ウェブサイト公開用

(様式10)

(海外特別研究員事業) 令和 2年 4月15日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採	用	年	度	平成 31 年度	.*
受	付	番	号	201960442	
氏	8.9.5		名	近藤主佑	4

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。 なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地(派遣先国名) 用務地: ロサンゼルス (国名: アメリカ合衆国)

2. 研究課題名(和文)<u>※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。</u> <u>CMOSフォトニクスを用いたソリッドステートスローライトレーザーレーダーの開発</u>

3. 派遣期間: 平成 31年 4月 1日 ~ 令和 2年 3月 22日

4. 受入機関名及び部局名

南カリフォルニア大学、大学院工学研究科

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)** (研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

近年急激に需要が高まった非機械式の高分解能レーザーレーダー,通称 LiDAR (Light Detection and Ranging) について研究するため,CMOS ファウンドリを利用して光電融合デバイス を研究している,米国,南カリフォルニア大学の Hashemi グループの下へ渡った.同グループに て,フォトニック結晶導波路を用いた光フェーズドアレイと周波数変調連続波 (Frequency-Modulated Continuous Wave: FMCW) 信号を発生する電気-光学フェーズロックトループ (Electro-Optical Phase-Locked Loop: EO-PLL) の研究に取り組んだ.フォトニック結晶導波路 はスローライトを生成し,スローライトが示す巨大な1次分散は,波長制御による光フェーズドア レイのビーム偏向範囲を拡大する.本研究ではこれを用いて,広い偏向範囲をもつ光フェーズドア レイアンテナの開発を目指した.また,FMCW 方式のLiDAR において高い測長精度を得るためには,時間に対して周波数が線形に推移する周波数変調 (以下,線形チャープと呼ぶ)が必要である.し かし,一般にレーザーの周波数変調特性は非線形性をもつので,EO-PLL を用いたフィードバック 制御によりこれを補償することで線形性の高い FMCW 信号の生成を目指した.

まず,利用する CMOS ファウンドリでフォトニック結晶導波路を狙い通りに製作できるかどうか を確かめるために,円孔の大きさと位置精度の制御性を確認するテストパターンを実際に製作し た.結果,円孔の形に多少の歪みが見られたが,位置精度には問題がないことがわかった.これと 同時に,線形な FMCW 信号を生成するための EO-PLL の開発に取り組んだ.

光の FMCW 信号を生成する方法には、外部変調器を用いて周波数変調する方法と、レーザーの発

振周波数を直接変調する方法がある.外部変調器方式は光信号の損失が比較的大きいこととチャ ープの線形性がそれほど高くないこと、また、周波数変調した高周波信号を用意する必要があると いったデメリットがある.一方、直接変調方式は、チャープの線形性が悪いが、光信号の損失が小 さいメリットがある.また、レーザーの発振周波数は注入電流量に対して短調増加、もしくは単調 減少するので、変調信号も三角波や鋸歯状の波のような単純な波形でよい.以上の性質から、直接 変調方式ではチャープの非線形性の補償が重要な課題となるが、その補償方法はフィードフォワ ード制御とフィードバック制御に大別される.フィードフォワード制御では非線形性を補償する ような変調信号を事前に形成する必要があり、同じ設計のレーザーであっても製作誤差の影響で 個体ごとに補償関数を求めなければならない.また、補償するのは発振周波数だけで、位相には関 知しないのでレーザーのコヒーレンスは改善されない.一方、フィードバック制御は、同じ設計の レーザーであれば個体差に関係なく非線形性を補償できる利点がある.さらに、本研究で採用する E0-PLLを用いたフィードバック制御ではレーザーの位相を制御するので、チャープの線形性の向 上に加えてレーザーのコヒーレンスも向上できる利点をもち、LiDAR 用の FMCW 変調器として非常 に有用である.

EO-PLL は CW レーザーダイオード (LD), 非対称マッハツェンダー干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer: MZI), フォトダイオード (PD), トランスインピーダンスアンプ (TIA), ダウン コンバージョン用ミキサ,局部発振器,積分器,電流ドライバから構成される.レーザーの発振周 波数は注入電流におおよそ比例するので、LD の注入電流を連続的に増加, または減少させること で周波数を掃引する.このとき,後段の非対象 MZI の出力では,連続的周波数掃引と MZI の両径路 の遅延差に応じた周波数差によるうなりが発生する.これを PD に通すとうなりのみが出力される. 周波数チャープが線形のとき、うなりは単調の正弦波となるが、LD はチャープの非線形性をもつ ので、実際にはうなりの正弦波は歪み、様々なノイズも乗る. PD の後段のミキサは位相比較器と して働き,うなり信号と局部発振信号の位相と周波数のずれを誤差信号として出力する. 誤差信号 は積分器と電流ドライバを介して LD に帰還する.以上のフィードバック回路の安定条件は誤差信 号が一定値に落ち着くことであり、これは、うなり信号が一定の位相オフセットをもって局部発振 信号を追従することと同義である、したがって、局部発振器に単調の正弦波を用いれば、線形チャ ープを生成させるように LD にフィードバックをかけることができる.本年度は EO-PLL を用いた 線形チャープの生成を確認するために、市販の LD と PD,ファイバ光学系で構成した MZI,プリン ト基板上に集積したその他の電子回路を用いてテスト用 EO-PLL の評価系の試作し、その動作実証 に取り組んだ.

まず,市販のLDとPDを用いてEO-PLLが位相同期を得られるように,設計自由度が高い電子回 路部分の設計条件を解析した.解析には回路シミュレーションソフト Cadence Virtuosoを用いた. 一般的な PLL で用いられる位相周波数比較器やパッシブミキサでうなり信号を単純にダウンコン バートすると,アップコンバージョン成分と高調波発生成分が発生し,これらは FMCW 信号にとっ てノイズとなる.これらの成分は低域通過フィルタで除去するのが定石であるが,これは同時にル ープ帯域を低下させる要因となる.そこで本研究では,片側波帯ミキシングを用いてアップコンバ ージョン成分を除去した.さらに,ミキサの代わりにアナログ積算器を用いることで高調波発生成 分を抑制した.これによりループ帯域を広げることができ,応答速度の向上と位相ノイズの低減が 期待できる.シミュレーションにより位相同期を得られる条件を確認した後,テスト用 EO-PLL の 評価系を試作した.電子回路はオペアンプやアナログ積分器などのディスクリート部品でプリン ト基板上に構成した.

次に、構築したテスト用 EO-PLL を用いて線形チャープ生成の実験に取り組んだ. 局部発振器の 周波数 f₁₀を136 kHz, MZI の遅延差 τ を15 ns として、f₁₀/τ で決まる周波数変化速度を9 GHz/ms に設定した. 周波数掃引の周期は1.1 ms とし、結果、周波数掃引幅は10 GHz を得られる. レーザ ーの出力は約 70 mW で、そのほとんどは測長に用いられ、約 0.07 mW のみが EO-PLL に分配される. はじめに、EO-PLL を用いずに単純に LD への注入電流を線形増加させて周波数変調したところ、LD のチャープの非線形性が非常に強く、PD から出力されるうなり信号のスペクトルに明確なピーク は見られなかった. 次に EO-PLL を閉ループにしたところ、うなり信号のスペクトルに明確なピーク は見られなかった. 次に EO-PLL を閉ループにしたところ、うなり信号のスペクトルは f₁₀ と同じ 136 kHz に鋭いピークを示した. この実験結果は EO-PLL の位相同期が得られ、線形チャープが生 成されていることを示している. スペクトルピークの幅はチャープの線形性を表し、測定された半 値全幅は約 170 Hz と非常に狭く、線形性の高いチャープが得られた. また、片側波帯ミキシング 構成とアナログ積算器の採用により、うなり受信スペクトルのサイドピーク比を-30 dB 以下に抑 えることに成功し、品質の高い FMCW 信号を生成できた. その後、テスト用 EO-PLL により生成され た線形な FMCW 信号を用いて測長実験を行った. ここでは測長する経路も光ファイバで構成し、そ の長さを FMCW 信号で測った. ファイバの長さを変えると受信信号のスペクトルピークもそれに合 わせてシフトすることを確認し、線形チャープのおかげで高い確度でファイバ長を測定できた.

上記の実験で EO-PLL の基本動作を実証できたが,いくつかの課題が浮き彫りになった.まず, テスト用 EO-PLL には分布帰還型 (DFB) 半導体レーザーを用いたが,熱光学効果による周波数チ ューニングの応答が遅く、周波数掃引の周期を1.1 msと長く設定しなければならなかった. LiDAR において,例えば解像度 10,000 ピクセルをフレームレート 20 fps で取得する場合,各ピクセルで の周波数掃引時間は5 μs未満にする必要があり,本研究のFMCW変調器では応答速度が足りない. よって、例えば自由キャリア効果による高速な周波数チューニングが可能なレーザーを用いる必 要がある.また,E0-PLL により LD の位相をフィードバック制御しているにもかかわらず,LD のコ ヒーレンスがほとんど改善されていないことも後の実験でわかった.この原因を突き止めるため, 私は EO-PLL のノイズ特性を解析した.まず、ノイズの主要因となりうる、LD がもともともってい る位相ノイズ, PD と TIA のノイズ, 局部発振器のノイズ, プリント基板上のオペアンプのノイズ を測定した.次に,EO-PLL の小信号回路モデルからノイズ伝達関数を求め,これらのノイズがフ ィードバック制御後の LD の位相ノイズにどの程度影響しているかを計算した.計算の結果,LD が もともともつ位相ノイズが支配的であることがわかった.フィードバック制御後のLDの位相ノイ ズを遅延自己ヘテロダイン法で測定したところ、計算で得られた位相ノイズとよく一致しており、 LD がもともともつ位相ノイズが支配的であることは妥当であると確認された. EO-PLL はループ帯 域幅以内において LD のもともとの位相ノイズを抑制することができる.しかし,今回試作した EO-PLL のループ帯域幅は約100 kHz と、LD のレーザー線幅1 MHz より狭いために、LD の位相ノイズ を十分に抑制できなかった.本 EO-PLL のループ帯域幅は DFB レーザーの応答に制限されており,

レーザーのコヒーレンスの改善のためにも、高速な周波数チューニングが可能なレーザーを用い る必要があることがわかった.一方で、ループ帯域幅を広げるとPDとTIAのノイズや、オペアン プのノイズが位相ノイズに乗りやすくなってしまうこともわかった.よって、将来的にEO-PLLを CMOS チップ上に集積するときは、これらが低ノイズで動作するように設計することが重要になる. また、LD のもともとの位相ノイズとPD とTIAのノイズ、それ以外の電子回路のノイズ、すべてを バランスよく抑制できるようにループ帯域幅を調整する必要がある.これらすべてのノイズを抑 制すると、フィードバック制御によってLD の線幅は局部発振器の線幅に近づけられる.一般に高 周波の局部発振器の線幅は非常に細いので、LD のコヒーレンスは大幅に向上し、FMCW 信号の信号 対ノイズ比の改善に貢献すると期待される.以上の成果は米国国際会議 Conference on Laser and Electro-Optics 2020 にて発表予定である.

本年度はフォトニック結晶導波路の製作可能性も確認したが,主にFMCW 変調における線形チャ ープを生成するための EO-PLL の解析と設計に取り組んだ.テスト用デバイスを製作し,実験でそ の基本動作を確認した.これを実用レベルの FMCW LiDAR に用いるためには周波数チューニングの 応答が速い LD を用いる必要があることがわかった.FMCW LiDAR の構成要素には他に,光フェーズ ドアレイ,位相変調器,受光器などがあるが,光フェーズドアレイはビームの角度解像度や放射パ ターン,放射効率,受信効率などを決める要素なので,特に勢力的に研究されている.しかし, Hashemi グループでの研究を通して,FMCW 変調器も測長精度や深さ分解能,ひいては最大測長距離 を決める信号対ノイズ比を改善する重要要素であることを学ぶことができた.今後のオンチップ LiDAR の開発の際には,光フェーズドアレイだけでなく,今回の研究で得た知見を活用して高性能 な FMCW 変調器を開発し,世界にアピールしていきたい.