レーザーオリジナル

半導体レーザーを光源とする擬似ランダム
変調CWライダーの試作と動作特性竹内延夫*・馬場浩司**・桜井捷海**・上野敏行***・
井戸田 健****・新井敏弘****・常見真人*****・石河直樹*****

(1985年3月7日 受理)

Construction of a Pseudo-Random- Modulation cw
Lidar Using a Laser DiodeNobuo TAKEUCHI*, Hiroshi BABA**, Katsumi SAKURAI**, Toshiyuki UENO**,
Ken IDOTA****, Toshihiro ARAI****, Masato TSUNEMI***** and Naoki ISHIKAWA*****

(Received March 7, 1985)

Random-modulation cw (RM-CW) lidar has characteristics that make it possible to use a small-power cw laser as the light source. Development of laser diodes (LD) has been very rapid recently. The laser diode is compact in size and can be driven with little energy compared with traditional lasers, so that it is the most promising candidate for use in a portable, compact and practical lidar system. In this paper, a prototype portable RM-CW lidar system with an LD light source is reported. This is the first report of a practical LD system, to the authors' knowledge. Measurements of the spatial aerosol profile up to several hundred meters, as well as cloud ceiling-height up to several kilometers, were detected, at night time with this system and are shown in this paper.

1. はじめに

ライダー (レーザーレーダー)¹⁾ は大気中の物質の分布状態や物体までの距離を遠隔的に測

定するための装置で、レーザーの重要な応用分野の1つである。物質からの散乱信号光は微弱であるので、通常、大出力のパルスレーザーが光源として用いられる^{2,3)} しかし、大出力のパ

* 国立公害研究所大気環境部 (〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-2)

** 東京大学教養学部基礎科学科 (〒153 東京都目黒区駒場3-8-1)

*** 千葉大学工学部機械工学科 (〒260 千葉市弥生町1-33)

**** 筑波大学理工学系 (〒305 茨城県新治郡桜村天王台1-1-1)

***** 明星電気(株) (〒302-01 茨城県北相馬郡守谷町大字守谷甲249-1)

* National Institute for Environmental Studies (16-2, Onogawa, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305)

** Dept. of Pure and Applied Science, The Univ. of Tokyo (3-8-1, Komaba, Meguroku, Tokyo 153)

*** Dept. of Mechanical Engineering, Chiba Univ. (1-33, Yayoicho, Chiba 260)

**** Inst. of Appl. Phys, The Univ. of Tsukuba (1-1-1, Ten-nodai, Sakuramura, Niiharigun, Ibaraki 305)

***** Meisei Electric Co., Ltd. (249, Moriya, Kitasoumagun, Ibaraki 302-01)

ルスレーザーを光源とする場合、装置が大型化し、ライダーの普及を妨げる要因となっている。著者らは、CWライダーを光源として、散乱体の空間プロファイルを得ることができる擬似ランダム変調CWライダー(RM-CWライダー)を提案し、アルゴンレーザーを光源として装置を構成し、大気中のエアロゾル空間プロファイルを測定した結果を報告した^{4,5)}。CWライダーとしては、周波数変調(FM)CWライダーが提案され⁶⁾、その基礎実験が行われている⁷⁾。RM-CWライダーは振幅または位相を擬似ランダムコードによって変調する。その自己相関が δ 関数的であることを利用して、受光散乱信号光と遅延させた変調信号との相関をとって、散乱体の空間信号を得る手法である。

RM-CWライダーでは同じピークパワーのパルスライダーに比べて大気中へ送出する出力は小出力で済むので、光源出力に対する要求は緩やかとなる。したがって最近発展の著しい半導体レーザー(レーザーダイオード:LD)を光源するのに最も適した手法である。LDはcw動作で約100mW(アレイタイプ)⁸⁾のものが、パルス動作で数kw(アレイタイプ)⁹⁾のものが、市販されている。ライダーの場合、昼間の背景光雑音を抑えるために、レーザー発振光の周波数が安定でしかもスペクトル幅が狭いことが要求される。アレイ型であっても、位相结合(phase locking)によって単一モード発振が実現されている¹⁰⁾。パルス動作でも単一モードで動作するDSM(Dynamic Single Mode)レーザー¹¹⁾が研究されている(この場合DFB(Distributed Feed-Back)構造など、特殊の構造が必要である)。したがって単一モード動作を容易にしかも安定に利用できる点からもCWライダー方式が適している。パルス動作のLDを光源とするライダーとしては、斜め視程計への応用¹²⁾が試みられており、また雲底高度計¹³⁾として製品化されているが、大気中の散乱体(エアロゾル、排煙等)の空間分布を精度良く、小型簡便なシステムで測定した報告はなされていない。

本論文ではLDを光源として、エアロゾル空

間分布を本格的に測定した最初の例として、RM-CWライダーの試作とその動作特性を報告する。本システムは、1人で運搬・操作できる小型で可搬なシステムとして、近距離のエアロゾルや排煙・排ガスの空間分布状態や、大気境界層構造、雲底高度、視程等を測定対象として設計・製作された。実際には、15mWの出力(平均7.5mW)のLDを光源として、夜間、数km遠方の雲や数100mまでのエアロゾルの空間分布の測定を行うことができた。以下に、LDを光源とするライダーの特徴、RM-CWライダーの原理と概要、試作したライダー装置の仕様、測定例について述べる。

2. LDライダーの特徴

半導体レーザー(LD)は光ファイバーと組み合わせて、光通信用の光源に用いられるだけでなく、光ディスクの読み取りやレーザビームプリンターの光源として実用化されており、それらのLDを小型可搬なRM-CWライダー光源として用いることが可能である。

LDをライダーの光源として使用する際の必要条件は、

- 1) レーザー出力が十分あること
- 2) 空間分解能を得るのに十分な変調速度が得られること
- 3) 大気の透過率が良い(“大気の窓”)領域で発振すること
- 4) 背景光を除去するのに十分なだけ単色で安定に発振すること
- 5) 検出器感度が良好な波長帯で動作すること
- 6) 光軸調整等の観点からは可視域が望ましい、などである。

また、LDは他のレーザーと比べて次の特徴を持つ：

- 1° 小型軽量である。
- 2° 低電圧、小電力で駆動できる。
- 3° 出力を容易に電流変調できる。
- 4° 温度や駆動電流によって同調可能である。
- 5° 低価格である。
- 6° 長寿命である。

特に出力を電流変調できることは、Arレーザーを光源のする場合のような光変調素子を必要としないので、RM-CWライダーにおける変調方式を極めて簡単にする。

現在利用できるLDはGaAlAs系の650~950 nm, InGaAsP系の1.0~1.6 μ m, Pb化合物系の4~32 μ mである。このうちPb化合物系は動作時に冷却を必要とする。現状ではGaAlAs系のLDの方がInGaAsP系よりも大きなcw出力を与える。GaAlAs系では830~850nm領域と780nm領域を中心に開発が進められており、前者は光ディスクに、後者はレーザービームプリンタに使用されている。光学的調整、検出器感度の点からはさらに短波長のLDが適しているが、短波長領域のLDは現状では信頼性に欠けており、市販されていない。780nmの波長域は夜間にレーザービームを識別可能であり、大気中の水蒸気の吸収線も非常にまばらな領域である。また、高感度な感度曲線が長波長側まで伸びているGaAs光電面をもつ光電子増倍管(PMT)の長波長側の限界波長でもある。この波長領域では位相結合型のアレイタイプで100mWの単一モード発振も報告¹⁴⁾されており、目に対する安全性の観点も含めて、ライダー光源に適した波長である。

3. RM-CWライダーの原理と概要

RM-CWライダーの原理については文献5)で既に述べてあるので、ここでは概要のみを紹介する。擬似ランダムコードは時間系列の自己相関関数が δ 関数的な性質をもつ信号系列である¹⁵⁾。本実験では周期的な擬似ランダムコードであるM系列(最大周期列, maximum length shift register sequence)を使用した。 n ケのシフトレジスタを使用して $N=2^n-1$ を周期とするM系列を得る。M系列のサンプリング時間を Δt とすると、M系列の1周期 T は $T=N\Delta t$ となる。シフトレジスタから得られるM系列は“1”, “0”の元から構成される(これを a_i と呼ぶ。 $a_i=1$ または0, $i=1\sim N$)。“1”, “0”を“1”, “-1”に対応させた系列

が自己相関関数が δ 関数的となるM系列である(これを a'_i と呼ぶ)。 a_i と a'_i の相互相関関数 $\phi_{aa'}(j)$ は次式で与えられる:

$$\phi_{aa'}(j) = \sum_{i=1}^N a_i a'_{i+j} = \begin{cases} (N+1)/2 & j=0 \pmod{N} \\ 0 & j \neq 0 \pmod{N} \end{cases} \quad (1)$$

大気中にM系列で変調された光出力 $x_i = P_0 a_i$ ($a_i=1$ または0)を送出するものとする。(本システムではインコヒーレント検出法を使用する。コヒーレント検出法を使用するコヒーレントライダーでは位相をサンプリング時間 Δt 毎にM系列 a'_i の“1”, “-1”に応じて0, π に切り換える。この場合には $x_i = P_0 a'_i$ となり, RM-CWライダーは文字通りCWライダーとなる。S/Nの式はインコヒーレントの場合と異なる。)

単位強さの光入力に対する大気中の散乱体の空間分布を反映する応答関数を G_i とする(i は時間を Δt 刻みで数えたとき, $i\Delta t$ 時間後の信号であることを示す)と, RM-CWライダーではFig.1に示すように, 送信光 x_i と応答関数 G_i の畳み込み(convolution)によって受光散乱信号 y_i が与えられ,

$$y_i = \sum_{j=1}^N x_{i-j} G_j + b + n_i \quad (2)$$

となる。ここで n_i は時間 $i\Delta t$ における検出器のポアソン雑音で, 期待値は零である($E[n_i]=0$)。 b は背景光強度で一定値を与える。応答関数 G_j は,

$$G_j = \eta (c\Delta t/2) A_r \beta_j T_j^2 Y_j / R_j^2 \quad (3)$$

で与えられる。 η は光学系の効率, c は光速($c\Delta t/2$ は空間分解能)である。距離 R_j は $j c\Delta t$

Fig.1 Schematic diagram of the "Random-modulation" CW (RM-CW) lidar.

/2で与えられる。 A_r は受光光学系開口面積, β_j は距離 R_j からの微分後方散乱係数, T_j は R_j までの透過率, Y_j は R_j におけるレーザービームが望遠鏡視野に含まれる割合である。

RM-CWライダーでは空間分解能はサンプリング時間 Δt によって $c\Delta t/2$ で与えられる。また応答関数は $cT/2 (=Nc\Delta t/2)$ の繰返し関数として与えられる。したがって周期性による測定誤差を無視できるためには、 $R=cT/2 (=Nc\Delta t/2)$ における応答関数の値が許容誤差以下でなければならない。

受光信号 y_i から応答関数 G_i を求めるには、擬似ランダムコードの自己相関関数が δ 関数的性質をもつことを利用して、 y_i と a_i' (この場合 a_i でなく a_i' を用いることに注意)との相関

$$S_i = \sum_{i=1}^N y_i a_{i+i}' \quad (4)$$

をとる。(実際にはFig. 1に示すように y_i をAD変換器(ADC)でデジタル化した後で相関をとる。) S_i の期待値(時間平均値) $\bar{S}_i$ は式(1)の関係をを用いて、

$$\bar{S}_i = \{S_i\} = P_0 \frac{N+1}{2} G_i + b \quad (5)$$

となる。

検出器出力信号の変動はポアソン分布に従うので、

$$E[n_i^2] = (1/\xi) \left(\sum_{j=1}^N x_{i-j} G_j + b \right)$$

である⁵⁾。ここで $\xi = \eta_q \Delta t / h\nu$ (η_q は光検出器の量子効率, h はプランク定数, ν はレーザー周波数)は信号強度(パワー)を光電子数へ変換する係数である。したがって、相関 S_i の分散は

$$V[S_i] = E[(S_i - \bar{S}_i)^2] = (N/\xi) \left(P_0 \frac{N+1}{2} \bar{G} + b \right) \quad (6)$$

で与えられる。ここで $\bar{G} = (1/N) \sum_{j=1}^N G_j$ は応答関数の平均値である。相関 S_i の分散は(6)式から分るように l (したがって距離 R)によらず一定となる。

デジタル化の誤差による分散は、ADCの入

力の時点で一様分布を仮定すると、ADCのレベルの最小刻み(LSB)を Δq とすると、 $(\Delta q)^2/12$ で表わされる。相関演算を行うときにデジタル化の誤差は平均化されるので、その誤差の分布形は中心極限定理によって正規分布に近づく。しかし、 S_i に入ってくるデジタル化の誤差による分散はそのまま N 倍される。

ライダーの S/N は S_i の期待値(信号分)と標準偏差 σ (分散の平方根)の比によって与えられる(本論文では S/N の定義として振幅の比を用いる)：

$$S/N = \frac{\bar{S}_i}{\sqrt{V[S_i]}} = \frac{\sqrt{M\xi P_0(N+1)G_i/2}}{\sqrt{N\xi\mu(P_0(N+1)\bar{G}/2+b)+(\Delta p)^2/12}} \quad (7)$$

ここで M は測定時間に含まれる M 系列信号の周期($N\Delta t$)の繰返し数である。 μ は検出器の雑音指数で、PMTでは2~3の値をとる¹⁶⁾。(7)式における Δp は Δq を光電面における等価光電子数に換算した値で、 $\Delta q = \Delta p (e/\Delta t) R_i M_{PMT} M_{AMP}$ の関係がある(e は電子の電荷, R_i はPMTの負荷抵抗値, M_{PMT} , M_{AMP} はそれぞれPMTおよび増幅器の増倍率である。

(7)式を用いた計算例として、20mWのcwレーザー(duty ratio 50%なので平均パワー10mW)を光源として、視程(レーザー光の透過率が1/50となる距離)5kmに相当するエアロゾルに対して、 $S/N=10$ を得るのに必要な測定時間をFig. 2に示した。距離分解能($\Delta R = c\Delta t/2$)は9m($\Delta t=60$ ns)を仮定している。その他の装置の仕様は次節Table Iに示す通りである。昼間時の計算に用いた背景光強度は $8 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2/\text{sr/nm}$ である。これは晴天時の明るいときの天空光輝度に相当する。昼間晴天時に1kmまで測定するには、100mW(平均50mW)のLDを用いた場合、100秒の測定時間で $S/N=3$ が得られる。

4. LDを光源とするRM-CWライダー

本装置の製作の目標は、1人で運搬・操作できる小型ライダーシステムの製作である。Fig.

Fig.2 Estimation of the integration time (measurement time) necessary for measuring aerosol profile with spatial resolution of 9m and $S/N=10$. Diode laser power is assumed to be 20mW. Other conditions are the same as in Table I.

2に示したように大気中のエアロゾルに対してはほぼ1kmまで測定できる。もっと高濃度の物質に対してはさらに遠方までの測定が可能である。RM-CWライダーでは小出力のcwレーザーを光源として使用できるので、半導体レーザー(LD)を光源として採用したことが本装置の最大の特徴である。LDを光源とする小型可搬なRM-CWライダーについて、装置の概要、レーザー部、送受光部、信号処理系、制御部および制御プログラムについて以下に述べる。

4.1 装置の概要

Table I Specification of a Diode Laser (LD) RM-CW Lidar.

Laser	GaAlAs-LD (Sharp LT-024MD)
Wavelength	778nm (15°C)
Power	15mW (max 30mW)
Mod. Current	80 mA (bias 40mA+mod.40mA)
Temp.Tun.Range	0—30°C
Wavelen.Tun. Range	7 nm
Beam Divergence	0.1mrad (after collim.)
Pseudo-random Modulation	on-off style
Code	Binary M-sequence
No. of Elem. (N)	4095
Sampling Time	$\Delta t=60\text{ns}$
Range Resolution	$\Delta R=9\text{m}$
Period	$T=\Delta t \times N$
Receiving Optics	
Telescope	Reflection-type (Cassegrainian)
Aperture	13.5cm
Effective focal length	40cm
Field of View	2mrad
NB-IF filter band width	1.2nm
Sep. bet. laser & Teles.	22cm
Detector	PMT (originally APD)
Quantum Effi.	$Q=0.1$ (0.7)
Dark Current	0.1nA (0.3nA ($V=50\text{V}$))
Excess Noise	2-3 (M_D^x)
Amp. Factor	2×10^5 ($M_D=100$ (typ.))
Amplifier Gain	70dB
Signal Processor	
ADC	3 bits (Sampling 20ns)
accumulation	up to 2^{16}
Correlation	hard system
Control/Display	Personal computer (Sanyo MBC225)

Fig.3 Block diagram of the diode laser (LD) RM-CW lidar (Head [transmitter and receiver] and processor parts).

LDを光源とするRM-CWライダー装置のブロック図をFig.3に、仕様をTable Iに示す。装置全体は送・受信光部、信号処理部、制御用パーソナル・コンピュータ（パソコン）から成る（Fig.3には前二者が示してある）。送・受信光部は同一のフレーム（送受信用ヘッド）の中に隣り合わせて格納され、一体化されている。送受信ヘッドは、信号処理部と5mのケーブルで結ばれ、測量用三脚の上にマウントされ、任意の方向を向けることが可能である。全システムはパソコンからのコマンドにより自動的に操作が可能である。以下にLDと他の構成部に分けて各部仕様を説明する。

4.2 半導体レーザー素子

光源としての半導体レーザー（LD）に780nm領域で市販（国内）では最大のcw出力を与えるシャープLT-024MDを使用した。同素子はVSIS（V-channeled substrate inner stripe）型のGaAlAs系LDで、cw動作の最大定格は30mW、発振しきい値電流は45～50mA、ビーム拡がり（接合面に平行な方向）は半値全角が10°、垂直方向は30°であった。RM-CWライダー装置では常時40mAのバイアス電流を流し、M系列の“1”に対応して、60nsの矩形波状の電流パルス（振幅40～50mA）を印加した。レーザー発光パルス波形は10～90%値でみると、立上り時間6ns、立下り時間7nsであるが、立下りは波高の5%程度の尾をさらに13nsばかりひきずる（これは駆動電源回路の影響もあるものと思われる）。動作時の代表的出力は15mW（平均出力7.5mW）（ニッコーム、サーモフィルムLP-31Bで測定）であった。

レーザー発振の波長制御は、ペルティエ素子によって素子温度を制御して行った。素子温度に対する発振波長の変化の1例をFig.4に示す。Fig.4における発振波長の平均的变化は、0.25nm/°C、同一モード上での変化は0.06nm/°Cである。これはGaAlAs系LDの一般的な値0.26nm/°C、0.08nm/°Cとほぼ一致する。適当な動作温度を選択することによって単一モードで安

Fig.4 Lasing frequency shift as a function of LD mount temperature.

定な動作を得ることが可能である。

夜間測定では狭帯域光学フィルターをはずして測定を行ったが、昼間測定ではLDの動作波長とフィルターの透過中心波長を一致させる必要がある。昼間時測定においてS/Nを向上させるためにはレーザー出力を向上させる必要がある。100mWのアレイ型素子を用いると出力強度を7倍に向上させることが可能である。

4.3 送受信光部

送受信光部ヘッドの写真をFig.5に示す。ヘッドには送光部および受信光部が隣りあって配置されている（両光軸間距離220mm）。

送光部はLDおよびLD駆動電源、波長モニターおよびレーザー波長制御用温度制御装置から成る。本装置ではLD動作温度は温度制御用冷却装置を働かせてFig.4で示される安定な発振波長を与える値に保たれた。

レーザー発振波長は $f=50\text{mm}$ 、 $F=1.3$ のカメラレンズによって平行光にコリメートされ、大

Fig.5 Photo of the LD RM-CW lidar head.

気中へ射出される。ビーム拡がりの最小値は0.1 mrad以下であった。

大気中で後方散乱された信号光は口径135mm, 有効焦点距離 400mmのカセグレン型反射望遠鏡によって集光される。望遠鏡の視野角は焦点位置におかれた可変絞リ (Melles Griot製, 最小口径0.8mm) によって 2 mradに抑えられる。集光された信号光はレンズによって平行にされ, 狭帯域光学フィルター (夜間測定では不使用) を通過した後, レンズで光電子増倍管 (PMT) に集光される。受光信号光は初段増幅器でインピーダンス変換された後, 3段増幅され, 信号処理系へ送られる。増幅器の全利得は 74 dBであった。なお, 原仕様ではPMTの代りにアバランシェフォトダイオード (APD) を検出器に使用していた。この場合, APDの過剰雑音を小さく抑えると増幅器利得が不足し, 構造物や排煙の測定を行うことはできたが, 稀薄なエアロゾルの空間分布の測定は, 検出器をPMTに替えて初めて可能となった。

4.4 信号処理系

信号処理系はAD変換器 (ADC), 多チャンネル積算器, 相関演算器から成る。PMTで受光された信号光は増幅器で増幅され, 信号処理系へ導かれる。その際に変調周波数を含む高周波を高域濾波フィルターでカットし, 受光系に混入する変調信号の影響を除去することができる。

信号処理系へ導かれた受光信号は, 3ビットADC (Datel HU3 BMC) へ入力され, デジタル化される。ADCのサンプリング時間は最小20nsであるが通常60nsで使用した。入力信号を少いビット数で歪みなくデジタル化するために, 入力信号レベルのヒストグラムをモニターし, 1 LSBに対する信号レベルおよび入力信号のオフセット値を調整した。Fig. 6に積算部ボードに配置されたADCと多チャンネル積算器 (MCA) のブロック図を示す。相関演算器 (Fig. 7 参照) 中のランダムコード生成器 (RCG) では12ケのシフトレジスタに帰還をかけてexclusive ORをとることによって4095 (=

Fig. 6 Block diagram of the accumulation part of the processor unit.

$12^{12} - 1$) を周期とするM系列ランダムコードが生成される。クロック周波数は水晶振動子によって決定され, 16.67MHz (クロック時間 60 ns) を基本として, その $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, ... が選択できる。RCGで生成された高速の変調信号は一度パソコンのCPUを経由して積算部ボード (Fig. 6) 上のトリガーパルス生成器を通して送光部に送られ, LD駆動の変調コードとなる。このように本装置では60nsの高速パルスで変調された信号光を扱うため, MCAは高速積算部と (低速度の) 主積算部に分けて処理を行っている。高速積算部は5ケのシフトレジスタによって, ADCでデジタル化された1周期4095ケの信号を819ケずつ5ブロックに振りわけ。これによりメモリーへの積算速度を $\frac{1}{5}$ にスローダウンし, 4ビット819チャンネル $\times$ 5ブロックの高速メモリーに5周期分積算する。5周期分積算された4ビットの高速積算部データは16ビットの主積算部へ転送・積算される。

Fig. 7 Block diagram of the correlation part of the processor unit.

主積算部の内容は補助メモリーへコピーされ、積算中、その内容をCRTに表示したり、パソコンへ転送する。

もう一つの信号処理系の機能は相関演算である。相関演算器部のブロック図をFig.7に示した。積算データの復調処理は、変調擬似ランダムコードとの相関を遅延時間（擬似ランダムコードの位相）をずらしながら取って行すが、その処理はコード長 N に対して N^2 回の加減算が必要である。本装置では専用ハードウェアによって相関演算を行う。その際、積算データはCPUから転送され、一度、相関演算器内のメモリーに格納され、CPUからの制御コマンドに従って、加減算が行われる。 $N=4095$ の周期の相関演算は約1秒で処理される。復調結果はCRT上に表示される。

4.5 制御部および制御プログラム

制御部はパソコンおよびその周辺機器から構成され、システムの制御、データ処理を行う部分である。パソコンは主としてサンヨーMBC225を用い、必要な場合にNEC PC9801F2を使用した。

制御項目としては1) 測定の開始・終了、2) 相関演算の実行および計算結果の表示、3) フロッピーディスク(FD)へのデータの収納、である。これらは機能ごとにアセンブラでサブルーチンが作成され、それらをベーシックの主プログラムで組合わせて、キーボードからのワンタッチ入力によって必要な操作が行えるようにプログラムが作成されている。サンヨーMBC225(S-ベーシック)を用いる場合の操作のフローチャートをFig.8に示した。NEC 9801F2を使用する場合には、基本的機能は等しいが、さらに機能の向上が図られ、予じめ設定したメニューに沿った繰返し測定、数秒毎のA-スコープ（相関演算の結果）の表示、距離自乗補正、平滑化処理等を行うことができる。

5. 測定例

Fig.2に示すように装置が理想通りに働けば、

Fig.8 Flow diagram of a data acquisition and analysing programs.

夜間の測定では視程5kmに相当するエアロゾルに対して、600mの距離に対し、積算時間10秒で $S/N=10$ （空間分解能9m）が得られる筈である。しかし現状では変調されたレーザー光波形の歪みや受信回路へ回り込む雑音のために計算値通りの S/N は得られていない。本論文では検出器としてAPD使用時の紙、雪、煙等からの散乱信号、PMTに変えてからのエアロゾルや雲の測定、視程の観測、昼間時における樹木からの散乱信号について報告し、次節で S/N 低下の問題点を検討する。

5.1 APDによる検出例

装置を小型化し、操作を簡易化するには、装置全体を固体素子化（ソリッド化）することが望ましい。装置全体をソリッド化する観点から、原仕様では検出器にAPDを採用した。APDでは動作時の雑音はアバランシェ作用により増倍率 M_D とともに M_D^{1+x} 倍（シリコンを素材とするA

PDでは $x=0.25$)に増大するので、通常 $M_0=100\sim300$ 程度が限界となる。したがってAPDを検出器とする場合には後段の増幅器雑音を見捨てず、低雑音・高利得の増倍器を必要とする。この事情も考慮したうえでAPDを検出器として採用したが、小信号時におけるADCの動作不良のためにエアロゾル等の低濃度な散乱体を測定するに十分な性能が得られなかった。そのため検出器をPMTに変更した訳であるが、APDには1)入出力関係のダイナミックレンジが広い、2)過大入力信号に対して素子が丈夫である、3)検出感度が長波長側へ延びている、4)素子自体(冷却器を必要とする場合は別である)は小型である、等の長所がある。したがって可能な限りAPDを使用することが望ましい事情は依然として重要である。

APDを検出器としても、高濃度な散乱体の空間分布や建造物までの距離の測定は可能であ

Fig.9 Lidar echo signal from a paper envelope with an APD detector.

Fig.10 Lidar echo signal from falling snow with an APD detector.

る。Fig.9~10に紙、雪からのエコー信号を示す。Fig.9は120m先にたてたポールに貼りつけた茶封筒からのエコー信号である。レーザービームの拡がり150m先で2~3cmであるので、茶封筒よりも小さいスポットとなる。Fig.10は降雪時におけるエコー信号である。100mまでの部分はレーザービームが望遠鏡視野に含まれる割合 $Y(R)$ (クロスオーバー関数)を示している。Fig.10の例では、60mからレーザービームは望遠鏡視野と重なり始め、100mでビーム全体が視野に含まれることを示している。100mでエコー信号はピークに達した後、雪によるレーザー光透過率の減衰によって270mの地点で雑音レベル以下となる。そのほか発煙筒からの煙もAPDによって測定されているが、ここでは省略する。

5.2 エアロゾル、雲

大気境界層構造(逆転層高度、混合層の厚さなど)を測定するにはエアロゾル濃度の空間分

Fig.11 Lidar echo from boundary layer aerosol with a PMT detector (elevation angle 5 deg.) (a) A-scope, (b) range square corrected.

布が測定できることが必要である。APDを検出器とした場合、増幅器利得がADCへの入力信号レベルを得るのに十分でないので、検出器をPMTに変更した。その結果得られた夜間エアロゾル測定の一例をFig. 11に示す。測定時のライダー高位角は約 5° で測定の積算時間は80秒である。Fig. 11(a)にはA-スコープを、Fig. 11(b)には距離自乗補正後、対数表示した結果を示してある。Fig. 11(b)で見られる距離650m附近におけるへこみは逆転層高度に対応しているように思われる。(それ以遠ではエアロゾル濃度が低く、信号レベルが小さいため、受信回路に回り込む雑音によって十分なS/Nが得られていない。)

Fig. 12にはPMTを用いて行った雲の測定の一例を示す。測定の積算時間は約30秒で、高位角は 30° であった。Fig. 12では5 km遠方(高度2.5 km)の雲が受光されている。薄い雲に対しては層状構造も観測される。

5.3 視 程

視程は大気汚染の1つの目安であるばかりでなく、航空機、船舶等の航行上も重要な情報である。特に悪視程の場合には大きな航空機事故にもつながるので、空港における地上レベルの視程は透過率計(transmissometer)によって常時監視されている。それに対し、着陸時にパイロットが必要とする視程は、操縦席から滑走路を見るものであり、斜め視程と呼ばれている。着陸時の進入角度は約 2° であるが、着陸地点よ

Fig. 12 Lidar echo from a cloud at 5km distance.

りも近くを見下ろすので、視線方向としては $2 \sim 9^\circ$ の範囲となる。斜め視程の場合には地上にベースラインをとることができないので、ライ

Fig. 13 Visibility measurement by transmissometer and RM-CW lidar. In a case of lidar, sope method is used for derivation. (Nov. 19, 1984)

Fig. 14 The same as in Fig. 13 except the observation date (Nov. 21, 1984)

ダーのように送受光を同一地点で行う単一局方式が優れている。高位角を小さくとした場合、地上附近の接地境界層中のエアロゾル濃度は一様であると仮定し、スロープ法を適用して視程の導出を試みた。距離自乗補正し、対数表示を行ったデータ上で適当な直線区間を選定し、その区間での傾きを最小自乗法により求めた。その結果をFig. 13, Fig. 14に示す。測定に際しては、空港で使用しているものと同種の透過率計(ベースライン152.4m, 地上3 m)を作動させ、それより得られた視程をFig. 13, 14中に同時に示してある。ライダーの測定は高位角5°に設定し、一定間隔毎に自動繰返し測定を行った。

Fig. 13の例では2分間隔で測定し、測定の積算時間は40秒である。Fig. 14の例はFig. 13より視程が良い場合の測定であるが、1分間隔で20秒間積算して測定した。いずれの場合も、測定値を視程に変換する換算方式が未確定のため、視程の絶対値としての比較はまだ結論づけられていないが、データから推定する限り、かなり高い相関性をもっていることが示された。すなわちFig. 13, 14に示されるように視程の時間変化の傾向は良く一致しており、さらに水平のパスと斜め方向のパスの差異に基くと考えられる部分差も見出され、斜め視程の計測装置としての実用化に大きく前進したものと言える。

5.4 昼間測定

昼間時に測定を行うためには、背景光の影響を極力除去する必要がある。そのためには1) 受光視野角を極力、小さく設定する。2) レーザー波長を狭帯域光学フィルターの中心波長に固定し、背景光を制限することが有効である。1) に関してはLD光源は0.1mrad以下のビーム拡がりにできるので、長焦点の受光望遠鏡を用いて受光視野角を小さく(ビーム拡がりの2倍程度に)することが望ましい。残念ながら、使用した装置では有効焦点距離は40cmであったので、視野角を2 mrad以下にすることは難しかった。2) に関してはLDの動作温度をペルティエ素子によって調節し、LD発振波長を光学

Fig. 15 Lidar measurement in the daytime. Echo is from trees. PMT voltage is lowered by 200V to get rid of PMT saturation.

フィルターの中心波長附近に設定して昼間時の測定を試みた。エアロゾルの測定にはさらに装置性能の向上を図る必要があるが、建造物に対してはエコー信号を得ることができた。200m先の樹木から得られた散乱信号の1例をFig. 15に示す。(反射信号後方の波状の波形は強い信号に対する増幅器の非線形応答による。)

6. おわりに

現在、半導体レーザー(LD)は光通信、コンパクトディスク、レーザープリンターなどの分野で急速に普及しており、さらに広い応用分野が期待されている。その応用分野の一つとして、本報告ではLDを光源とする擬似ランダム変調CW(RM-CW)ライダーの試作とその動作例について報告した。LDを光源とするライダーとしては、10W以上のパルス動作で雲底高度計や150m以下の距離計に应用されており、斜め視程計への試みも報告されているが、今後最も有望なcw動作のLDを用いた報告はない。本報告では低出力のcw動作でも高感度を得るために擬似ランダム変調方式を採用した。全固体化を考えた当初の設計では検出器としてAPDを採用し、建造物や雨・雪・煙からのエコーを得た。さらに低濃度のエアロゾル空間分布を測定するために検出器をPMTに変えて、夜間、数100mまでエアロゾルを観測することができた。

装置は小型・可搬型の観点から製作された。

試作機であるのでLDを採用した効果は十分に発揮されていないが、ライダーヘッド（送受光部）、信号処理部、制御部（パソコン）の各部に分けて、1人でライトバン等に搭載し、運搬・操作することが可能である。

試作した装置は、小信号入力に対するADCの動作不良、光学系の収差、変調波形の歪み、受信回路への電気雑音の混入などを改良することによってさらに数十倍のS/Nの改善が期待できる。本報告では、LDを光源としたRM-CWライダーの基礎特性を報告したが、問題点を解決し、さらに高出力のLDを使用することにより、初期の目標性能を達成し、小型軽量で低価格なライダー装置が実現するのも遠くないと確信する。

最後に、本レーザーライダーの試作・実験に御協力戴いた明星電気(株)守谷工場技術部の諸氏、およびCW半導体レーザーに関していろいろと御教示下さったシャープ中央研究所土方俊樹部長、矢野盛規課長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) E. D. Hinkley ed.: *Laser Monitoring of the Atmosphere* (Topics in Applied Physics Vol. 14) (Springer-Verlag, Berlin, 1976) 380p.
- 2) H. Shimizu et al.: *Appl. Opt.* **24** (1985) 617.
- 3) N. Takeuchi et al.: *Opt. and Laser Remote Sensing*, (ed. D. K. Killinger and A. Mooradian), (Springer Ser. in Optical Sciences, Vol. 39, Springer-Verlag, Berlin), 1983, pp. 288-298.
- 4) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba and K. Sakurai: *Appl. Opt.* **22** (1983) 1382.
- 5) 竹内延夫・杉本伸夫、桜井捷海、馬場浩司、上野敏行: レーザー研究, **11** (1983) 763.
- 6) R. A. Ferguson: *Feasibility of a CW lidar technique for measurement of plume opacity*, SRI Report for EPA, **EPA-650/2-73-037** (PB-231 992) (1973) 90p.
- 7) T. Kobayashi et al.: *FM-CW laser radar for differential absorption measurements of atmospheric gases using topographic targets*, 12th Int. Laser Radar Conf., Aix en Provence, France 19 (1984) 417-418.
- 8) Spectra Diode Labs: *100mW cw GaAlAs Laser Diode Model*, SDL-2410-D1.
- 9) M/A Com Laser Diode: *Single heterojunction GaAs laser diode arrays for pulsed operation*, LD-410.
- 10) D. R. Scifres et al.: *Appl. Phys. Lett.* **41** (1982) 1121.
- 11) Y. Suematsu et al.: *IEEE J. Lightwave Technol.* **LT-1** (1983) 161.
- 12) Ch. Werner and H. Herrmann: *Application to an eye-safe-laser slant visual range measuring device at Munich-airport*, 12th Int. Laser Radar Conf., Aix en Provence, France B5 (1984) 47.
- 13) 明星電気(株)雲底高度計 TXK-3 型
- 14) D. R. Scifres et al.: *Appl. Phys. Lett.* **42** (1983) 645.
- 15) 佐藤擬似ランダム系列, 磯部編, 相関関数及びスペクトル, Ⅲ-2, 東大出版会 (1968).
- 16) R. H. Kingston: *Detection of optical and infrared radiation* (Springer Series in Optical Sciences vol. 10), (Springer-Verlag, Berlin, 1979) pp. 47-50.