信号として伝送するデジタルコヒーレント光通信が普及し始めている。

デジタルコヒーレント光通信においては、送信側では前述した様に光を位相変調することによって信号を伝送している。一方、受信側では受信機内に内蔵された連続波局部発振光 (Local Oscillator: LO) と信号光とを干渉させることによって光位相情報を光電界複素振幅として検出して信号光の復調を行っている。この際、信号光および LO 光においては、検出原理上、信号光と LO 光の位相差がそれぞれの光位相雑音によってランダムに変化するために雑音あるいは検出誤差がランダムに発生する。この位相雑音を除去するために、信号ビットレートよりもさらに高速なデジタルシグナルプロセッサ (DSP) を用いて信号成分の検出、雑音及び位相誤差の補正を行い、信号伝送を行っている。

一方で、デジタルコヒーレント光通信の信号品質の計測、モニタリングのためには、測定器側にもデジタルコヒーレント受信機と同様な構成が必要となる。具体的には 50GSa/s 以上の超高速 A/D コンバータ、超高速・超大容量 DSP など計測器に対する負荷は過大となり、現状では高額な測定器においても間欠的な計測しかできないのが実情である。

このような現状の下、計測技術と言う観点では、研究計画書 (課題 181) に上げられているとおりデジタルコヒーレント光通信において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、およ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。そのためには低消費電力、集積・小型なデジタル光位相同期技術の開発および光伝送信号等のリアルタイムモニタリング機能の動作検証が必要である。このような技術が完成した暁には、デジタルコヒーレント光通信の光信号品質を常時、容易にモニタリングすることが可能となり、光ネットワークの安全運用に貢献できるものと思われる。

研究者らは、情報通信研究機構の委託研究事業、課題番号 154「デジタル位相光制御による低消費電力高速コヒーレント伝送技術の研究開発」の開発を平成 23 年～平成 25 年の 3 年間にわたり行ってきた。ここでは超高安定 LO 光源、デジタル光位相同期回路を開発し、LO 光を長時間にわたって高安定に信号光に光同期させることを実現した。その結果、デジタルコヒーレント光通信用受信機に搭載されているような超高速 A/D、DSP を用いずに光測定器として簡便にデジタルコヒーレント信号光の信号処理、簡易的な計測に成功した。しかしながら課題としては下記の点がある。

- LO 光が波長固定であったため、信号光の波長ドリフトに対する追従が難しく、ロックレンジの拡大が必要
- 光位相同期回路のロックレンジがあまり広くない

LO 光は超高安定性が必要であったため、吸収セルを用いて絶対光周波数を基準にして安定化を行った。しかしながら、信号光は必ずしもこのように高安定ではなく、信号光自身の光周波数がドリフトしていき、これに対応することが困難であった。光位相同期回路のロッキングレンジは、主に市販の光学部品、電気部品を用いたためにそれらの性能、特性に支配される。具体的には、光位相同期回路の核となる光 VCO (Voltage Controlled Oscillator) の周波数可変範囲が狭く、入力信号光の波長 (周波数) ドリフトに対して十分なロッキングレンジを確保出来ていない。その結果、信号光の波長ドリフトがロッキングレンジを外れてしまい、計測器あるいはモニターとして必要な雑多な環境での常時観測性を満たすほどの長時間安定性を得ることができなかった。

本研究では、これらの解決策としてシリコンフォトニクス (SiPh) などの光電子集積技術を用いた小型光位相同期回路技術の開発を実施する。LO 光源としては狭線幅、高安定であることはもちろんのこと、光通信の帯域内であらゆるチャネルに対応できるような波長可変光源とし、さらに光位相同期回路のロック時でも信号光のドリフトに追従するトラッキング機能を持つ。光位相同期回路の長時間安定動作を強固なものにするためには、光部品、電気部品の機能を持つ、光電子集積技術を開発する。光電子集積技術を用いてループ遅延を小さくすることにより、信号光・LO 光の位相雑音に対する耐性が向上し、光位相同期の安定化が可能となる。同時に、光位相同期システム全体のサイズを大幅に小型ができ、計測器としての実用性を大幅に向上することができる。光電子集積技術には新たに開発する光導波路、電気高周波部品、超高速 Ge-PD などが含まれ、集積化がなされる。さらに、これらの技術を集結しモニタリングシステムの構築を行う。モニタリングシステムにおいては 100Gbps 超級の QPSK 信号等の光信号をモニターする機能を有し、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できるものである。

(2) 研究開発期間

平成 27 年度から平成 31 年度 (5 年間)

(3) 実施機関

株式会社アルネアラボラトリ<代表研究者>
沖電気工業株式会社
国立大学法人東北大学
日本電信電話株式会社
国立大学法人豊橋技術科学大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 700 百万円 (平成 30 年度 140 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究項目 1 : 光 PLL システムの研究開発

1. 高安定光 PLL 技術の開発 (沖電気工業株式会社)
2. 波長可変狭線幅 LO 光源の開発 (国立大学法人東北大学)
3. 光信号モニタリングシステムの開発 (株式会社アルネアラボラトリ)

研究項目 2 : 光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

1. 光集積デバイスの開発 (日本電信電話株式会社)
2. 電子集積デバイスの開発 (日本電信電話株式会社)

研究項目 3 : 光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

1. 光 PLL 用ゲルマニウムデバイスの開発 (国立大学法人豊橋技術科学大学)

(6) 特許出願、論文発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	16	3
	外国出願	2	0
外部発表	研究論文	5	1
	その他研究発表	57	18
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	2	0
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究項目 1 : 光 PLL システムの研究開発

研究項目 1-1 高安定光 PLL 技術の開発

本年度は、波長可変光源の微調整アルゴリズムを実装した。さらに、自律位相同期に関して課題 1-2、1-3 と連携して動作検証を行い、課題抽出を行った。本年度実施した疎調整アルゴリズムの詳細動作評価の結果、疎調整終了時に 200~400MHz 程度、信号光と局発光の周波数オフセットがある場合が確認された(ハードウェアによる検出誤差の影響と考えられる)。この状態から両者の周波数オフセットを高精度に相殺するために、位相同期回路とは別に広帯域 AD コンバータをさらに設け、無歪でビート信号周波数を取得する構成を採用した。さらに、デジタル領域で累乗アルゴリズムを実施し、昨年度提案したように FFT を行うことによりピーク周波数を高精度に取得する方法を実装した。エイリアシングを起こさないため、最低 3GS/s 以上のサンプリングレートが必要であることを明らかにした。疎調整アルゴリズムは 3125MS/s で分解能 1kHz に対して概ね 3 秒以下の処理時間となった。

研究項目 1-2 波長可変狭線幅 LO 光源の開発

本年度は動作波長が異なる 3 つの波長可変光フィルタを 1 つのステップモータで連続的に切り替える波長可変機構を新たに開発し、これを従来の波長可変光源に適用することで C+L バンド(1530~1620nm) 波長可変半導体レーザを実現した。本レーザは波長可変範囲全域で 8kHz 未満の線幅特性及び -130 dB/Hz 以下の相対強度雑音(RIN) 特性を同時に満足する。また、課題 1-1、1-3 との連携実験(光 PLL の自律位相同期制御実験)を通じ、開発した光源の課題抽出を行った。その結果、本光源には長期的に数十 MHz の発振周波数変動が見られ、これが光 PLL の安定動作を妨げる要因であることがわかった。レーザ周波数変動の要因を調査した結果、いくつかの課題が明らかになり、問題解決に向けた見通しを得ることができた。

研究項目 1-3 光信号モニタリングシステムの開発

H30 年度は光信号モニタリングシステムの実現に向けて装置設計を実施し、基板を製作した。マルチチャンネル化の為に、1 枚のマザーボードに 4 台の DOPLL ボード(ドータボード)を同時に稼働させることが可能とする構成を採用した。ドータボードは Integrated Coherent Receiver、トラックアンドホールド回路、そして 25 Gbaud の入力位相変調信号から FPGA を動作させるためのクロック抽出回路を搭載している。DOPLL によって復調された信号は USB 経由でパソコンに転送され、各種信号処理される。4 枚のドータボードを接続すると 4 回線の復調信号が観測可能となる。これらのボードは高さ 2U、19 インチラックに収納可能である。最終年度は今回設計、作製したシステムに対して、研究項目 2 で開発された成果物を搭載し、より小

型化した最終形態として仕上げる。

研究項目2：光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

研究項目 2-1 光集積デバイスの開発

【目標】

OH およびその Ge-PD との集積については、H30年度は、H29年度に確立した集積技術をベースに、集積デバイスの特性改善を進めるとともに、集積デバイスに低損失な光入出力や電気入出力を構築する技術を検討する。

また、光回路の小型化に向けた Si 基板上への LO 光源集積については、H30年度は、LD on Si に適用可能な波長/位相可変機能、およびこれら的高速周波数掃引機構を検討する。加えて、Si 導波路素子との集積方法を検討する。

【実施内容及び成果】

SiON-OH のパッシブデバイス試作を進め、すべての仕様を同時に満たすためのデバイスパラメータを取得した。OH および Ge-PD との集積試作を実施し、光 FE としての動作を確認した。デバイス試作と並行して光ファイバ実装検討を開始した。

Si 基板上への LO 光源集積については、2次試作を進め、SiON 導波路との集積を実現した。昨年度試作と比べ大幅な線幅改善を確認し、将来の光 PLL への適用可能性を示した。

研究項目 2-2 電子集積デバイスの開発

【目標】

電子集積デバイスについては、H30年度は、H29年度に実現した TIA 及びサンプリング回路を一体集積する検討を行う。受信 FE に実装した際に、両機能間の帯域劣化を最低限にするとともに、電気長を物理的に最短にすることを目標とする。

FE の実装については、H30年度は、受信 FE モジュールに、光集積デバイスと電子集積デバイスをハイブリッド集積し、デジタルコヒーレント信号を実際に入力することで動作を検証する。また光 PLL のシステム検証に受信 FE モジュールの1次試作品を提供する。

【実施内容及び成果】

電子集積デバイスについては、受信 FE に TIA 及びサンプリング回路を実装した際の帯域劣化を最低限とするため、H29年度に実現した TIA 及びサンプリング回路の一体集積 IC を設計し、シミュレーションで基本機能を確認できたため、製造を開始した。

FE 実装については、光 PLL システムで課題となっていた偏波変動耐性を高めた新構成による受信 FE モジュールのプロトタイプを試作し、デジタルコヒーレント信号を実際に入力するシステム検証に提供した。

研究項目3：光 PLL 用ゲルマニウムデバイスの研究開発

① 光 PLL 用 Ge-PD の開発

当初掲げた数値目標のうち、前年度までに達成済みの受光効率 0.6 A/W 以上 (C バンド) および暗電流 1 μ A 以下に加え、動作周波数 40GHz 以上 (C バンド) を達成した。すなわち、光 PLL 用 Ge-PD として当初掲げた数値目標を全て達成した。日本電信電話株式会社の研究グループと共同で、チップ提供用の Ge-PD と OH をモノリシック集積したデバイスを試作した。

② 暗電流低減

暗電流 1 μA 以下（接合面積あたり 10 mA/cm^2 に相当）を達成済みであるが、接合面積あたり 1 mA/cm^2 オーダーまで暗電流を低減するため、Si/Ge 界面のみを選択的に SiGe 混晶化する急速熱処理プロセスの導入を行った。Ge 層の内部まで SiGe 化が進む問題が発生したため、原因の究明とプロセス最適化を進めている。

③ 動作波長範囲の L バンド側への拡大

SOQ (Si-on-Quartz) ウエハ上へ形成した Ge 層を用い、横方向に pin 接合をもつフリースペース PD を試作し、光吸収係数スペクトルを評価した。前年度までに、引っ張り格子ひずみが増加する効果により、バンドギャップが 0.75 eV まで縮小（光吸収端 1.65 μm に相当）し、L 帯受光が可能となる見通しを得ていた。試作した PD を評価した結果、L バンドにおいて光吸収係数が増大していることを実証した。L 帯受光可能な PD へ適用できる。