

技術報告

大気境界層の観測を目的とする目に安全なライダーの設計

杉本 伸夫・松井 一郎

国立環境研究所 〒305 つくば市小野川 16-2

(1992年1月16日受付, 1992年2月3日受理)

Design of Eye-Safe Lidar for Measuring the Atmospheric Boundary Layer Using Low-Power LD-Pumped Nd: YLF Laser

Nobuo SUGIMOTO and Ichiro MATSUI

The National Institute for Environmental Studies, 16-2, Onogawa, Tsukuba, 305

(Received January 16, 1992; Accepted February 3, 1992)

Performance and eye-safety of a lidar using a low-power high-repetition LD-pumped Nd: YLF laser at 1.047 microns was evaluated by a simulation. The eye-safety criterion can be satisfied if the laser output is shut off immediately for more than 1 second when the strong returns from obstacles such as airplanes are detected in the lidar signals. A compact and maintenance-free eye-safe lidar system for atmospheric boundary layer measurements can be constructed by using this method.

1. はじめに

都市域の高濃度の大气汚染の出現に深く関係する大気境界層構造の観測にライダーが非常に有効である¹⁻⁴⁾。大気境界層の構造に関する情報は、大気汚染現象の監視や予測に役立つと考えられ、ライダーによる定常的な観測が望まれている。このような観測を目的とするライダーシステムでは、取扱いや維持の容易さが重要であるだけでなく、目に対する安全性に万全の配慮が必要である。

目に対して安全なライダーシステムの設計におけるひとつの方法は、安全性の高い $1.4\ \mu\text{m}$ より長い波長を用いることである。例えば、光源に $2\ \mu\text{m}$ 付近で発振する Ho レーザーを用いる方法⁵⁾や、Nd: YAG レーザーをラマンシフターで $1.4\ \mu\text{m}$ に変換する方法⁶⁾である。しかしながら、現在のところ、これらのレーザーは取扱いや維持が容易とはいえず、またこれらの波長領域でライダーに利用できる良好な検出器を得ることが困難であるという大きな問題がある。

本文では安全性の高いライダーを設計するもうひとつの方法を提案する。この方法では、パルスエネルギーが

小さく高速繰返しの半導体レーザー (LD) 励起 Q スイッチ Nd: YLF レーザー ($1.047\ \mu\text{m}$) あるいは Nd: YAG レーザー ($1.064\ \mu\text{m}$) を用いる。現在、平均出力数ワットの LD 励起 YLF あるいは YAG レーザーが既に市販されている。また、この波長では検出器として低雑音でダイナミックレンジの大きい光電子増倍管を用いることができる。本研究では、目に安全なレーザーのエネルギーの検討とそのときのライダーの信号対雑音比 (SNR) の評価を行った。この結果、障害物からの散乱光を検出して直ちにレーザーを遮断する安全装置を用いれば、目に安全でかつ十分な性能を持つライダーを設計できることが示された。

2. レーザー波長の選定

レーザーの安全性に関する国際電子標準会議 (IEC) で定められた安全基準を **Table 1** に掲げる⁷⁾。この基準は ANSI (アメリカ規格協会) による規格⁸⁾に従ったものでこれと同等である。これによると Q スイッチ Nd: YLF レーザーの波長、 $1.047\ \mu\text{m}$ 、パルス幅 $10\ \text{ns}$ におけるビーム内観察の最大許容露光量 (MPE) は繰返し数 $1\ \text{Hz}$ のレーザーの場合、 $2.5 \times 10^{-2}\ \text{J/m}^2$ 、すなわ

Table 1 Maximum permissible exposure (MPE) for pulsed laser.

Wavelength λ (nm)	MPE (J/m ²) (for pulse width: $t = 10^{-9}$ - 10^{-7})
200-302.5	30
302.5-315	$10^{0.2(\lambda-295)}$ $t > 10^{0.8(\lambda-215)} \times 10^{-15}$ $5.6 \times 10^3 t^{0.25}$ $t < 10^{0.8(\lambda-215)} \times 10^{-15}$
315-400	$5.6 \times 10^3 t^{0.25}$
400-700	5×10^{-3}
700-1,050	$5 \times 10^{(\lambda-700)/500} \times 10^{-3}$
1,050-1,400	5×10^{-2}
1,400-10 ⁶	100

ち $2.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ である。繰返し数が N の場合の MPE はこれを $N^{1/2}$ で割った値となる。一方、 $1.4 \mu\text{m}$ では、MPE が 4,000 倍高くなる。したがって、この点のみを考えれば長波長のレーザーが格段に有利であることがわかる。

しかしながら、前節でも述べたとおり LD 励起 YLF あるいは YAG レーザーの技術が確立されているのに対して、 $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 領域のレーザーは現在のところ手軽に利用できるものではない。さらに、 $1.4 \mu\text{m}$ 以上の波長領域の直接検波方式のライダーに利用できる良好な検出器を得ることが困難である。ライダーでは高速の検出器が必要であるため、光起電力型や光伝導型の検出器では負荷抵抗による大きなジョンソン雑音 SNR を制限する。増幅作用を持つアバランシェフォトダイオードは高感度の検出が可能であるが、ライダーの場合は信号のダイナミックレンジが非常に大きいため、直線性などの点で取扱いがむずかしい。

一方、YLF レーザーの $1.047 \mu\text{m}$ では、量子効率は低いものの、ダイナミックレンジが大きく取扱いの容易な光電子増倍管を用いることができる。

以上のことから、次節では Nd: YLF レーザーを用いることを前提に、目に対する安全性を考慮したライダーシステムの設計を試みる。YAG ではなくて YLF を用いる理由は、光電子増倍管の量子効率がわずかながら大きいことによる。

3. 目に安全な LD 励起 Nd: YLF ライダーの設計

YLF レーザーを用いた安全なライダーを設計する上での基本的な考え方は、可能な限りレーザーのパルスエネルギーを抑え、繰返し数を上げることである。またこれと同時に、ライダーの視野内に人や航空機などの障害

物が入った場合に直ちにレーザーを遮断し、次にレーザーを射つまでに 1 秒以上の時間間隔を置くという安全装置を用いることを考える。1 秒間以上の時間間隔を置く理由は、仮にビーム内を見続ける場合にも、レーザーの繰返しが 1 Hz 以下となり、Table 1 の基準がそのまま適用できるためである。障害物はライダー信号に現れる強く鋭いスパイクを利用することで容易に検知される。この安全装置を用いる条件の下では、許容される最大レーザーエネルギーはパルス当り $2.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ となる。仮に送信ビームの口径を 10 cm とすれば送信レーザー出力は約 $200 \mu\text{J}$ となる。市販の LD 励起 Qスイッチ YLF レーザーの代表的な出力は繰返し数 10 kHz でパルス当り $200 \mu\text{J}$ 程度である。したがって、このレーザー出力で十分なライダー測定が行えるならば、これをそのまま利用することができる。繰返し数 10 kHz はライダーの最大測定距離が 15 km であることに対応するが、大気境界層の観測を目的とするライダーでは十分である。

ライダー受信信号は距離 R を関数として次式のライダー方程式で表される¹⁾。

$$P(R) = P_0 Y(R) (c\tau/2) \beta A_r R^{-2} \exp \int_0^R [-2\alpha r] dr \quad (1)$$

ここに、 P_0 はレーザー出力パワー、 $Y(R)$ は幾何学的効率あるいは視野の重なり関数である。 c は光速、 τ はレーザーパルス幅である。また、 β は大気の体積後方散乱係数、 A_r は受信望遠鏡面積、 α は消散係数である。

Table 2 System parameters for eye-safe LD-pumped YLF lidar.

Laser	LD-pumped YLF laser
Wavelength	1.047 μm
Laser output energy	200 $\mu\text{J}/\text{pulse}$
Pulse repetition rate	10 kHz
Laser beam diameter	10 cm
Laser beam divergence	0.3 mrad
Receiver optics	
Telescope diameter	35 cm
Field of view	1 mrad
Efficiency of optics	0.3
Optical bandwidth	0.01 μm
Detector	Photomultiplier
Quantum efficiency	0.0008
Data acquisition system	Transient digitizer with high speed data accumulator
Range resolution	7.5 m

大気の大気散乱および消散には大気中のエアロゾルによるミー散乱と大気分子によるレイリー散乱成分が寄与するが、大気境界層の測定ではエアロゾルによるミー散乱が支配的である。

次に、Table 2 に掲げるシステムパラメーターを用いるときの受信信号強度と信号対雑音比 (SNR) を求める。ここでは、 $1.047 \mu\text{m}$ における後方散乱係数は $\beta = 3.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ で一様と仮定する。これは、視程 10 km に相当する。また、 $\alpha/\beta = 50$ と仮定した。 $Y(R)$ は以前に報告した方法⁹⁾ により計算した。送受信光学系は同軸型とし 35 cm の受信望遠鏡の副鏡の上に 10 cm の送信望遠鏡を設置するものとした。この光学系について計算された $Y(R)$ を Fig. 1 に示す。

Fig. 2 は受信信号を距離の関数としてプロットしたものである。ここでは、雑音の評価の便利のため光電子数表示とした。距離 R における信号の光電子数 $N_s(R)$ は (1) 式の $P(R)$ より次式で計算される。

$$N_s(R) = \eta \{P(R)/h\nu\} (2L/c) \quad (2)$$

ここに、 η は検出器の量子効率、 $h\nu$ は光子のエネルギー、 L は測定の距離分解能、 c は光速である。Fig. 2 では $L = 7.5 \text{ m}$ とした。なお、Fig. 2 には背景光の光電子数も示した。昼の快晴時の天頂方向の背景光強度を

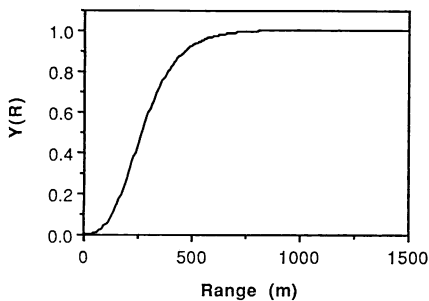


Fig. 1 Geometrical form factor for the simulated lidar system.

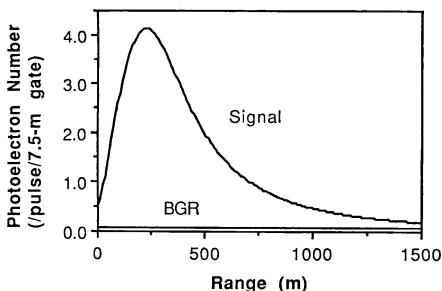


Fig. 2 Simulated received photoelectron number and background photoelectron number.

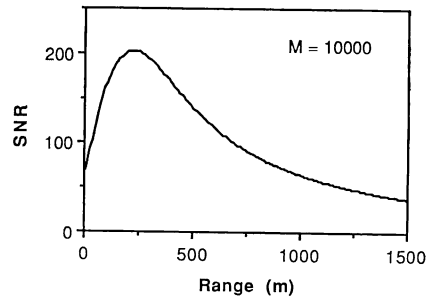


Fig. 3 Signal-to-noise ratio for 10,000-shot data accumulation.

$P_b = 2 \times 10^{-4} \text{ Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ と仮定した。背景光による光電子数は (2) 式の $P(R)$ を P_b と置き換えて計算できる。Fig. 2 より受信信号は背景光よりも十分に大きいことがわかる。

距離 R におけるライダー信号の SNR は次式で表される。

$$\text{SNR} = M^{1/2} N_s(R) / (N_s(R) + N_b + N_j^2)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 M は信号の積算回路である。分母の平方根の中の第一項と第二項はそれぞれ信号光と背景光によるショット雑音である。ショット雑音は光電子数の平方根で表される。分母の平方根中の第三項はジョンソン雑音などを表す項であるが光電子増倍管では無視できる。

Fig. 3 に SNR を距離の関数として示す。 N は 10,000 とした。レーザーの繰返しさが 10 kHz であるので測定時間は 1 秒に相当する。Fig. 3 より、距離 1.5 km まで 30 以上の SNR で測定が可能であることがわかる。大気境界層の観測では 1 分に 1 プロファイル程度のデータで十分であるので、さらに積算も可能であり非常に高い SNR が期待される。

最後に、レーザーが障害物に当たった場合に信号に現れるスパイクの大きさを評価し、これが 1 ショットのライダー信号から容易に検出できることを示す。障害物による信号強度のオーダーを見積るために、障害物の反射係数を仮に 0.3 sr^{-1} とする。エアロゾルによる反射係数は後方散乱係数に距離分解能 L を乗じたものである。 $L = 7.5 \text{ m}$ とすると、 $\beta \times L = 2.6 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$ となる。すなわち、障害物による反射はエアロゾルの約 10^4 倍である。したがって、障害物がある場合 Fig. 2 のそれぞれの距離で、エアロゾルによるライダー信号の約 10^4 倍のスパイク状の信号が現れることになる。これは、光電子数で表せば距離 1.5 km においても約 1,700 個であるので 1 ショットで確実に検出可能である。

4. おわりに

送信レーザービームが人や航空機などの障害物に当たった場合にライダー信号に現れるスパイクを検出して直ちにレーザーを遮断する安全装置を用いれば、低パルスエネルギー、高速繰返しの LD 励起 Nd:YLF レーザーを光源として目に安全で十分な性能を持つライダーを設計できることを示した。この方法を用いることにより、目に安全で信頼性が高い小型の大気境界層観測用ライダーを製作することが可能である。

文 献

- 1) R. T. H. Collis and P. B. Russel: "Lidar measurement of particles and gases," *Laser Monitoring of the Atmosphere*, ed. E. D. Hinkley (Springer-Verlag, New York, 1976).
- 2) Y. Sasano, H. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, N. Takeuchi and M. Okuda: "Diurnal variation of the atmospheric planetary boundary layer observed by a computer-controlled laser radar," *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **58** (1980) 143-148
- 3) 松井一郎, 笹野泰弘: "レーザーレーダーで観測される都市域の夜間低層大気構造と高濃度大気汚染", *環境科学会誌*, **4** (1991) 33-41.
- 4) 松井一郎: "ミ-散乱レーザーレーダーによる都市域における低層大気構造の連続観測", *光学*, **19** (1990) 438-449.
- 5) N. Sugimoto, N. Sims, K. P. Chan and D. K. Killinger: "Eye-safe 2.1- μm Ho lidar for measuring atmospheric density profiles," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 302-304.
- 6) J. D. Spinhirne, J. L. Bufton, J. F. Cavanaugh and S. Chudamani: "Global survey measurements of aerosol backscatter at 1.54 and 1.064 μm ," 15th Int. Laser Radar Conf. (Tomsk, 1990) pp. 34-35.
- 7) レーザー学会編: レーザーハンドブック (オーム社, 1982) pp. 829-833.
- 8) American National Standards Institute: ANSI Standard Z 136, 1 (1980).
- 9) 杉本伸夫, 松井一郎, 笹野泰弘: "低層大気構造観測用ライダーにおける幾何学的効率と送受信光学系の設計", *光学*, **19** (1990) 687-693.