

辰巳 賢二、今井 正、川村 恭明

Kenji TATSUMI, Tadashi IMAI, and Yasuaki KAWAMURA

宇宙開発事業団 技術研究本部

National Space Development Agency of Japan, Office of Research & Development

Abstract

This paper reports the characteristics of 1 μ m lidar signal using Si-APD single photon-counting module. We performed the atmospheric observation by the lidar. Experimental results show that the distribution of received photo-electron signal from the atmosphere is a near Poisson's distribution, and signal to noise ratio increases proportional to the square root of accumulation.

1.まえがき

単一光子計数検出法 (Single Photon-Counting Method) はライダー信号の検出に広く用いられているが、光電変換素子としては光電子増倍管が今までは主であった。最近、量子効率の高い Si-APD を用いたフォトンカウンティングモジュール^{1,2)} が用いられるようになってきた。しかし、感度が最大となる波長 0.5 μ m 帯³⁾での使用が一般的であり、1 μ m 帯での使用はほとんどなかった。ここでは、1 μ m 帯のライダーに Si-APD フォトンカウンティングモジュールを用いて大気観測を行い、得られたライダー信号の特性について解析を行ったので報告する。

2.実験装置構成

実験に用いたライダーの構成を Fig.1 に示す。レーザ発振器は、LD 励起 Q スイッチ Nd:YAG レーザである。発振波長は 1063nm、出力は 28mJ、パルス幅は 30ns、パルス繰り返しは 30pps、送信光の広がり角は 0.5mrad である。受信望遠鏡の口径は 300mm、視野角は 0.7mrad である。また、送受光軸の間隔は 880mm である。光検出器には EG&G 社製の Si-APD フォトンカウンティングモジュール (型名: SPCM-AQ-212) を用いた。検出確率は、波長 1063nm で 1%、ダークカウントは 500c/s である。また、リニアリティは 10%@1Mc/s である。データ取り込みゲート幅は

500ns で、高度分解能は 75m である。

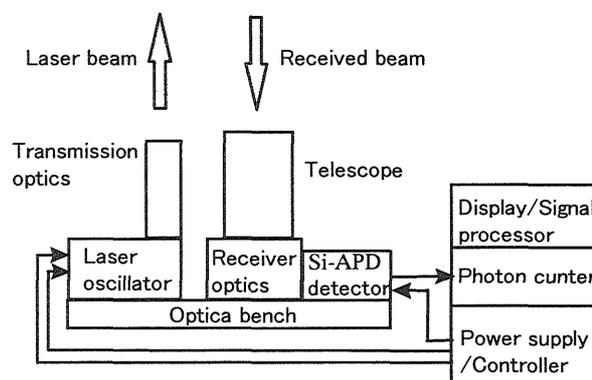


Fig.1 The schematic of lidar.

実験は 1997 年 11 月 7 日 17:30~19:00 に行った。天候は快晴で、西風が強く地上付近にもエアロゾル等はほとんど無かった。観測データより、実験の前後で、大気の状態は変化していないことが分かった。1 回積算の計測を 100 回、100 回積算の計測を 100 回行いデータを取得した。

3.信号対雑音比(S/N)の計算

ライダーにおける受信光データは、1 計測において各ゲート時間に対応した M 個の時系列データとして取得され、同条件の計測を N 回繰り返すことにより、要素数 MxN 個のデータセットが得られる。

各ゲート時間 (高度に対応) に対する S/N は一連の同条件計測データセット (時間 i を固定) よ

り求められる信号の平均値 $\overline{n_i^s}$, 計測の標準偏差 σ_i を用いて次式で計算される。

$$(S/N)_i \equiv \overline{n_i^s} / \sigma_i \quad (1)$$

ここで、APD を用いた PC 計測を考える。あるゲート時間に対する入射光の確率分布は、良く知られているように、Poisson 分布する。平均値を m とすると分散 σ_x^2 と標準偏差 σ_x は、

$$\sigma_x^2 = m, \quad \sigma_x = \sqrt{m} \quad (2)$$

となる。すなわち平均値と分散値は等しい。ライダー計測の場合、入射光 n_{ij} は観測対象である雲、エアロゾル、空気分子からの信号光 n_{ij}^s 、地表・雲等による背景光 n_{ij}^b 及びダークカウント n_{ij}^d で構成され、それらの線形結合で表される。すなわち、

$$n_{ij} = n_{ij}^s + n_{ij}^b + n_{ij}^d \quad (3)$$

である。したがって分散値 σ_i^2 は $\sigma_i^2 = \overline{n_i}$ であり、結局、S/N は次式となる。

$$S/N = \overline{n_i^s} / \sqrt{\overline{n_i}} \quad (4)$$

一方、この式の分子 $\overline{n_i^s}$ は $\overline{n_i} = \overline{n_i^s} + \overline{n_i^B}$ 、 $\overline{n_i^B} = \overline{n_i^b} + \overline{n_i^d}$ であるので、 $\overline{n_i^s} = \overline{n_i} - \overline{n_i^B}$ で計算出来る。背景光雑音とダークカウントは時間に依らず、その平均値が一定とすると、計測データセットより $n_{ij}^s \ll n_{ij}^B$ となる時間ゲートでのデータを取り出してデータセットを作り、その平均値を求めればよい。したがって、S/N は

$$S/N = \left(\overline{n_i} - \overline{n_i^B} \right) / \sqrt{\overline{n_i}} \quad (5)$$

となる。

加算回数を K とすると、平均値は K 倍されるので

$$S/N = \sqrt{K} \cdot \left(\overline{n_i} - \overline{n_i^B} \right) / \sqrt{\overline{n_i}} \quad (6)$$

となる。

4. 実験結果

Fig.2 に、観測データより求めた平均値/分散値の値と高度の関係を示す。図中、黒が加算回数 $K=100$ 回、灰色は $K=1$ のときを示す。高度 2.5km 以上では、いずれも平均値/分散値の値はほぼ 1 で、一定で有ることが分かる。すなわち、受信光子の分布は Poisson 分布であることがわかる。高度 2.5km 以下では送受光軸にパララックス

があるので、その影響が出ている。

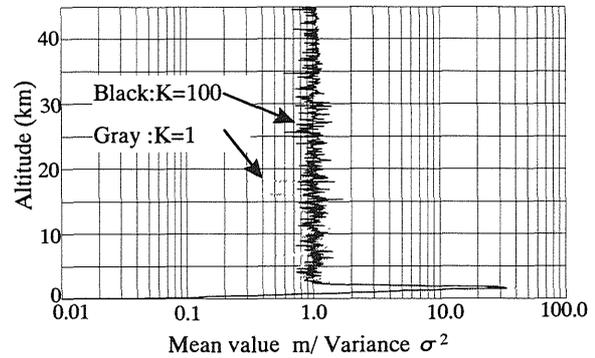


Fig.2 Relation between m/σ^2 and altitude.

Fig.3 は、各高度における加算回数と S/N の関係を示したものである。図中実線は、加算回数 1 のときの S/N を基準とし、S/N は加算回数の平方根に比例するとしたときの計算値である。計測データを基に最小 2 乗近似を行った直線と良く一致する。

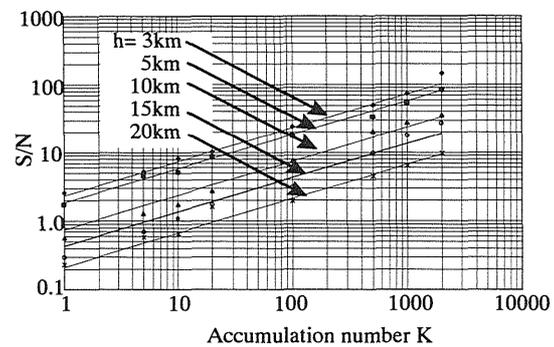


Fig.3 S/N vs. accumulation number.

5. むすび

Si-APD フォトンカウンティングモジュールを用いた $1 \mu m$ 帯のライダー信号の特性について報告した。受信光子分布はポアソン分布しており、S/N は加算回数の平方根に比例して増加することが分かった。

参考文献

- 1) X.Sun et al.:IEEE,J.of Light Tech.,(1992)1023
- 2) H.Dautet: Appl.Opt.(1993)3894
- 3) J.D.Spinhirne:IEEE,Trans.on Geosci.&remote sen.(1993)48