昼夜連続観測可能なバイスタティック イメージングライダーの開発

目本 一男, 三島 英嗣, 川原 琢也, 斉藤 保典, 野村 彰夫

信州大学工学部情報工学科 (〒380 長野市若里 500)

Development of a Bistatic Imaging Lidar Capable of Daytime and Nighttime Observations

Kazuo MEKI, Hidetsugu MISHIMA, Takuya KAWAHARA

Yasunori SAITO, and Akio NOMURA

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380

(Received August 19, 1997)

We describe a bistatic imaging lidar system based on a CCD camera, which is capable of daytime and nighttime observations. For reducing the daytime background, the gated image intensifier (I.I.) was used as a high speed shutter synchronized with each laser pulse. Background signals decreased to 1/5000 with a gatetime of 20 μ s without reducing scattered laser signals. Therefore, our system was able to detect scattered laser signals with SNR of 13.3-15.7 even at daytime. The performance of the lidar system was confirmed by continuous observation through 24 hours.

Key Words: Bistatic lidar, Imaging lidar, CCD camera, Gated image intensifier

1. はじめに

1963年にFioccoとSmullinが世界初のライダー観測¹⁾を行ってから現在まで、多くの研究者によってさまざまな特長を持つライダーが開発されてきた。ライダーには送受信装置の構成方法によって区別される2つの方式があるが、これまでに開発されたライダーのほとんどはモノスタティック方式(送受信一体型)であり、もう一方のバイスタティック方式(送受信分離型)は数例しか報告されていない²⁻⁵⁾。これはバイスタティックライダーがモノスタティックライダーに比べて複雑な観測システムと観測作業を必要とするからである。バイスタティックライダーは送信装置と受信装置を離して観測を行うため装置の制御が困難であり、また、高度分解能を得るためには送・受信装置の仰角を走査する必要がある。このような理由にもかかわらずバイスタティックライダーが用いられてきたのは、モノスタティックライダーでは測定不可能な散乱の角度依存性を測定できるためである。すなわち、これまでバイスタティックライダーが用いられるのは、散乱角依存性からエアロゾルの粒径分布や屈折率を求めることを目的とする観測に限られていた⁴⁻⁶⁾。

モノスタティックライダーは優れた空間・時間分解能を備えた遠隔計測技術であり、大気物理現象の観測においていくつもの成果を挙げているが、地表面に近い部分の観測例は少ない。これはモノスタティックライダーには近

距離で視野重なりの問題があるほか、一般に長焦点の望遠鏡を用いているため近距離からのレーザー散乱光が焦点位置にある視野絞りを一部しか通過できず、透過関数は距離および入射角に依存し、近距離観測には複雑な補正を必要とするからである。これに対して、バイスタティックライダーは送受信装置の仰角を変化させることによって地表面からの観測が可能である。そこで我々は、モノスタティックライダーでは観測困難な地表付近のエアロゾルや霧、低層の雲などを観測するために、バイスタティック方式で受光装置に高感度CCDカメラを用いたバイスタティックイメージングライダーを提案し、その開発を行ってきた⁷⁾。これは大気中に送信したレーザー光の散乱飛跡をCCDカメラで撮影し、画像処理によって大気の散乱プロファイルを求める新しいタイプのライダーである。受光装置に広視野のCCDカメラを用いることによって従来のPMTを使用したバイスタティックライダーで必要だった送・受信装置の仰角走査を不要とし、容易な観測を可能にした。しかしながらこのシステムによる観測は十分な背景光除去ができなかったため背景光の少ない夜間に限られていた。そこで、本システムで昼間観測を可能とする背景光除去方法について検討を行ってきた⁸⁾。

本論文では、本システムによる昼間観測を可能とするために検討されたイメージンテンシファイア(以下I.I.)を用いた背景光除去と、昼夜連続観測で得られた降雨・降雪・雲・霧の観測結果およびそれに基づくシステムの評

価を行う。

2. バイスタティックイメージングライダーシステム

本ライダーシステムは、送信系、受信系および信号処理系から構成されている。このシステムの構成をFig.1に、仕様をTable Iに示す。送信レーザーはフラッシュランプ励起のNd:YAGレーザーで、送信波長は第二高調波の532nm、出力は20mJ/pulse(最大出力は240mJ/pulse)、繰り返しは10Hzである。大気からの散乱光は干渉フィルターを通過し、広角カメラレンズでゲート付きI.I.に結像した後、リレーレンズで再びCCDチップに結像し光电変換される。CCDカメラで得られた画像データはパーソナルコンピュータに転送され、暗電流除去・背景光除去・パワー補正・プロファイル計算等の画像処理が行われ、受信信号強度の高度プロファイルがカラーで表示される。本システムにおいて観測・データ処理の作業はすべて自動化されており、データ処理はすべてリアルタイムで行われる。画像データの積算にかかる時間は30sで(レーザーの出力が20mJ/pulseの場合)、データの転送と処理にかかる時間約30sを考慮すると、1分ごとにデータを得ることができる。

また、本システムはバイスタティック方式を採用することで観測する高度範囲や高度分解能を任意に設定することを可能にした。送・受信装置間の距離 L 、CCDカメラの仰角 α および受信視野角 FOV は観測高度の範囲と分解能を決める主なパラメータである。仰角 α を小さくすれば低い高度を、大きくすれば高い高度を観測することができる。また、一度に観測できる高度範囲は、CCDカメラの視野に入るレーザー散乱飛跡の高度範囲であり、送・受信装置間の距離 L や受信視野角 FOV により変えることができる。高度分解能は1画素あたりの視野に入る高度範囲であり、高度範囲と同様に変えることができる。

得られる受信光強度はライダー方程式より(1)式で表される⁷⁾。

$$P_r(z) = \frac{P_t K A \Delta \alpha_r}{L} T_t T_r \beta(z, \theta) \quad (1)$$

Fig.1 Block diagram of the bistatic imaging lidar system.

ここで P_r は高度 z (m)からの受信光強度(W)、 P_t は送信光強度(W)、 K は光学効率、 A は受信望遠鏡の開口面積(m^2)、 $\Delta \alpha_r$ は1画素あたりの鉛直方向の視野角(rad)、 L は送受信系間の距離(m)、 T_t 、 T_r はそれぞれ送信系から散乱体までと散乱体から受信系までの大気の透過率、 $\beta(z, \theta)$ は高度 z における散乱角 θ (deg)方向の散乱係数($m^{-1}sr^{-1}$)である。この式からわかるように受信光強度は大気の透過率および散乱係数のみに比例し、モノスタティックライダーのように距離の自乗に反比例しない。このため、本システムは信号のダイナミックレンジを大きくとることができ広い高度範囲を観測できる。ただし、これは高度分解能が高度を増すとともに低下するためであり、高い高度の観測には本システムは適していない。通常の我々が行っている観測条件、 $L=10m$ 、 $\alpha=81^\circ$ 、 $FOV=18^\circ$ では、観測可能な高度範囲は高度30.8mから無限遠、高度分解能は高度30.8mで0.064m、高度500mで15.9m、高度1000mで65.7mとなる。この他にも本システムの特長として、移動観測を考慮して小型・軽量になるように設計されていること、受光装置にCCDカメラを用いているため観測が容易であること、ゲート付きI.I.を利用した背景光除去を行い24時間連続観測が可能であることなどがあげられる。

3. ゲート付きI.I.による背景光除去

ライダーによる昼間観測において最も問題となるのは太陽放射による背景光である。一般にこの背景光の除去

Table I Specifications of the bistatic imaging lidar system.

Transmitter	
Laser	Flashlamp-pumped Nd:YAG laser Surelite-10, Continuum
Wavelength	532nm
Pulse energy	20mJ (Max. 240mJ)
Repetition rate	10pps
Receiver	
CCD camera	C3140, Hamamatsu
Imaging device	Interline CCD
CCD size	6.6mm(H) × 8.8mm(V)
Pixels	492(H) × 510(V)
Aperture efficiency	24%
Quantum efficiency	33% at 532nm
Dark current	9electrons/sec
CCD temperature	-30°C
Camera lens	Nikkor 28mm F2.8, Nikon
Diameter	14mm
Field of view (vertical)	18.0deg
Interference filter	532FS03-50, Andover
Bandwidth	3nm at 532nm
Gated image intensifier	C4723, Hamamatsu
Diameter	17.5mm
Sensitivity	40mA/W at 532nm
Gain	150
A/D resolution	12bit
Amplifier gain	5electrons/count
Read out noise	30electrons (r.m.s.)
Cooling	Electrical + air
Image processor	PC-9801DA, NEC

には、バンド幅の狭い干渉フィルター、エタロンおよびフアラデーフィルター等が用いられる。しかし、本システムのように広い受信視野角を持つシステムでは、バンド幅の狭いフィルター等を使うことはできない。そこで、ゲート付きI.I.のゲート機能を高速シャッターとして用いる背景光除去方法について検討を行った。

レーザー光の散乱はレーザーパルスを送信したときのみ生じる。これに対して背景光はレーザーとは無関係に連続的に存在している。これに注目し、本システムではゲート付きI.I.のゲート機能をレーザーパルスと同期して動作する高速シャッターとして用いることにより、背景光の除去を行った。レーザーパルスを射出していないときはゲートをoffにして背景光を遮光し、レーザーパルスを射出する瞬間から一定時間(ゲート時間)だけゲートをonにしてレーザー散乱光+背景光を露光する。この方法により背景光は露光時間に依存して減少し、昼間でもCCDカメラでレーザー散乱飛跡を撮影できる。背景光強度は露光時間に比例することから、レーザーの繰り返し10Hzでゲート時間を20 μ sにした場合、露光時間は200 μ sになり、背景光強度を200 μ s/1s = 1/5000に減少させることができる。

ゲート付きI.I.による背景光除去の性能を評価するため、晴天の昼間(14:23~14:26)にゲート時間を(a)80 μ s、(b)60 μ s、(c)40 μ s、(d)20 μ sと変化させてレーザー散乱飛跡を撮影した。この実験では、ゲート時間を長くしたときにCCDが飽和するのを防ぐため、レーザー出力を50mJ/pulse、積算時間を10s、カメラレンズの絞りを $F=4$ (通常は $F=2$)とした。また、太陽光がCCDカメラに直接入射するのを避けるため、鉛直方向に射出したレーザービームを南側から北に向かって撮影した。これらの画像をFig.2に示す。画像中央に縦に走る線がレーザー散乱飛跡である。背景光強度が偏っているのは太陽が視野の左外側にあったためであ

Fig.2 Images of laser beam trajectory obtained by the bistatic imaging lidar with gatetimes of (a) 80 μ s, (b) 60 μ s, (c) 40 μ s and (d) 20 μ s in daytime.

る。画像から求められる単位時間あたりの背景光強度をゲート時間についてプロットしたものがFig.3である。バーの上端と下端はそれぞれ背景光強度の最大値と最小値を示している。背景光強度とゲート時間の間に比例関係があること、ゲート時間を短くすることによって背景光を除去できたことがわかる。一方、Fig.2の各画像から求められるレーザー散乱光強度はどの画像でも100electrons/pixel/s程度でありゲート時間に依存していない。画像中のレーザー散乱飛跡部分の光強度がゲート時間とともに変化しているように見えるが、これは背景光強度が変化したためである。この結果から、ゲート付きI.I.のゲート機能により背景光だけを除去できることが確認できた。

また、これらの画像データのSNRは画像(a), (b), (c), (d)でそれぞれ7.2~8.8, 8.2~10.1, 9.8~11.8, 13.3~15.7となり、ゲート時間が40 μ s以下ではSNRがほぼ10以上の信号が得られた。ゲート時間をさらに短縮すればより良好なSNRが期待できるが、遠方からのレーザー散乱光がCCDカメラに到達できなくなり観測可能な最大高度が低くなってしまふ。このため、本システムでは高度2~3kmまでの低層大気が観測対象である点と上で求めたSNRからゲート幅を30 μ s(~4.5km)とした。

4. 観測結果および考察

4.1 観測結果

バイスタティックイメージングライダーの性能評価および低層気象観測を目的として、本システムによる昼夜連続観測を行った。観測は1996年2月27日から3月3日、および1997年2月24日から3月1日にそれぞれ共に長野市内の信州大学工学部キャンパスと千曲川河川敷にある千曲川リバーサイドスポーツガーデンにおいて行われた。このうち1996年2月27日14:40から28日9:10までと1997年2月27日12:00から28日12:00までの観測結果をFig.4, Fig.5に示す。観測結果は受信信号強度(CCDに蓄えられた電荷をA/D変換したカウント値)の高度プロファイルの時間変化を示したものであり、広いダイナミックレンジで信号強度を表す

Fig.3 Variation of the daytime background light intensity with the gatetime.

Fig.4 Color-scale time-height variation of the atmospheric condition such as clouds, rain and snow, obtained from 14:40 Feb. 27 to 09:10 Feb. 28, 1996.

ため対数表示とした。

1996年2月27, 28日の観測 (Fig.4) は降雨・降雪を繰り返す気象条件の中で行われた。途中、雨のため観測を一時中断したがそれ以外は続行し雲底高度の変化や雨滴・雪片からの散乱信号を得ることができた。図中の27日14:40の観測開始から18:02の一時中断までの信号が雨雲と降雨によるものであり、同日18:50の観測再開から28日04:00頃まで見られる信号が雪雲と降雪によるものである。いずれの場合も雲底高度が徐々に低くなった後、雨や雪が降り始めたことがわかる。また、雨滴による散乱は雪片の場合に比べて一桁程度弱かった。

1997年2月27, 28日の観測 (Fig.5) では霧が観測された。霧は27日夕方頃から発生し、明け方には目視による確認はできなかった。観測結果には27日17:00頃から28日03:00頃までと28日07:00頃から同日10:00頃までに高度200m以下に比較的強い散乱信号が見られるが、前者は霧、後者は朝もやによるものと考えられる。観測結果からは霧の鉛直構造が時間によって変化したようすがわかる。観測データ中に3箇所欠損があるが、これはレーザー出力の変動を補正するために用いたパワーメーターが電源の不調のために停止し、観測を中断したためである。

4.2 考察

これらの観測結果から本システムが低層大気的气象変化を非常に良くとらえていることがわかる。低層大気的气象変化は速く、これを観測するためには高い時間分解能が不可欠である。本システムは受光装置に高感度CCDカメラを用いて観測作業を簡素化し、さらに自動化したことで高い時間分解能(1分)を実現することができた。また、ゲート付きI.I.による背景光除去によって昼夜を問わず観測することが可能となり、一日の間に気温の変化が激しい日の出から午前中にかけてや日没の時間帯に観測することができた。さらにバイスタティック方式を採用したことで高度約30mからデータを得ることができた点、視程に大きな影響を与えないほどの希薄な朝もやを観測することができた点も本システムが低層大気観測に有効であることを示している。しかしながら、この観測によって本システムにおいて改善すべき点も見つかった。これらは3つ

Fig.5 Color-scale time-height variation of fog obtained from noon Feb. 27 to noon Feb. 28, 1997.

あり以下で順に述べる。

第1に画像処理による背景光除去アルゴリズムが昼間観測に対応しきれなかったことである。本システムでは干渉フィルターとゲート付きI.I.で背景光を完全に除去できないため、各高度における背景光強度を画像中のレーザー散乱飛跡の近傍で背景のみが写っている部分から計算し、高度別に受信信号から差し引くことによって背景光を除去している⁷⁾。この背景光除去アルゴリズムは、夜間や日中の晴天時と雲が一様にあるときは有効であるが、日中でレーザー散乱飛跡の背景に雲がまばらにあるような場合に限り、背景光強度を正確に計算できず背景光処理に誤差が生じてしまう。このような計算誤差を含むデータはFig.4の28日07:00から観測終了までに見られる。

第2は多重散乱の影響である。雲のような高濃度散乱体があるとレーザー光は多重散乱し、雲底面にレーザービームを中心とする円形の散乱スポットができる。これをCCDカメラで撮影するとレーザー散乱飛跡に散乱スポットが重なるため、雲底面を中心に上下方向に広がって観測されてしまう。この多重散乱の影響はFig.4の27日20:00頃の高度300m付近にある雲による信号で特に顕著に見られる。観測結果は雲による強いエコーの上からも信号が戻ってきているように見えるため誤って解釈される危険性があり注意が必要である。ただし、雲底高度は受信信号強度が最も強い高度に一致することから測定可能である。

第3はCCD素子の各画素の感度のばらつきが、そのまま観測結果に現れたことである。この影響はFig.5の27日12:00から最初に観測が中断されるまでに水平の規則正しい信号として見られる。背景光の強い昼間観測において信号強度が弱い場合にのみ生じるものであるが、何らかの方法で画素間の感度補正を行う必要がある。

また本システムではバイスタティック方式を採用したため散乱の角度依存性が問題となる。上述したように本システムによって得られる受信信号は散乱係数に比例し、散乱係数はパラメータに散乱角を持っている。本ライダーでは観測する高度によって散乱角が変化するため、受信信号は散乱角によって変化してしまう。この散乱角による受信信号の変化は、例えば散乱体にHaze C⁹⁾を仮定すると、本システムの観測高度範囲に対応する散乱角162°～

180degにおいて30%程度であり無視できない。このため、観測結果を考察する際には散乱角依存性の影響に注意する必要がある。

4. まとめ

本論文では、昼夜連続観測可能なバイスタティックイメージングライダーを開発するにあたり行われたゲート付きILIによる背景光除去の検討と昼夜連続観測の結果について述べ、システムの評価を行った。

本システムでは、背景光を除去するためにゲート付きILIをレーザーパルスと同期して動作する高速シャッターとして用いた。この装置を用いて昼間にレーザー散乱飛跡を撮影したところ、ゲート時間が40 μ s以下において10以上のSNRを得ることができ、昼間観測が十分に可能であることがわかった。また昼夜連続観測により、降雨、降雪直前に雲底高度が低下するようすや、霧の鉛直構造の変化などを捉えることができた。観測では同時にいくつかの改善すべき問題点も見つかったが、24時間連続して地表付近から観測可能な本システムが低層大気観測に有効であるこ

とを確認できた。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))の援助により行われた。

参考文献

- 1) G. Fiocco and L. D. Smullin: *Nature* **199** (1963) 1275.
- 2) P. C. S. Devara and P. E. Raj: *J. Aeros. Sci.* **20** (1989) 37.
- 3) B. M. Welsh and C. S. Gardner: *Appl. Opt.* **28** (1989) 82.
- 4) J. A. Reagan, D. M. Byrne, and B. M. Herman: *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **GE-20** (1982) 229.
- 5) K. Parameswaran, K. O. Rose, and B. V. K. Murthy: *J. Geo. Res.* **89** No.D2 (1984) 2541.
- 6) G. Pandithurai, P. C. S. Devara, P. E. Raj, and S. Sharma: *Remote Sens. Environ.* **56** (1996) 87.
- 7) 山口 堅治, 目木 一男, 齊藤 保典, 鹿野 哲生, 野村 彰夫, 板部 敏和, 柴田 隆: *レーザー研究* **23** (1995) 25.
- 8) K. Meki, X. Li, F. Kobayashi, T. D. Kawahara, Y. Saito, and A. Nomura: *Proc. 18th Int. Laser Radar Conf.*, Berlin, 1996 (Springer-Verlag, Berlin, 1996) p.131.
- 9) D. Deirmendjian: *Appl. Opt.* **3** (1964) 187.