光ファイバー増幅器を用いた小型センサヘッドレーザレーダの開発

井上　大介，松原　弘幸，市川　正，毛　雪松，前田　光俊，長嶋　千恵，各務　学
（株）豊田中央研究所
Daisuke Inoue, Hiroyuki Matsubara, Tadashi Ichikawa, Xueson Mao, Mitsutoshi Maeda, Chie Nagashima, Manabu Kagami
Toyota Central R&D Labs. Inc.

Abstract

We developed a LIDAR system with a sensor head as small as 22 cc, in spite of the inclusion of a scanning mechanism. This LIDAR system not only has a small body, but is also highly sensitive.

Our LIDAR system is based on time-of-flight measurements, and it incorporates an optical fiber. The main feature of our system is the utilization of optical amplifiers for both the transmitter and the receiver, and the optical amplifiers enabled us to exceed the detection limit of thermal noise. In conventional LIDAR systems the detection limit is determined by thermal noise, because the avalanche photo-diodes (APD) and trans-impedance amplifiers (TIA) that they use detect the received signals directly. In the case of our LIDAR system, received signal is amplified by an optical fiber amplifier in front of the photo diode and the TIA. Therefore, our LIDAR system can boost the signal level before the weak incoming signal is depleted by thermal noise. There are conditions under which the noise figure for the combination of an optical fiber amplifier and a photo diode is superior to the noise figure for an avalanche photo diode.

We optimized the gain of the optical fiber amplifier and TIA in our LIDAR system such that it is capable of detecting a single photon. As a result, the detection limit of our LIDAR system is determined by shot noise.

This small and highly sensitive measurement technology shows great potential for use in LIDAR with an optical preamplifier.

1. 背景

レーザレーダでは雨霧などの悪天候下でも測定レンジを確保することが望まれている。測定速度も必要とされるため、時間をかけて測定感度を上げる方法が使えないことが問題を難しくする。感度を上げるためには受光開口径を大きくすることが考えられるが、受光開口径を大きくすると付随するミラーなどの光学部品も大きくなる。車内の電装品はすでに高密度に配置されていることや、デザインの観点からも小型のレーザレーダが求められている。われわれの目的は小型で高感度なレーザレーダを開発することである。

2. 動作原理

車載用のレーザレーダの場合、半導体レーザが光源として、フォトダイオードが受光器として使われる。パルスレーザ光を外部に放射し、測定対象に当たって戻ってくる光を受光し、時間を測定することで距離を測定する方式が用いられる。感度を低下させる雑音の原因として、太陽などによる背景光雑音や、光検出器の暗電流、増幅器の熱雑音などがある。半導体とフォトダイオードから構成されるレーザレーダの場合、熱雑音が測定限界を決める原因となる。

これに対し、われわれは熱雑音が光電流を電圧に変換する過程で発生することに注目し、受信光が光の状態で増幅を行うことで熱雑音の検出限界を超える光プリアンプ型の距離測定装置を開発した。ここで光ファイバー増幅器と開口径の小さなレンズを用いると、受光光量が小さくなるため、受光光量の低下と光増幅器の増幅率のどちらが勝るかが議論のポイントになる。

我々は光プリアンプ型レーザレーダの SN 比をシミュレーションした。投光ピークパワー3000W, レンズ開口 2mm、100m 先でのスポット径 0.5m とした場合の信号強度と等価雑音の計算結果を図 1 に示す。光増幅器は利得 30dB 雑音指数 5dB とした。開口径を小さくすることで信号強度が小さくなるが、光プリアンプの高い利得で不足を補い、さらに熱雑音を上回ることができることがわかる。本測定法の測定限界はショット雑音で決定されることがわかる。また、開口径が小さいため背景光雑音がショット雑音と比べても小さいことがわかる。

半導体レーザとアバランシェフォトダイオード(APD)で構成したレーザレーダと光プリアンプレーザレーダの SN の距離依存性の比較を図 2 に示す。APD を使用したレーザレーダとしてはピークパワー70W、APD 利得 30 倍、開口径 30mm とした。利得ターゲットとしては理想的なランバーシアン拡散の 10%の反射率とした。受光面積を 200 分の 1 以下にしながらも感度を向上できることがわかる。

3. 装置構成

試作したレーザレーダ装置の全体写真を図 3(a)に、センサヘッドの拡大写真を図 3(b)に示す。センサヘッドは 22cc と小さい。本体は A4PC サイズであるが更なる小型化ができる余裕がある。

送信光学系と受信光学系の構成を図 4 に示す。分布帰還型半導体レーザで発生したピークパワー2mW パルス幅 2.5ns のパルス光を 1 段の光増幅器でピークパワー3000W に増幅した。光増幅器は出力のとれる双方向励起とし、効率を改善するため中間にアイソレータとバンドパスフィルタを挿入した。このような簡単な構成で容易にピークパワーを大きくできるのは光ファイバー型増幅器の特長である。受光された光は低雑音光ファイバー増幅器によって増幅した。雑音を低減するため中間にアイソレータを挿入した[4]。増幅器は波長 1550nm で増幅率 50dB、雑音指数 6dB であった。増幅した受信光はバンドパスフィルタを通過したあと、PIN フォトダイオードによって光―電流変換される。トランスインピーダンスアンプは帯域 600MHz、等価雑音電流 5(pA/$\sqrt{Hz}$)のものを使用した。増幅率やトランスインピーダンスゲインについては最適化の余地があると考えてい

る。

4. 結果

200m 先に設置したターゲットからの反射光を測定した結果を図 5 に示す。内部反射光の影響で 0m の位置にも強いピークが見られる。

投光と受光は同一のレンズで行う完全同軸光学系とし小型化を図った。投受光はサーキュレータで分離される。走査光学系は直径 6mm、共振周波数 100Hz、走査光学角度 40°のミラーを使って試作した。

5. まとめ

光プリアンプを用いることで熱雑音の測定限界を超えるような距離測定法を開発した。パルス光をプローブとして飛行時間を計測することで距離を測るレーザレーダとしては、本研究のような光のプリアンプを使用した測定方法は世界初である。この技術によりこれまでにない小型のセンサヘッドをもつレーザレーダを開発した。低コスト化で作成などの課題は残っているものの、指先ほどの大きさのセンサヘッドによってこれまでにないレーザレーダの新しい応用分野が切り開かれると期待している。

【参考文献】

[1] D. Inoue, et. al, SPIE Defense, Security, Sensing, [8037-9], 2011

[2] 井上、他、応用物理学会学術講演会、2009

[3] 井上、他、応用物理学会学術講演会、2010

[4] J. of Lightwave Tech, pp1344, VOL.11, NO.8, 1993

[5] 今城、他、第 44 回光波センシング技術研究会講演論文集, p41, 2009

[6] 井上、他、第 47 回光波センシング技術研究会講演論文集, p183, 2011

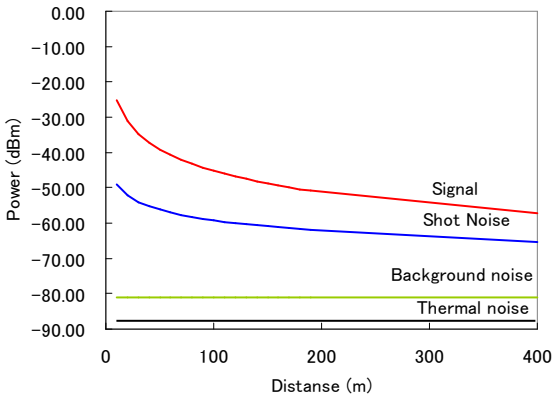


図 1 ：光ファイバー増幅器を用いたレーザレーダの信号および等価雑音の距離依存性

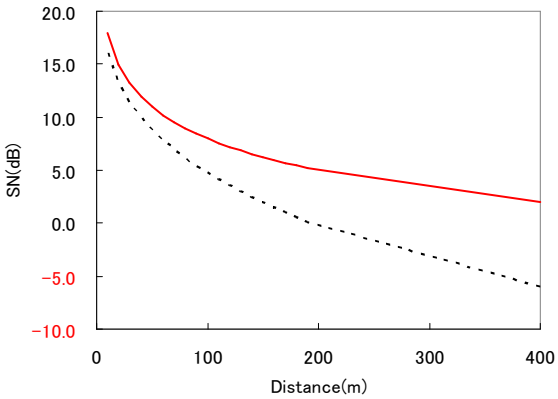
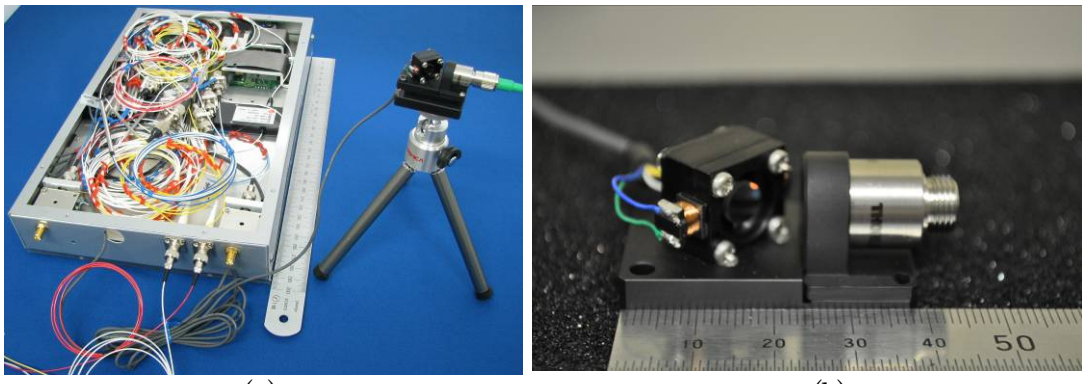
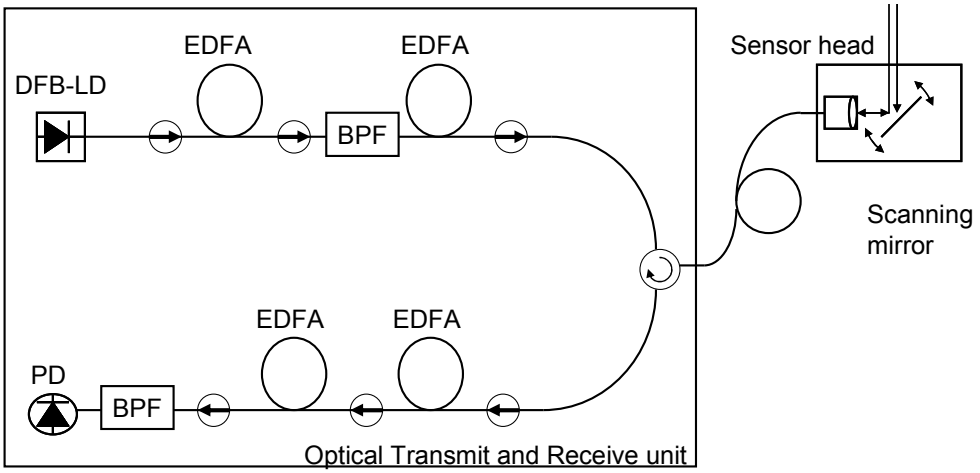


図 2：光ファイバー増幅器を用いたレーザレーダと半導体レーザと APD のみのレーザレーダの感度比較



(a) (b)

図 3：試作したレーザレーダの写真(a)全体図、(b)センサヘッドの拡大図



PD: Photo diode
BPF: Band pass filter
EDFA: Erbium doped fiber amplifier
DFB-LD: Distributed feedback laser diode

図 4：試作したレーザレーダの光学系

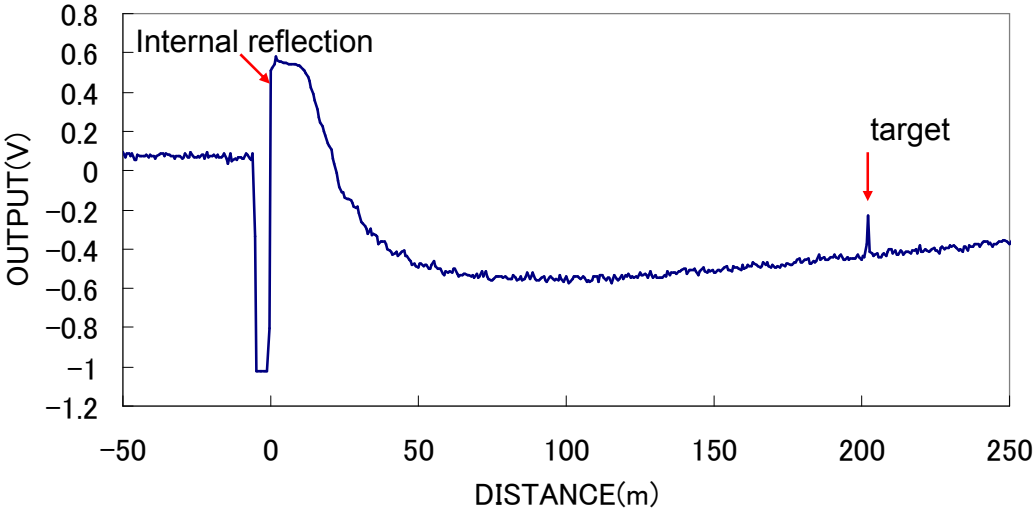


図 5：試作したレーザレーダによるターゲットの測定結果