シリコンアバランシェフォトダイオード フォトンカウンティングモジュールを用いた 1 μ m帯ライダー信号の特性

辰巳 賢二, 今井 正

宇宙開発事業団 技術研究本部 (〒 305-0047 茨城県つくば市千現 2-1-1)

Characteristics of Lidar Signal Using Silicon Avalanche Photodiode Single Photon-Counting Module

Kenji TATSUMI and Tadashi IMAI

Office of Research and Development, National Space Development Agency of Japan
2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047

(Received July 30, 1998)

This paper reports the characteristics of 1 μ m lidar signal using Silicon Avalanche Photodiode (Si-APD) single photon-counting module. The transmitter of the lidar is a laser diode pumped Q-switched Nd:YAG laser with the wavelength of 1064 nm. The beam divergence is 0.5 mrad. The diameter of the receiver telescope is 300 mm and the field of view is 0.7 mrad. The receiver employs a photon-counting-solid state Geiger mode Si-APD module whose model number is SPCM-AQ-212 which was made by EG&G, Canada. The atmospheric observations were performed using the lidar at Tsukuba Space Center in November 7, 1997. It was very clear day and there was not a speck of cloud in the sky. 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.

Key Words: Lidar, Single photon-counting, Si-avalanche photodiode, Laser diode pumped Q-switched Nd:YAG laser

1. まえがき

地球温暖化に代表される気候変動の将来予測を精度良く行う上で、海洋の影響とともに最も不確実な雲の振る舞いを明らかにすることが求められている。特に、雲の3次元分布構造、及び上層の薄い雲の分布については、放射収支との関係からその実体の解明が求められている。ライダーを衛星に搭載することにより、巻雲・エアロゾル・水蒸気量及び風などの地球環境をグローバルに観測することが可能になる。この目的のため、日本では宇宙開発事業団がライダー実証衛星計画¹⁾を進めており、米国ではNASAがGLAS (Geoscience Laser Altimeter System)²⁾でエアロゾル、雲の観測を行う計画を立てている。これらのライダーでは、光信号検出にシリコンアバランシェフォトダイオード (Si-APD) が用いられることになっている。

一方、ライダー信号の検出法として、単一光子計数検出法 (Single Photon-Counting Method) が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流であった。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^{3,4)}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⁵⁾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。ライダー実証衛星では、1 μ m帯の光信号検出にSi-APDを用いたフォトンカウンティングを用いることが計画¹⁾されており、受信信号の基本特性の把握が必要である。

本論文では、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結果について報告している。

2. 信号対雑音比 (S/N) の計算

ライダー方程式は良く知られているように、次式で書ける⁶⁾。

$$n_s(z) = \frac{E_0 \cdot T_T \cdot T_R \cdot Y \cdot A_R \cdot \Delta z \cdot T^2(z) \cdot \beta(z)}{z^2} \cdot \frac{\eta \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (1)$$

$$T(z) = \exp \left\{ - \int_0^z \alpha(z') dz' \right\} \quad (2)$$

ここで、 $N_s(z)$:ゲート時間内の受信光電子数、 η :量子効率、 A_R :受信開口面積、 c :光速、 $T(z)$:大気透過率、 z :観測対象の高度、 $\beta(z)$:体積後方散乱係数、 $\alpha(z)$:消散係数、 E_0 :レーザー出力エネルギー、 h :プランク定数、 λ :レーザー発振波長、 Δz :垂直分解能、 Y :受信視野内に占める送信エネルギー割合、 T_T :送信光学系効率、 T_R :受信光学系効率である。

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M×N個のデータセットが得られる。Fig.1に取得データセットの関係を示す。横軸は測定回数で、縦軸は高度に相当した時間である。i回目の測定における、時間(高度)jにおける測定値を n_{ij} とする。測定値 n_{ij} は加算回数に依存している。

各ゲート時間(高度に対応)に対するS/Nは定義より、一連の同条件計測データセット(時間jを固定)より求められる信号の平均値 $\bar{n}_j^s$ 、計測の標準偏差 σ_j を用いて次式で計算される。

$$(S/N)_j \equiv \bar{n}_j^s / \sigma_j$$

$$\bar{n}_j^s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_{ij}^s, \quad \bar{n}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_{ij}$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_{ij} - \bar{n}_j)^2 = \bar{n}_j^2 - \bar{n}_j^2 \quad (3)$$

ここで、APDを用いたフォトンカウンティング計測を考える。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⁷⁾。平均値を m 、変数を $x=0, 1, 2, \dots$ とすると、確率密度関数は次式で表せる。

$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad (4)$$

また、分散 σ_x^2 と標準偏差 σ_x は、それぞれ

$$\sigma_x^2 = m, \quad \sigma_x = \sqrt{m} \quad (5)$$

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、

$$n_{ij} = n_{ij}^s + n_{ij}^b + n_{ij}^d \quad (6)$$

Fig.1 Data set obtained through measurements.

である。したがって分散値 σ_j^2 は $\sigma_j^2 = \bar{n}_j$ であり、結局S/Nは次式となる。

$$S/N = \bar{n}_j^s / \sqrt{\bar{n}_j} \quad (7)$$

一方、この式の分子 $\bar{n}_j^s$ は、 $\bar{n}_j = \bar{n}_j^s + \bar{n}_j^b$ 、 $\bar{n}_j^b = \bar{n}_j^b + \bar{n}_j^d$ であるので、 $\bar{n}_j^s = \bar{n}_j - \bar{n}_j^b$ 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、

$$S/N = (\bar{n}_j - \bar{n}^b) / \sqrt{\bar{n}_j} \quad (8)$$

となる。

加算回数をKとすると、各測定における取得データは独立であり、平均値、分散はそれぞれK倍されるので、

$$S/N = \sqrt{K} \cdot (\bar{n}_j - \bar{n}^b) / \sqrt{\bar{n}_j} \quad (9)$$

となる。

3. 実験装置構成

実験に用いたライダーの構成をFig.2に示す。また、実験装置の仕様値をTable 1に示す。レーザー発振器は、LD励起QスイッチNd:YAGレーザーである。発振波長は1064nm、出力は最大100mJ、パルス幅は30ns、パルス繰り返しは30ppsである。送信望遠鏡を出たところでの送信光の出力は実測値で28mJ、ビーム拡がり角は0.5mradである。

受信望遠鏡の口径は300mm、視野角は0.7mradである。背景光雑音を除去するため、帯域幅2nmの干渉フィルタを光路中に挿入している。光検出器のリニアリティを確保するため、NDフィルタにより光検出器への入射光レベルを調整した。NDフィルタの透過率は、±5%以下で校正されている。また、受信光学系の透過率は、各構成素子の透過率または反射率を積分球などを用いて分光測定し、その積より算出している。各構成素子の測定精度は±10%以下である。なお、送受光軸の間隔は880mmである。このように、送受光軸間にパララックスがあるので、受信視野内に送信ビーム光がすべて入る高度は2.5km以上である。高度2.5km以下の受信信号には、受信視野と送信ビーム広がりとのオーバーラップ関数Yを考慮しなければならない。

光検出器にはEG&G社製のSi-APDフォトンカウンティ

Fig.2 The schematic of the lidar.

Table 1 The specifications of the lidar

Items		Specifications
Transmitter	Laser	LD pumped Q-switched Nd:YAG laser
	Wavelength	1064 nm
	Laser output energy	100 mJ (Maximum)
	Transmitted energy	28 mJ
	Pulse repetition rate	30 pps
	Pulse width	30 ns
	Beam divergence	0.5 mrad
Receiver	Diameter of telescope	300 mm ^φ
	Transmission	Variable using Nd filter
	Field of view	0.7 mrad
	Band width of filter	2 nm
Detector	Parallax	880 mm
	Detection method	Si-APD Single Photon-Counting
	Model number	EG & G: SPCM-AQ-212
	Detection probability	1.0 % @ 1064 nm
	Dark counts	500 c/s
Vertical resolution		75 m (Gate time 500 ns)

ングモジュール(型名:SPCM-AQ-212)を用いた。Si-APD受光部の物理的口径は、0.5mm^φで、有効口径は0.45mm^φである。波長1064nmでの検出確率は、測定の結果、1.0%±0.1%であった。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。以上の各構成素子の測定結果から、レーザー出力、受信系透過率や受信検出確率などを合わせた装置パラメータ総合の測定精度を見積もると、平均二乗誤差の和の平方根で考えて±20%程度である。

データ取り込みゲート幅を500nsとして、実験を行った。このゲート幅は高度分解能75mに相当する。

4. 実験結果

実験場所は宇宙開発事業団筑波宇宙センター内で、計測は1997年11月7日17:30～19:00に行った。この日の天候は快晴で、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。レーザー光は地上より天空に向かってほぼ鉛直方向に射出した。実験前後における観測データをFig.3に示す。データ加算回数は、10,000回で、S/Nは100程度である。実験前の計測時刻は17:25JST、実験後は19:10JSTである。この観測データより、高度8km付近で若干変化が見られるが、それ以外の高度では、実験の前後で大気の状態はほとんど変化していないことが分かる。すなわち、実験データは同一条件での観測データと見なすことが出来る。

Fig.4は、大気による散乱が空気分子のみによるとしたときの計算値を実測値に重ねて図示したものである。体積後方散乱係数 β の算出に当たって、空気分子数密度の高度分布は、米国標準大気モデル⁸⁾を用い、空気分子によるレーリー散乱の単位分子当たりの断面積は文献⁹⁾による値を用いた。消散係数 α と体積後方散乱係数 β との比を表す散乱パラメータ S の値は高度によらず一定で、 $S=8\pi/3$ を用いた。Fig.4において、計算値と測定値との差異は、高度5km～30kmで±20%程度である。高度5km以上では計算値と実測値は、ほぼ一致しているのが分かる。すなわち、この日

Fig.3 Received photoelectron number before and after experiments. Time is 17:25 JST before experiment and 19:10 after experiment.

Fig.4 Calculated and experimental received photoelectron number.

の大気はエアロゾルなどが無く、良く澄んでいたことが分かる。

S/N、及び受信光電子数分布を算定するため、加算回数1回の計測を100回、加算回数100回の計測を100回行い実験データを取得した。

加算回数を変化させたときの受信光電子数と高度との関係をFig.5に示す。図中、加算回数5、10及び20のデータは1回加算のデータセットよりランダムに抽出したデータセットを用いてそれぞれ5、10、20の加算処理を行いデータとしたものである。加算回数500、1,000および2,000のデータは100回加算のデータセットより同上の処理を行ったものである。1回加算ではS/Nは良く計測出来ないが、加算回数が増えるにしたがって、高高度までS/Nは良く計測出来ることが分かる。また、受信光電子数は加算回数に比例して増加しているのが分かる。

Fig.6に、受信光電子の確率分布を示す。(a)は加算回数が $K=1$ 回の場合で、高度5.025kmのデータである。図中、実線は平均値 $m=2.92$ としたときのPoisson分布の確率分布式をもちいて計算した結果であり、ほぼ一致しているのが分かる。(b)は加算回数を $K=100$ 回とした場合で、同じく高度5.025kmのデータである。この場合には、平均値314.8のPoisson分布になっているのが分かる。また、平均値が大きいため、分布形状はほぼ正規分布になっている。

計測データより求めた平均値/分散値の値と高度の関係

Fig.5 Received photoelectron number as accumulation number changed.

Fig.6 Received photoelectron distribution (a) In case of the accumulation number of 1. (b) In case of the accumulation number of 100. The distribution function is nearly Gaussian, because of the large input photoelectron.

をFig.7に示す。図中、黒が加算回数 $K = 100$ 回するとき、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、一定であることが分かる。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.8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 $K = 1$ 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。

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 $1\mu\text{m}$ 帯のライダー信号の特性について報告した。大気観測

Fig.7 Relation of m/σ^2 vs. altitude. The data below the altitude of 2.5km is invalid because of parallax between transmitter optical axis and receiver optical axis.

Fig.8 Relation of the accumulation number and signal to noise ratio. S/N increases proportional with square root of accumulation number K .

により得られたライダー信号の受信光電子分布は、Poisson 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。

今後は、 $1\mu\text{m}$ 帯と $0.5\mu\text{m}$ 帯での計測を同時に行い、ライダー信号の分布形状の差異の有無について検討する予定である。

参考文献

- 1) K. Tatsumi, T. Imai, Y. Kawamura, N. Tanioka, T. Aoyagi, and T. Takada: *Proc. of the 1st work shop on Mission Demonstration Satellite Lidar*, 1998 (Earth Science & Technology Organization, 1998) p.16.
- 2) J. D. Spinhirne and S. P. Palm: *Advances in Atmospheric Remote Sensing with Lidar*, A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux, and U. Wandinger (Eds) (Springer-Verlag, 1996) p.213.
- 3) H. Dautet, P. Deschamps, B. Dion, A. D. MacGregor, D. MacSween, R. J. McIntyre, C. Trotter, and P. P. Webb: *Appl. Opt.* **32** (1993) 3894.
- 4) X. Sun and F. M. Davidson: *J. of Lightwave Tech.* **10** (1992) 1023.
- 5) J. D. Spinhirne: *Trans. on Geoscience and Remote Sensing* **31** (1993) 48.
- 6) R. M. Measures: *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications*. (KRIEGER PUBLISHING COMPANY, MALABAR, FLORIDA, 1992) p.237.
- 7) 花村 栄一: 量子光学(岩波講座 現代の物理学8, 岩波書店, 1992) p.72.
- 8) U. S. *Standard Atmosphere*, 1976 (U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1976)
- 9) A. Bucholtz: *Appl. Opt.* **34** (1995) 2765.