

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04437

研究課題名(和文) ドップラーLIDARのためのガイガーモードAPDを用いた高感度検出器の研究

研究課題名(英文) A study of high sensitivity detector using Geiger mode APD for Doppler LIDAR

研究代表者

水野 貴秀 (Mizuno, Takahide)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：50270442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フォトンカウンティングが可能な高感度検出器Si-PMをドップラーLIDARに適用して高感度化をはかる手法を提案し、実験により実証した。私たちは、Si-PM検出器からの出力がフォトイベントの発生頻度が入力レベルと比例することに着目し、通常はPDが使用される連続波のドップラー周波数測定に対してSi-PM検出器を適用する方法を提案しました。実験では、直動システムを使用して0.3～0.8 m/sの等速直線運動を行うプリズムからのドップラー周波数をフォトイベントの発生頻度から測定することに成功し、当初の目的を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、通常はPD等が用いられる連続波を使用したドップラーLIDAR (Light Detection And Ranging) の検出器に、高感度なガイガーモードAPDを適用することによって、受信感度を2～3桁程度高めることである。複数のガイガーモードAPDをアレイ化して1素子にした高感度なフォトンカウンティングデバイス(Si-PM)の適用によって受信感度の改善をはかり、測距限界の延伸あるいは送信光源の省電力化が実現できる。現在、LIDARは自動車、ドローンなどの自動自律運転に重要なセンサーとされている中で、その実装に寄与する本研究は社会インフラの発展への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a method to improve the sensitivity of Doppler LIDAR by applying the Si-PM detector, which is a high-sensitivity detector capable of photo counting, to the Doppler LIDAR, and demonstrated it experimentally. Noting that the output from the Si-PM detector is proportional to the input level in terms of the frequency of photo events, we proposed a method to apply the Si-PM detector to continuous wave Doppler frequency measurements, for which a PD is usually used. In experiments, the original objective was successfully achieved by measuring the Doppler frequency from a prism with a constant velocity linear motion of 0.3 to 0.8 m/s using a linear motion system, based on the frequency of photo events.

研究分野：計測工学

キーワード：LIDAR ドップラーLIDAR ガイガーモード

1. 研究開始当初の背景

レーダによる速度の測定には反射波のドップラー周波数を測定する手法が用いられ、送信する電波の周波数が高いほどドップラー周波数も高くなり、速度測定精度も良くなる。送信波に光を使用すると、光は電波に比べて周波数が4~5桁高いため、ドップラー周波数も4~5桁高い周波数を得ることができる。たとえば数GHzの電波では数Hzのドップラー周波数しか得られない場合でも、可視・近赤外光では数百kHzが得られるため、高精度測定には有利である。こうしたメリットがあるにもかかわらず、レーザ光によって速度測定を行うドップラーLIDARは(空港における風観測用など少数の例はあるが)適用例は少ない。自動車、ドローン、惑星探査機などに搭載される小型LIDARは、ほとんどが単純なパルス往復時間から距離測定をするTOF(Time Of Flight)方式かAM変調方式である。

その理由は、電波を使ったレーダでは安定した周波数の信号を送信して、微小な反射波をローノイズアンプで増幅した後に、ヘテロダイン検波で信号成分を取り出す手法が確立されているのに対し、小型のLIDARでは安定したレーザが得にくく、微小光増幅用のローノイズアンプの技術も未熟なためである。最近では周波数が不安定な安価なLD(Laser Diode)からの信号をデジタル処理技術によって解決し、ヘテロダイン検波を採用したLIDARが開発されつつある。しかし、小型で十分な測定距離をえるには、この技術に高感度な検出器の技術が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、距離測定に加えて速度測定が可能なドップラーLIDAR(Light Detection And Ranging)の検出器に、高感度なガイガーモードAPDを適用することによって、受信感度を2~3桁程度高めることである。通常のガイガーモードAPDでは入射光量に対する線形性が保たれないが、近年複数のガイガーモードAPDをアレイ化して1素子にしたSiPM(Silicon Photomultipliers)技術によって、フォトンカウンティングが可能になっている。このSiPMを使った検出器をドップラーLIDARに適用することによって受信感度の改善をはかり、測距限界の延伸あるいは送信光源の省電力化が実現できる。

3. 研究の方法

ドップラー周波数を測定するために、送信光の一部と受信光を干渉計に入れて干渉縞(「うなり」)を測定する。干渉計の検出器にガイガーモードAPD(SiPM)を使用した場合、図1に示すように連続的な光量の変化に応じてフォトイベント(p.e.)と呼ばれる波高と頻度に変化するパルス状の電圧出力が得られる。したがって、「うなり」をあらゆる干渉縞の明暗をフォトイベント発生頻度と波高値として測定しており、この出力から「うなり」の周波数を測定する方法を確立する必要がある。

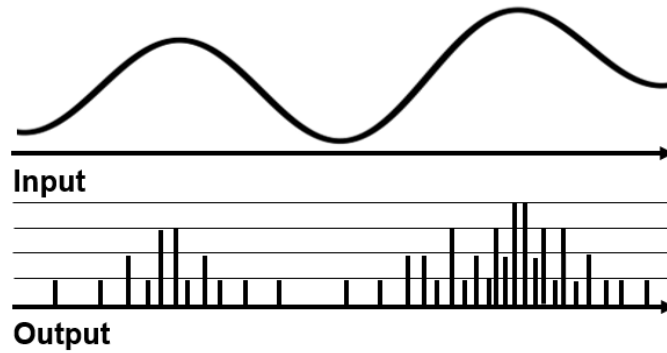


図1 光入力とガイガーモード APD からの出力電圧波形

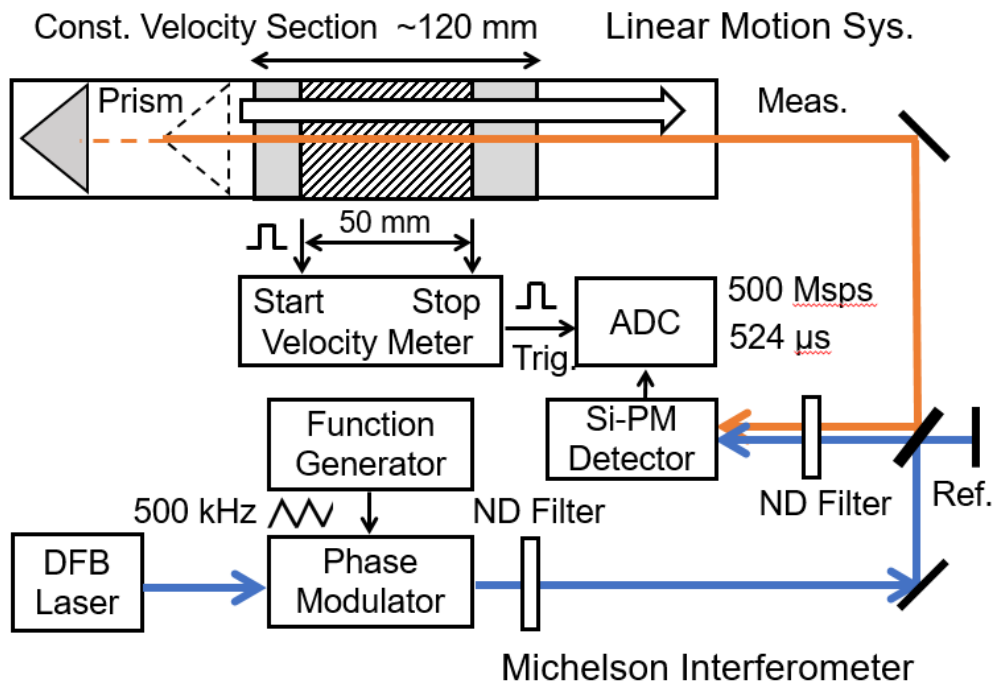


図2 ガイガーモード APD (SiPM)を検出器に適用したマイケルソン干渉計

本研究では、波長 780nm の DFB レーザを使用して図 2 に示す干渉計を構成し、「うなり」をガイガーモード APD で測定、「うなり」の周波数を測定する方法を確立し、等速運動をするターゲットを使って速度測定を実証し、ガイガーモード APD がドップラー LIDAR の検出器として利用できることを示す。

4. 研究成果

(1) ガイガーモード APD による干渉縞の測定と解析手法

図 2 に示した、干渉計からの出力波形を図 3 に示す。ガイガーモード APD (SiPM) からの出力は、発生フォトイベントに応じた頻度でパルスが出力されていることがわかる。本研究では、この波形を帯域制限したフィルタに通してアナログ化して解析する手法、特定時間 ($1\mu\text{s}$ など) 内に発生するフォトイベント数を評価する手法、設定した閾値で 2 値化して評価する手法を検討し、閾値を 0.5 p.e. (1 mV) に設定して回路ノイズと分離して 2 値化する手法が最適であることを見いだした。図 2 に示した出力波形を 2 値化してフォトイベント発生レートの変化を FFT 解析することにより、図 3 のようにフォトイベント発生レートの変化「うなり」が得られる。

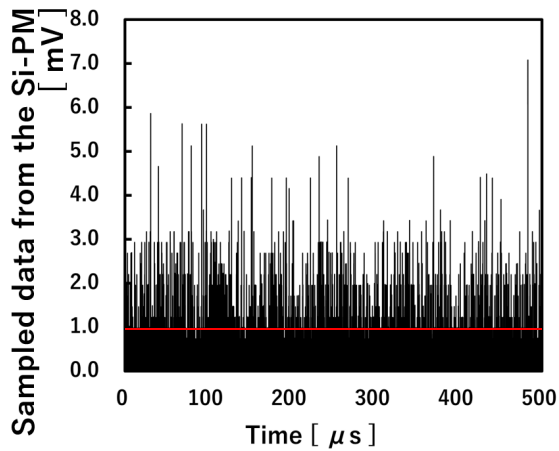


図3 ガイガーモード APD からの出力波形

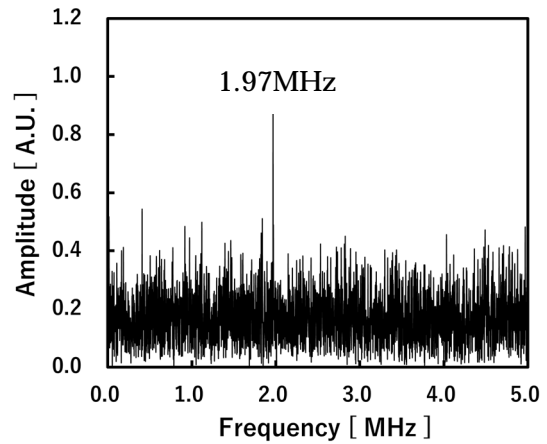


図4 解析から得られたドップラー周波数

(2) 等速運動をするターゲットからのドップラー周波数の測定

実際に等速運動をするターゲットからのドップラー周波数を測定するため、図2に示す干渉計を構成した。0.8m/s で等速運動をするプリズムからの反射光を干渉計で測定することにより得られた出力波形が図3,これを解析した結果が図4である。レーザ波長780nmを使用して0.8m/sで等速運動をする物体を測定した場合の理論値は2.0MHzであり,測定結果1.97MHzは3%の誤差で一致している。

プリズムの速度を0.3~1.0 m/sの範囲で変えて,ドップラー周波数測定結果を評価した結果が図5である。この結果から,0.3~0.8 m/sの範囲でドップラー周波数の理論値と測定値(直線)が一致している。ただし,実験装置の問題で0.8 m/s以上は速度検出器の精度が不十分なため,評価の対象としていない。

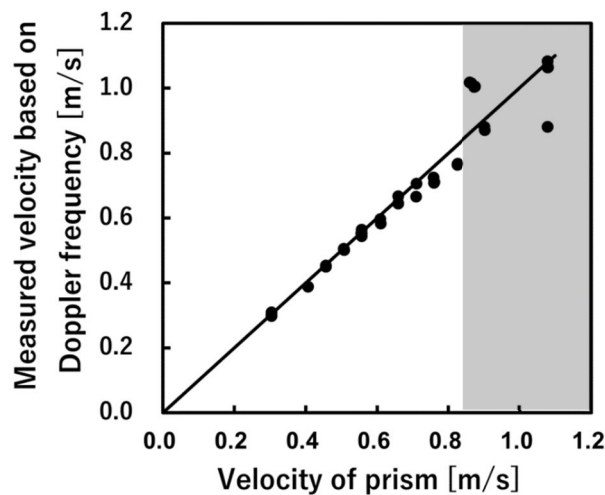


図5 プリズム速度と測定されたドップラー周波数

(3) 結論

本研究では,フォトンカウンティングが可能な高感度検出器 SiPM をドップラーLIDAR に適用して高感度化をはかる手法を提案し,実験により実証した。私たちは, SiPM 検出器からの出力がフォトイベントの発生頻度が入力レベルと比例することに着目し,通常は PD が使用される連続波のドップラー周波数測定に対して SiPM 検出器を適用する方法を提案しました。実験では,直動システムを使用して0.3~0.8 m/sの等速直線運動を行うプリズムからのドップラー周波数をフォトイベントの発生頻度から測定することに成功し,当初の目的を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yusuke AONUMA, Takahide MIZUNO, Makoto TANAKA
2. 発表標題 Application of a Silicon Photomultiplier Detector in Doppler LIDAR
3. 学会等名 International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 常盤大地、水野貴秀、田中真
2. 発表標題 ドップラLIDARへのSi-PM検出器の適用に関する研究
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 常盤大地、水野貴秀、田中真
2. 発表標題 ドップラLIDARのためのSi-PM検出器による光変調周波数検出に関する実験
3. 学会等名 第22回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 常盤大地、水野貴秀、田中真
2. 発表標題 ドップラLIDARへのSi-PM検出器の適用に関する研究
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 常盤大地、水野貴秀
2. 発表標題 ドップラーLIDARへのSi-PM検出器の適用に関する研究
3. 学会等名 第21回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>受賞 本研究成果を、International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2022にて指導学生が発表し、Encouragement Awardの表彰を受けた。</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------