レーザーオリジナル

多目的マルチカラーレーザーレーダーの試作

馬場浩司*・山腰直樹*・桜井捷海*

(1984年 3 月24日 受理)

Versatile Multicolor Laser Radar System with Pseudo-Random Modulation method

Hiroshi BABA*, Naoki YAMAKOSHI* and Katsumi SAKURAI*

(Received March 24, 1984)

A multicolor laser radar system with pseudo-random modulation method has been constructed. The transmitter system is formed of the composite structure of multicolor Ar ion laser, a telescope and a optical fiber cable. The receiver system consists of a telescope and a grating polychromator. The microcomputer system associated with multichannel counters (4095 CH) with photon counting method and the homemade correlation computer have been developed for real time data processing. Ability and versatility of this system have been demonstrated with 100 mW transmitting laser power in a measurement of aerosol fuming up to 1 km.

1. はじめに

CWのイオンレーザーは幾つかの波長に対して同時に発振させることが可能であり、各発振線を同時に送信し、かつ、検出系においてこれらを分離することができればエコーの波長依存性が求められる。本論文では、多波長連続発振のArイオンレーザーをレーザーレーダー¹⁾の光源とし、エコーシグナルを分光器によって各波長を選択、独立に検出することにより、新しいタイプのCWレーザーレーダーを試作し、その特性実験を行った結果について報告する。レーザーレーダーには、対象物までの距離や視程を測るもの、大気中のエアロゾルや汚染物質の濃度、空間分布を観測するものなど幾つかのタイプがある²⁾が、ここで試作したシステムは、時間及び波長の両方を同時に分解して検出するものであり、それらいずれのタイプにも応用が可能である。分光器を中心とする受信・検出系

は検出波長を分光器のスリット面におかれたアイリスの位置と回折格子の回転によって任意に選択できる。当然ながら、送信した波長以外の成分、即ち、対象物のラマン散乱や蛍光なども検出することができ、このことは海洋汚染や森林、実験農場の植物の状態等の遠隔計測への応用の道を開くものである。

本論文では、次章にてCWレーザーレーダーの原理を、また、試作システムの構成を第3章にて述べる。第4章ではシステムの動作実験として、エアロゾルや遠方の排煙などを観測した結果について、第5章では精密測定のための今後の改造点や本システムの応用性について考察する。また、上記以外にもエコーシグナルのゆらぎに関して、光電子カウンターとマイクロコンピュータによるFFT処理により予備の実験を行った結果について述べる。

2. CWレーザーレーダーの原理

* 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)
Department of Pure and Applied Sciences University of Tokyo (3-8-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153).

レーザーレーダーにおいては、エコーシグナルの送信光に対するインパルス応答が対象物質の空間分布に相当する訳であるが、本システムではCWレーザーの利点を十分に生かすため、擬似ランダムパルス列による変調を行っている。この方式は被測定系に対し、ある周期をもってくり返す「擬似ランダム」な変動を与え、このときに被測定系の出力と入力した擬似ランダムパルス列との相互相関を求めることにより、系のインパルス応答を得るものである。CWレーザーをこの方法で変調することにより、送信光のピーク出力を押えながら平均出力を大きくとることができ、SN比の改善や系の小型化が期待できる^{2)~7)}。

ここで使用した擬似ランダムパルス列は、シフトレジスターに適切なフィードバックをかけることにより生成されるM系列と呼ばれるものであり、以下のような性質をもつ。即ち、 n ステージのシフトレジスターからはコード長(周期) $N=2^n-1$ チャンネルの擬似ランダムパルス列が生成され、これを $\{a_k\}$ で表わすと、 a_k は2値数で $a_k=1$ となるものが 2^{n-1} 、 $a_k=0$ であるものが $2^{n-1}-1$ 個ある。この $\{a_k\}$ に対し、復調関数 $\{a'_k\}$ が存在し、

$$a'_k = \begin{cases} \frac{1}{2^{n-1}} & (\text{for } a_k = 1) \\ -\frac{1}{2^{n-1}} & (\text{for } a_k = 0) \end{cases} \quad (1)$$

$\{a_k\}$ と $\{a'_k\}$ との相互相関を $\phi_{a, a'}(i)$ と定義すると、

$$\begin{aligned} \phi_{a, a'}(i) &= \sum_{k=1}^N a_{k-i} a'_k \\ &= \begin{cases} 1 & (\text{if } i=0) \\ 0 & (\text{if } i \neq 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、インパルス応答 $g(t)$ をもつ系を $\{a_k\}$ で励起すると、その出力は雑音も含めて、

$$f_i = \sum_{k=1}^N g_{k-i} a_k + b_i \quad (3)$$

と、 a_k とのコンボリューションで表わされる。

ここで、 $g_k = g(k \cdot \Delta t)$ (Δt はクロック幅)、 b_i は雑音を意味する。したがって、得られた出力 f_i に復調関数 $\{a'_k\}$ を作用させると、

$$\begin{aligned} \phi_{f, a'}(i) &= \sum_{k=1}^N f_{k-i} a'_k \\ &= \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^N g_{j-k+i} a_j + b_{j-k} \right) a'_k \\ &= \sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^N g_{j-k+i} a_j \right) a'_k + \sum_{k=1}^N b_{i-k} \cdot a'_k \\ &= g_i + \frac{b}{2^{n-1}} \end{aligned} \quad (4)$$

となり、インパルス応答 g_i が得られる。

明らかなように、このM系列擬似ランダム変調のON-OFFの比はコード長 N に関係なくほぼ1対1となり、CWレーザー出力の1/2が平均として送出されることになる。著者らは、この方式により分子の寿命測定や原子・分子ビームの飛行時間測定などをこれまでに行ってきたおり、ここで試作したレーザーレーダーシステムはそれらをもとに新たにシステム構成を行ったものである。レーザーレーダーの場合、系の応答関数 $g(t)$ は送信系と受信系の視野の重なりや大気吸収・散乱係数、及び路離の関数となる^{2)~7)} が測定の原理は類似したものになる。

3. マルチカラーレーザーレーダーの構成

本システムの構成をFig. 1に示す。レーザーを変調、送信し、また受光する光学系、受信光を分光、検出する検出系、検出データを積算、解析する制御、処理系の3部で構成される。

3.1 送受光系

光源としては全線発振モードのArイオンレーザーを使用した。これは、5145Åから4545Åまで8本の発振線を有する。現システムでは、レーザー出力光は電気光学的変調器(Electro-Optic Modulator: E. O. M.)によって輝度変調を受ける。変調のビデオ信号(擬似ランダムパルス列)は後述するマルチチャンネルカウンターのクロックと同期した発生器より供給される。E. O. M. は高速の変調器であるが、 $\lambda/4$ 電圧が波長により異なり、レーザーの各発

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus of multi-color laser radar system.

振線の変調深度に差異が生ずるのが難である。E. O. M. より出た光は、光ファイバーケーブル（石英、コア径 $200\mu\text{m}$ 、長さ 30m ）により送信望遠鏡に導びかれる。光ファイバーとのマッチングは入力点においては顕微鏡レンズ（ $f=40\text{mm}$ ），出力点においては送信望遠鏡（ $f=200\text{mm}$ $F=4$ ）にて行っている。全体としての転送効率は $40\sim 60\%$ で、損失の大半は光ファイバーそのものより、入出力の各結合部で生じていると考えられ、これはレンズの f 、 F 値を最適化することにより、今後改善の余地がある。

レーザー光の送信部と受信部は一体となっており、受信部はFig. 2に示すようにカセグレン型望遠鏡（ $f=500\text{mm}$ 、 $F=8$ ）， 25cm チェルニーターナー型分光器（ニコン G250），光ガイド，光電子増倍管で構成されている。送受信部共に、望遠鏡には一般写真撮影用のものが使用されており、必要に応じて市販の各種交換レン

Fig. 2 Schematic apparatus of light receiver and multicolor detection system.

Fig. 3 Block diagram of high speed multichannel counter.

ズの装着が可能である。

3.2 分光検出系

受光部において、分光器によって分光された受信光は図2のように、各レーザー波長にあわせた専用スリットから光ガイドにより光電子増倍管に導びかれる。今回の実験では主として、 $4880\text{\AA}$ と $5145\text{\AA}$ の2波長を観測したが、 $2\sim 3$ 波長までならばプリズム等の光学素子で導びくことも可能である。分解能は入射スリット幅にもよるが、 $30\text{\AA}$ 程度以上あり、実用上十分である。

3.3 制御・処理系

光電子増倍管からの光電子パルスは増幅、波形整形された後、各波長ごとのマルチチャンネルカウンタユニットに導びかれる。マルチチャンネルカウンタは高速の光電子カウンタと擬似ランダムパルス列のコード長と同じチャンネル数（ $N=4095$ ）をもったメモリーより構成される。変調パルス列のクロック周期を Δt とすると、遅延時間 $k \cdot \Delta t$ （ $k=1 \sim N$ ）である受信光の光電子パルス数が k 番地のメモリーに積算される。実際にはFig. 3に示すように、1クロックの間に4bitのカウントに計数された値は一度シフトレジスタにセットされ、5クロック分のデータが並んだところで、独立した5ブロックの4bitメモリーに同時に加算

される。その後、各ブロックの内容は次々と16 bit長の主積算部に転送、加算される。また、同じ内容を補助メモリーにコピーすることにより、積算中でもその内容を表示したり、コンピューターに転送することができる。回路はTTL (Transistor-Transistor Logic) とCMOSメモリーで組まれているが、このような分割・並列処理により、時間分解能30ns、カウント容量 10^7 counts/s以上を実現している。また、これらのカウント、積算動作と同期して変調信号を送出する機能も付加されている。当然ながら、各波長に対応するマルチチャンネルカウンターの各ユニットも互いに同期して作動する。このマルチチャンネルカウンターの詳細については別途発表の予定である⁹⁾。

積算データの復調処理は、使用した擬似ランダムパルスとの相互相関を求める訳であるが、この処理にはコード長 N に対して、 N^2 回の加減算が必要である。本システムではこれを専用のハードウェア回路で実行することにより、 $N=4095$ に対して1～2秒の処理速度を得ている。

これら一連のエレクトロニクス系は自作のインターフェイスを経て、カウントの開始、終了・相関計算の実行、データの転送などの制御、及び結果の表示、磁気ディスクへのデータの格納等が市販のマイクロコンピューターシステム (NEC PC-9801 F 2) によって実時間で行われる。また、ソフトウェア処理として、フィルターリング操作や R^2 補正等も用意されている。

4. 試作システムの動作実験

Fig. 1の構成でエアロゾルの測定を行った結果をFig. 4, 5に示す。測定は夜間に行い、積算時間は約1分であった。変調のクロック幅は60nsでこれは距離分解能9 mに相当する。また擬似ランダムパルス列の周期は4095チャンネルで、これは36kmの距離に相当する。従って、遠方からのエコーが次の周期にまわり込む誤差は生じない。送信レーザー光の出力は $5145\text{\AA}$ -100 mW, $4880\text{\AA}$ -100mW, $4579\text{\AA}$ -40mWである。Fig. 4, 5は各々 $4880\text{\AA}$, $5145\text{\AA}$ のエコーで、

Fig. 4 Example of an aerosol echo measurement of 4880 Å light in an arbitrary units: (a) is corresponding to A-scope and (b) in relative absorption coefficient corrected by square of R .

Fig. 5 An aerosol echo of 5145 Å; simultaneously measured with the echo of Fig. 4.

各図において(a)はA-scope-(b)は R^2 補正後対数をとったものの相対値である。至近部の強いエコーを避けるため、送信、受信望遠鏡の重なり関数である $Y(R)$ は、この場合、約100 m付近から立ち上がり、250 m以上でほぼ1になるように設定された。(b)の立ち下りの傾きは大気によるレーザー光の減衰係数に相当するわけであるが、1200 m付近に薄い雲があり、それ以遠は意味をなさないので1 km以上では表示されていない。

Fig. 6に約1 km離れた建物から出されるボイラーの排煙を対象としたときのエコーを示す。(a), (b)は各々 $4880\text{\AA}$, $5145\text{\AA}$ に対応する。通常のエアロゾルとは異なる鋭いピークが主として

Fig.6 Example of fume echo measurement in an arbitrary units; (a) and (b) are corresponding to the echo of 4880 Å and 5145 Å, respectively.

蒸気による散乱エコーである。図の(a),(b)において、エアロゾルとの相対強度が異なるのは4880 Å光の減衰が大きいと考えられる。現在のシステムでは、 $Y(R)$ に関する機械部の精度と自由度が充分でないため、絶対的な解析は今後の課題である。

次にFig. 7 にエコー強度の低周波ゆらぎを観測した結果を示す。この実験は上記システムとは異なり、一部の空間のエコーのみを検出するため、送信系と受信系は約5 m離し、受信は $f = 2000\text{mm}$ のカセグレン望遠鏡で行った。観測領域はピント面の紋りで決まるが、およそ数10 cmであった。測定はカウンターによる光子計数モードで行いカウンターのゲート時間を変えて観測する周波数領域を設定した。サンプリング点数は256 チャンネルで、上記のマイクロコンピュータにてFFT処理をした。サンプリング定理よりゲート時間を Δt とすると周波数領

Fig.7 Power spectrum of spatially resolved echo signal.

域として $0 \sim 1/(2\Delta t) (=f_{\max})$ まで計測されるが誤差の大きい高周波成分は無視し、 $0 \sim f_{\max}/2$ 領域のみを有効とし、ゲート時間を100ms, 1 s, 10 s の3段に分けて計測したものを連結したのがFig. 7である。これからわかるように、十分低い周波数領域(0.1 Hz 以下)では $1/f$ 雑音の様相を呈しているが、1 Hz 以上になるとほとんど白色雑音となっている。観測したゆらぎは主として風によるエアロゾルのゆらぎと思われる。

5. おわりに

本論文では多波長連続発振のイオンレーダーを光源とした分光型レーザーレーダーについてその原理、構成及び応用の一例について述べてきた。試作したシステムは今後、絶対測定のためには幾つかの改良が必要である。E. O. M. は高速であるが、変調深度の波長依存性が難であり、各波長について出力光をモニターしながら最適の変調が得られるよう変調駆動のバイアス点を変化させるフィードバックシステムを付加することが要される。また、音響光学的変調器(Acoustic Optical Modulator : AOM)も超音波によるBrag 反射を用いているため、偏向光は波長により反射角度が異なるが、消光率をある程度犠牲にすれば、直進光を利用することにより、波長依存性を避けることができる。 $Y(R)$ の問題に関しては、機械部を超精密に製作することで絶対調整を可能にし、さらに送受

光系金体を (θ , φ) 型スキャナー (方位及びレーザー光の打ち上げ角度が調整可能なもの) に設置することにより任意の空間掃引が行える本格的なレーザーレーダーシステムが完成する。

エアロゾルの観測については、そのゆらぎが比較的低周波成分に偏っているので、数秒程度の積算で十分な S/N 比が得られれば、それを断続的にくり返すことにより、エアロゾルの空間分布の変化が求められよう。本システムはレーザーの分光的特性を相用できるので、エアロゾルの測定以外にも差分吸収 (DIAL) による NO_2 の観測、蛍光分光による植物の状態や海洋汚染の観測等、広い分野にわたって応用可能である。光源として、周波数同調可能な色素レーザーを使用することも今後試みる予定である。

本研究は文部省科学研究費補助金 (58030027) の援助のもとに行われた。

参考文献

- 1) E. D. Hinkley, Ed.: *Laser Monitoring of the Atmosphere* (Springer, New York, 1976).
- 2) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba and K. Sakurai: *Appl. Opt.* **22** (1983) 1382.
- 3) D. L. Price and K. Sköld: *Nucl. Inst. and Methods.* **82** (1970) 208.
- 4) C. V. Nowikow and R. Grice: *J. Phys. E* **12** (1979) 515.
- 5) G. Comsa, R. David and B. J. Schmacher: *Rev. Sci. Instr.* **52** (1981) 789.
- 6) H. Baba, K. Sakurai and F. Shimizu: *Rev. Sci. Instr.* **54** (1983) 454.
- 7) 竹内, 杉本他: レーザー研究 **11**, (1983) 767.
- 8) H. Baba, H. Horiguchi et al.: *J.J.A.P.* **22** (1983) 1643.
- 9) H. Baba et al.: *Rev. Sci. Instr.* submitted for publication.