

FMCW ライダ: 自動運転車の選択肢

ジェフ・ヘクト

周波数変調コヒーレントライダは、コンピュータが自動車を動かすために必要なデータをより多く集めることを約束する。課題は、コストダウンと性能改善である。

自律走行車開発の初期に、設計エンジニアは、905nmで出力するパルスライダシステムを選択した。テスト車両に組み込むために、そのようなシステムが市販入手可能だったからである。しかし、今日の905nmパルスライダには機械的走査の高コスト、太陽光や他の光源からの干渉、ライダの範囲を60～100mに制限するアイセーフティ出力制限といった重大な制約がある。網膜に安全な1550nm帯に移行することで、パルスは200～300mの範囲に十分な出力になる。また固体スキャニングの進歩でコストが低減するはずである。飛行時間(ToF)パルスレーザは、

業界の主流であるが、それでもやはり、それらは真の自律走行車実現のための厳しい要件を満たせない。

現在、コヒーレントライダが自動車アプリケーション向けの競争に参入しつつある。主要アプローチは、周波数変調連続波(FMCW)ライダ、これは一部の自動車で安全付属品として現在、使用されている安価なFMCWコヒーレントマイクロ波レーダーの光版である。連続波動作は、現在、パルスレーザの範囲を制限している高ピーク出力の眼の危険を回避する。コヒーレント検出は、直接検出よりもはるかに高感度であり、性能は向上する。性能向上

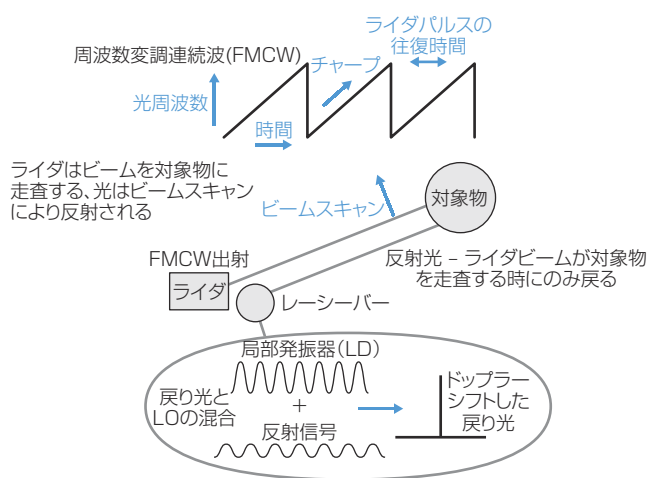
には、シングルパルス速度計測、太陽光や他の自動車が使用するライダを含む他の光源に対する耐性などが含まれる。とはいえ、FMCWは深刻な課題に直面している。

パルスとコヒーレントライダ

パルスライダは、単純なToF測距システムである。そのシステムは、放出短パルスと反射光の受信との間の時間を記録することで距離を測定する。また、その過程で、反射光の角度を計測することで対象物の位置を計測する。しかし、ライダでの速度計測は、マルチパルスの放出が必要であり、パルス間の距離の変化をパルス間の間隔で割る必要がある。動く車輛が多い環境でその時間が加わる。

コヒーレントライダは、対象物からの反射戻り光とコヒーレントレーザ送信器からの光を混合することで対象物を見つける。対象物がライダの方へ、あるいはライダから遠くへ動くとき帰還信号がドップラーシフトする。したがって、それを局部発振と混合し、一度の観測で見通し線上の速度を直接計測する。パルスレーザと同様、帰還信号の角度は、送信器からの対象物の方向を計測する。ライダ戻り光と出力信号との混合で生成される中間周波数を解析することで対象物の距離を計測し、それを方向および速度と統合すると、速度ともに3次元的位置が得られる。「コヒーレント検出により、一層の信号処理を

図1 FMCWライダの出射レーザビームは、反復的に周波数チャープしている(上方)、各スキャンは、レーザ光が対象物まで往復するのに必要な時間よりも短い(中央)。連続ビームは、視界全体をスキャンし、一部がレーザに戻り、レーザ送信器からの光と混合する。下部の差込図に見られるとおりである。



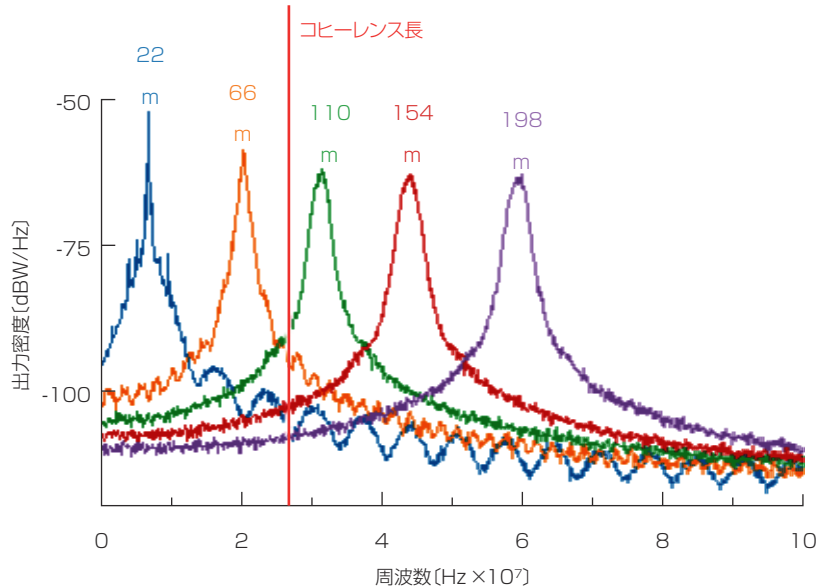


図2 ライダのコヒーレンス長以内で対象物から反射されたFMCWライダ光は、コヒーレンスレシーバに鋭いピークを生み出すが、コヒーレンス長を超えたところからの対象物は広がり、丸みを帯びたローレンツ(Lorentzian)ピークになる。(提供：テファン・キム氏、カリフォルニア大バークリー校)

すると、さらに興味深いことができるようになる」と米ブラックモア社(Blackmore)の共同創始者・CTO、ステファン・クラウチ氏(Stephen Crouch)は話している。

FMCWライダは、連続レーザビームの繰り返し直線チャープ周波数によって距離を測定する(図1)。一般に、チャープは、光が対象物に届くのかかる時間よりも長い時間で増加し、次に対象物をスキャンするときに、そのビームを反射する。戻り光が局部発振器(LO)と混合するとき、コヒーレントディテクタがその信号を混合し、差周波数を計測する。これにより、反射光が対象物との間で往復している間に周波数がどの程度変わったかが分かる。その間隔とチャープ速度とを乗じると、距離が出る。さらなる処理によりドップラーシフトを抽出し、ライダに対する対象物の速度を得る。これは、自律走行車が、周囲を動き回る他の車輛の認識を維持するために重要である。

単独処理にとってコヒーレントディテクションの大きな利点は、それが、局部発振器信号とコヒーレントな光だ

けを増幅することである、と米インサイトライダ社(Insight LiDAR)の事業開発副社長、グレッグ・スモカ氏(Greg Smolka)は言う。「ディテクタは、ライダビームとの干渉に戻る正確な一致を待ち受けている」と同氏は指摘する。その相互干渉光が、増幅されるものである。LOに一致しない光は検出されないため、太陽光、人工光、あるいは他の自動車のライダからのノイズを阻止することになる。それに対して、パルスライダはインコヒーレント(非干渉)光を選別して除外することがないので、戻り光と干渉する。

既存のFMCWライダは、100m程度のコヒーレンス長に限定されている。つまり、その範囲は50m程度に制限される。これは深刻な制約である。60～100mの現在のパルスライダは、遅いペースで動き回る都市部のロボタクシー(robotaxi)には十分である。しかし、ハイウェイ速度で走る自動車は、衝突回避に間に合うように止まるには200～300mの範囲を必要とする。

その限界を克服するための取り組みは行われている。1つのオプションは、

最先端の信号処理である。米カリフォルニア大バークリー校のテファン・キム氏(Taehwan Kim)によると、それはFMCWライダの範囲を10倍拡大するかもしれない。コヒーレントライダリターンは、レーザのコヒーレンス長以内の対象物に対しては鋭いピークを生成するが、それを超えるとローレンツ形状に広がる(図2)。そのようなライダリターンを従来の高速フーリエ変換で処理すると精度と感度が劣化するが、キム氏の報告によると、ローレンツ最小二乗フィッティングで、それらを処理することでコヒーレンス長を超えても改善が得られる。目標は、FMCWライダ範囲をハイウェイの速度で使えるように拡大することである。

フォトリック集積

FMCWシステムについてのもう1つの懸念は、ToFパルスライダに比べての高コストと複雑さである。「さまざまな意味で、FMCWライダは難しい。レーザ光源への要求も厳しい」とスモカ氏は言う。インサイトライダ社は、2年半の間、FMCWライダのフォトリック集積に取り

組んできた。これに含まれるのは、掃引レーザ光源、オンチップ増幅と10%の反射性で対象物の測距が少なくとも200mが可能になるディテクタである。

同社は、高速走行のロボット車輛が溢れた状況で求められる性能を執拗に追いつめている。「200mで何かが見えるというのでは十分でない。それが何であるか、気にならなければならないものであるかどうかを同定するだけのピクセルをそれに搭載する必要がある」と同氏は言う。そのためには、速軸で固体スキャンを、遅軸では機械的スキャンを利用し、歩行者など関心のある遠視野の対象の高解像度スキャンができるようにする。

光フェーズドアレイは、集積フォトニクスで利用できる固体スキャンへのもう1つのアプローチである。レーザ光が導波路を通して、アレイの出力端から出たビームを成形し、方向を変える際に光フェーズドアレイがレーザ光を位相変調する。FMCW ライダで光

フェーズドアレイを作るために集積シリコンフォトニクスを利用する最初の報告は、2017年クリストファ・プルトン氏(Christopher Poulton)をリーダーとする米マサチューセッツ工科大のチームから発表された。チームは、光フェーズドアレイをエッジチップでオンチップ・バランスドディテクタに追加した。送信光と受信光の両方がレンズレスチップスケールFMCW ライダとなることが目的である。チームは、シリコン導波路伝搬に1550nm レーザ光源を選択し、その周波数に最初は上昇、次に下降する周波数で直線的にチャープをかけた。報告によると、ステアリング光は $46^{\circ} \times 36^{\circ}$ の範囲であるが、その距離はわずか2mに限られており、その分解能は低かった。それ以来、他の研究者が、より優れた集積ライダの成果と、より長い距離を報告している。

米SiLCテクノロジーズ社(SiLC Technologies)のCEO、メハディ・アスハリ氏(Mehdi Asghari)によると、光フェー

ズドアレイは、魅力的である。実質的にサイドローブがなく、単一のオプティクスで送受信できるからである。同氏は、シリコンフォトニクスで20年の豊富な経験を持つ。同氏によると、狭線幅レーザと低雑音レシーバで、フェーズドアレイライダは、自動運転車に必要な200~300mの距離に到達可能である。1550nmで発光するInP利得チップとゲルマニウムデバイスを、外部キャビティを持つシリコンチップに加えることで、「非常に高価で複雑なレーザを打ち負かす」と同氏は付け加えている。

SiLC社の設計は、最終的に距離500mのアイセーフライダを提供できる、と同氏は言う。4mW レーザですでに100m届いており、50mWでは到達距離200mが可能であると同社は考えている。そのライダのシングルレーザコアは、当然ながらほとんどの短距離車輛アプリケーションに十分である。また、コアを増やすと、到達距離はさらに延びる。マルチコアライダなら、多様な波長のレーザを使って、計測している物が何であるかを同定できる。同社の計画では、独自のライダを作るよりも、センサやプロセッサをライダメーカーに販売する。

ブラックモア社は、平面フェーズドアレイチップで米サンディア国立研究所と提携した。チップは、1550nm レーザからの光をウエハ平面の導波路で分割し、次に操作可能な光ビームを作るためにその光を上に向ける(図3)。クラウチ氏は、それを「クレジットカードから優れた平行ビームが出る」と言う。同氏によると、1550nm動作の大きな利点は、光通信用に開発された高度で高効率のコンポーネントが利用できることである。

低いパワーレベルでの動作は、将来

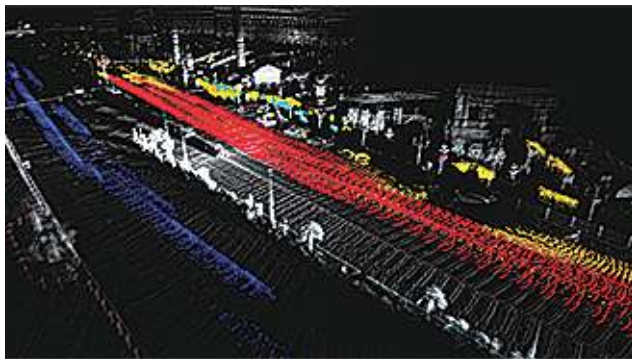
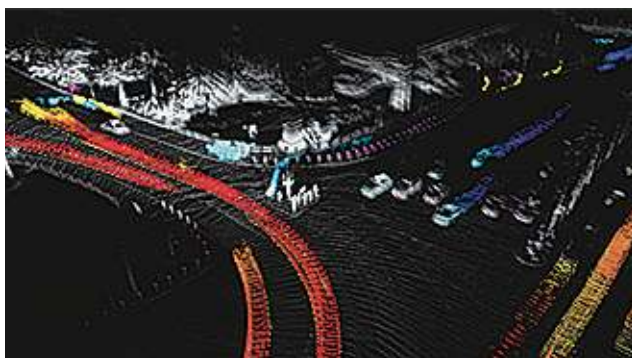


図3 この2つの画像でブラックモア社が開発したライダシステムは、アプローチ(青)から後退(赤)、さらに静止(白)のカラースペクトルで瞬間速度を示している。累積データの数秒が歩行者とトラフィックパターンを明らかにしている。(提供:ブラックモア社)



の集積フォトニクスにとって重要である。「小さなチップに大きなパワーが入るとは考えたくない」と同氏は言う。ビームパワーレベルを100mW以下に保つことでチップサイズのFMCWライダが実現可能になる。

展望

FMWDMライダ技術は進歩しているが、まだ課題はある。「現在、光フェーズドアレイで200mに眼を向けていると言うつもりはない」とクラウチ氏は言う。同氏によると、フェーズドアレイは、数年先には出るが、自動車アプリケーションの将来については楽観的だ。さらに、「長いゲームは、ライダのコストを下げることだ」と同氏は付

け加えている。

とはいえ、FMCWライダは、自律走行車向けとしては複雑すぎ、コストがかかりすぎだと懸念するものもある。ToFとコヒーレントライダとの間には多くのトレードオフがある、とImecのウマル・ピラチャ氏(Umar Piracha)は指摘する。Imecは、ベルギーの国際R&Dとイノベーションハブであり、両タイプに取り組んでいる。「FMCWは、かすかな帰還信号と基準発振器とを混合することでさらに追加の利得が得られ、レシーバが一段と高感度になる。遠くの黒い自動車の反射からわずかの量のパワーが得られるなら、コヒーレントディテクションは、その信号を増幅して、それを見分けることができる」

と同氏は言う。そうすると、パルスライダに必要な、高価なアバランシェフォトダイオード(APD)、シリコンフォトマルチプライヤの代わりに、1ドルのp-i-nシリコンディテクタを使うことにより、コスト削減になる。

しかし、ピラチャ氏は、FMCWライダは「優れた偏波制御と非常に長いコヒレンス長のチューナブルレーザを必要とする」と付け加えている。スペックルノイズによる感度低下、全般的なシステムの複雑さによる高コストを同氏は警告している。「真の問題は、自動運転車にそれをいかに適用し、使いやすくするかである。ToFシステムは簡素であるため、全般的に関心は高いが、答えは、あまり明らかになっていない」。

LFWJ

THE FUTURE DEPENDS ON OPTICS™

NEW

ガウシアン反射率ミラー

- レーザーキャビティ内で基本モードの反射率を調整
- 中央4mmの開口に対してガウシアンな反射特性
- 15%から35%までの中心反射率



エドモンド・オブティクス・ジャパン株式会社

〒113-0021 東京都文京区本駒込2-29-24

パシフィックスクエア千石 4F

TEL: 03-3944-6210 E-mail: sales@edmundoptics.jp

EO Edmund
optics | japan

詳しい情報はこちらへ:

www.edmundoptics.jp/079-8150