

# 相干式 CO<sub>2</sub> 激光边缘跟踪雷达光学系统

何 毅 吴 健

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

**提要** 根据目标激光散射回波的基本特性和边缘跟踪概念,设计并制作了一套单管调频连续波(FMCW)体制的相干式 CO<sub>2</sub> 激光雷达光学系统。这套系统的组合像差弥散斑直径约 50 μm,用 0.18 mrad 全发散角的细光束照射目标产生了较好的误差信号。激光束模式较好时,系统接收到了 7.8 km 处房屋的后向散射信号,经扫频窄带滤波后,信号具有较高的信噪比,此时激光器输出功率约为 5 W。

**关键词** 相干激光雷达,边缘跟踪,光学系统

## 1 引 言

1969 年第一套相干式 CO<sub>2</sub> 激光雷达实验系统问世后<sup>[1]</sup>,这个波段的相干探测技术得到高度重视。70 年代红外 HgCdTe 探测器的日益成熟使 CO<sub>2</sub> 激光在测距、高分辨成像、制导和跟踪等多个领域的应用中得到深入研究<sup>[2,3]</sup>。70 年代中后期具有代表性的远距离高精度外差 CO<sub>2</sub> 激光雷达——“火池”雷达近年来仍在作进一步实验<sup>[4]</sup>。其它波长的光雷达系统也得到了重视<sup>[5]</sup>。80 年代在研究系统的同时还开展了相应的目标特性及其受大气影响的研究<sup>[6-8]</sup>。

在“八五”期间,电子科技大学与电子部 11 所合作,外场成功地演示了相干式激光雷达边缘跟踪的新方法,本文介绍演示所用激光雷达光学系统的基本设计思路及主要实验结果。

## 2 目标散射回波特性及系统参数设计

### 2.1 目标散射回波特性

激光照射到目标表面上,在空间任一观察面上形成斑纹图样<sup>[9]</sup>,各点的强度起伏服从负指数统计,光振幅服从瑞利统计。目标运动使不同时刻光束照射的表面位置有差异,即斑纹图样是动态的。设某时刻雷达孔径面上散射斑纹场具有强度分布  $I(x, y, t)$ , 雷达孔径内强度透过函数为  $P(x, y, t)$ , 则落在探测器光敏面上的积分强度为

$$I_0(t) = \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y, t) I(x, y, t) dx dy \quad (1)$$

显然,  $I_0(t)$  是一个时间随机变量,其统计特性决定探测器输出信号的大小和起伏情况。当孔径内具有均匀透过函数  $P(x, y, t) = p$  且考查时间较短时,

$$E[I_0(t)] = \langle I(x, y) \rangle \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y, t) dx dy = \langle I \rangle p S \quad (2)$$

式中  $E$  表示时间平均,  $\langle \rangle$  表示对观察面作平均,  $S$  是雷达接收机孔径面积。(2) 式说明回波积分强度的统计平均与雷达孔径面内的平均强度成正比。

由于外差探测系统的信号幅度正比于光振幅, 即光电流  $i(t) \propto [I_0(t)]^{1/2}$ , 所以

$$E[i(t)] \propto (\langle I \rangle_p)^{1/2} \cdot D \quad (3)$$

$D$  为雷达接收孔径。

利用(1) 式, 不难证明积分强度  $I_0$  服从  $\Gamma$  分布, 其概率密度函数为

$$F(I_0) = \frac{I_0^{N-1} N^N}{(N-1)! [E(I_0)]^N} \cdot \exp\left[-\frac{NI_0}{E(I_0)}\right] \quad (4)$$

$N$  为雷达接收孔径内目标散射光平均斑纹颗粒数, 正比于孔径面积。由此可得光敏面上积分强度衬比度

$$V = \frac{\sigma_{I_0}}{E(I_0)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

其中  $\sigma_{I_0}$  为积分强度起伏均方差,  $E(I_0)$  为积分强度平均值。

$I_0(t) \propto i^2(t)$  代入(4) 式即可得探测器输出信号的概率密度函数。(3) ~ (5) 式说明, 增大雷达接收孔径不仅可以增大信号幅度, 还可以使信号少出现大的起伏。

把激光束的数学表达式代入文献[9] 中斑纹强度自相关函数(2.81) 式, 可以计算出斑纹场平均颗粒半径

$$r = \frac{\lambda R}{\pi w(R)} \quad (6)$$

$\lambda$  为激光波长,  $R$  为目标距离,  $w(R)$  为目标表面上的激光束  $1/e^2$  半径。

对于圆偏振光入射, 目标表面涂层和散射都要使回波退化成椭圆偏振<sup>[10]</sup>。注意到大多数相干探测系统均采用线偏振匹配, 回波在与本振光混频之前, 已经过了光开关的偏振态“选通”滤波(见第3节), 因此上述分析中各量应理解为能产生信号的偏振分量。大气对回波的影响主要取决于湍流的有关效应。在数公里距离内, 雷达接收孔径为 10 cm 量级时, 若湍流不是特别强, 其影响是可以忽略的<sup>[6]</sup>。

## 2.2 总体要求和系统参数设置

相干式激光跟踪雷达采用单管线性调频连续波体制, 频率调制是通过在激光器谐振腔内压电陶瓷晶体上加电压改变谐振腔长度来实现的, 激光器发射功率为 5 W 左右。根据使用时对远场目标分辨能力的要求(配套使用的激光成像雷达角分辨要求达到 0.18 mrad), 由雷达方程和国产探测器性能( $D^* \sim 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ), 同时参考国外类似研究的技术指标, 要保证大于 4 km 的作用距离, 光束发散角不能大, 确定为 0.18 mrad。这是激光跟踪雷达的基本技术指标。

这样一来, 在几公里距离上光束不能将坦克或直升机等目标完全照明。为此总体组提出了“四像限边缘跟踪”的设想方案。所谓边缘跟踪是指用细光束照明目标的部分边缘这种状态下的跟踪过程。它要求光学天线必须能分辨光束内目标散射的变化, 以保证四像限探测器产生反应目标运动的误差信号。

探测器  $D^*$  要达到  $10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , 同时要求其频率响应超过 200 MHz, 光敏面尺寸越大越难以实现。兼顾到光学系统本振光路设计和相位匹配规则<sup>[11]</sup>的要求, 光敏面尺寸确定为  $\phi$  0.33 mm, 分为类似笛卡尔坐标的四个像限, 坐标轴位置为宽 0.03 mm 的两条隔离带。

根据上述两个基本数据并结合对回波特性的分析,我们认为光学系统应满足以下几个要求:

1) 角分辨率优于 0.09 mrad, 以保证四像限探测器产生反应目标运动的误差信号。由瑞利判据, 这要求孔径  $D \geq 144 \text{ mm}$  (取  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ );

2) 利用(5)式, 积分强度 3 dB 衬比度条件要求孔径内平均斑纹颗粒数  $\geq 4$ 。由(6)式, 光束远场发散角为 0.18 mrad 时, 雷达接收孔径面上斑纹半径为

$$r = \frac{\lambda}{\pi[w(R)/R]} \approx 37.5 \text{ mm} \quad (7)$$

所以条件(2) 等效于孔径  $D \geq 150 \text{ mm}$ 。

综合以上两点要求, 把雷达光学孔径确定为  $\phi 150 \text{ mm}$ ;

3) 组合像差弥散斑直径  $\leq 0.1 \text{ mm}$ , 因此当光学系统  $F$  数  $\leq 3.75$  时, 信号光爱里斑分布直径  $\leq 0.1 \text{ mm} + 7.5 \times 0.18 \text{ mrad} \times 75 \text{ mm} = 0.2 \text{ mm} \approx 0.7$  倍光敏面直径。其中 7.5 是天线倍数, 75 mm 是场镜焦距;

4) 本振光在四个像限上分布均匀。

### 3 光学系统

图 1 是按照上述分析的要求, 经多次改进后的光学系统示意图。主要组成元件有 CO<sub>2</sub> 激光器, 可调倍数预扩束器 BET, ZnSe 布儒斯特片  $B$ ,  $\lambda/4$  波片 QWP, 场镜  $L$ , 主天线副镜  $T_1$  和主镜  $T_2$ , 以及四像限 HgCdTe 探测器等。

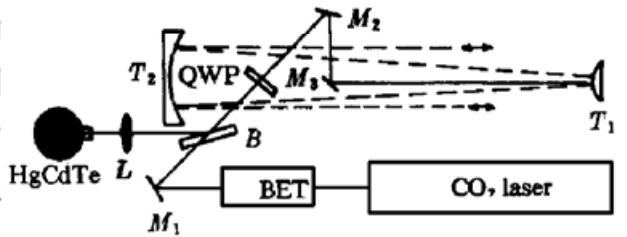


图 1 边缘跟踪激光雷达光学系统

Fig. 1 Optical head configuration of the edge tracking laser radar

激光器发射的调频水平线偏振激光束经预扩束器扩束后, 由反射镜  $M_1$  反射完全透过布儒斯特片  $B$ ,  $\lambda/4$  波片把线偏振变为圆偏振后, 由反射镜  $M_2$  和  $M_3$  精确地反射到主天线副镜  $T_1$  上, 再反射到主天线主镜  $T_2$  上, 形成发散角为 0.18 mrad 的探测光束射向目标。

目标后向散射的椭圆偏振光按原路返回, 再次经过  $\lambda/4$  波片后偏振态还原成近似垂直的线偏振, 布儒斯特片将约 50% 的信号光反射到场镜  $L$ , 同时这部分信号光被修正为完全垂直的线偏振。这个过程可以理解为偏振态“选通”滤波。

为了尽量减少分束片对本振光均匀性的影响, 把  $\lambda/4$  波片与空气的第二界面所反射的光束用作本振光(第一界面所反射的光仍是水平线偏振的, 将完全透过布儒斯特片), 它返回时透出第一界面后是垂直线偏振的, 经布儒斯特片反射后具有与信号光完全相同的偏振态。信号光与本振光一起由场镜  $L$  聚焦到探测器光敏面上混频产生外差信号。

布儒斯特片两个表面所反射的本振光在重叠区域内形成干涉条纹将影响本振光的均匀性。为避免这种情况的出现, 把两个面设置了一个小夹角。这样处理后, 整个光学系统没有分束片。另外, 把主天线主副镜都作成离轴非球面形式, 不仅较好地校正了组合像差, 而且没有后向散射光进入探测器。

用平行光管测试了系统的组合像差, 在场镜焦平面上最小弥散斑直径为  $50 \mu\text{m}$ , 由此可以

推算出边缘跟踪过程中光敏面上信号光爱里斑最大尺度约为 0.15 mm, 优于设计要求。另外通过实际测量得到本光学系统的发射效率(出瞳处激光功率与激光器输出功率之比)达到 0.85, 接收效率(探测器接收激光功率与入瞳处入射激光功率之比)接近 0.4。

信号光在光敏面四个像限中功率的差异反应目标边缘受照射状况, 四个像限输出的对应信号之差就是误差信号。当目标横向运动时误差信号是动态的。通过适当的算法可以判断目标运动方向, 并控制灵巧的跟踪平台实现跟踪。

## 4 实 验

### 4.1 误差信号

在 1048 m 处设置目标, 用凝视状态下逐点移动目标的方法多次测试了四像限探测器输出的误差信号。典型结果如图 2 所示, *C* 和 *D* 表示探测器四个像限中监测目标水平方向移动的两个像限的输出信号, 其差值就是误差信号。由于激光束太细, 受照明目标在探测器上的像斑还没移出 *C* 像限就进入到 *D* 像限, 因此误差信号没有一个“平台”过程(即一个信号不变, 另一个信号增大或减小)。相对光束直径而言误差信号还是比较好的, 产生误差信号的范围占光束直径的比例达到 50%。

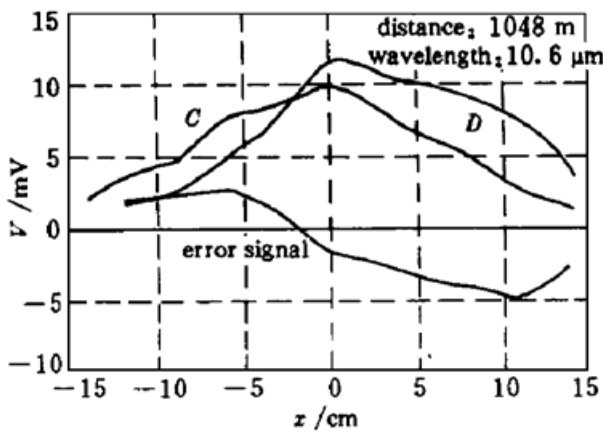


图 2 误差信号

Fig. 2 Error signal

1996 年 5~6 月期间, 这套光学系统与电子部 11 所跟踪平台联调, 在 1048 m 距离上成功地演示了对水平移动平面散射铝板的边缘跟踪。该位置上光束  $1/e^2$  直径约为 200 mm,  $0\sim 0$  直径约为 260 mm, 散射铝板尺寸为 300 mm × 300 mm。光束可以锁定在散射板的左右两个边缘上, 在锁定状态下, 光束中心位于板边缘以内 30~50 mm 位置。经查验证实, 这是国内外首次外场演示相干探测边缘跟踪。

### 4.2 作用距离实验

在整机调试过程中, 作了多次距离试验, 目标为成都市区的房屋建筑、施工塔吊、传呼台天线等。激光器输出模式近似基模时, 收到了 7.8 km 以内所有不同距离上房屋的散射信号。当然, 由于后向散射强度与目标表面材料、粗糙度参数以及相对入射方位等都有关系, 并非距离近的建筑物信号一定大。通常光洁度较差的表面后向散射截面较小, 如红砖墙、灰色河沙墙面等; 光洁度较好的表面散射方向性较强, 如瓷砖墙面等。能见度和光束模式较好时, 7.05 km 和 7.8 km 处两幢楼房的散射信号分别如图 3 (a) 和 (b) 所示。脉冲状信号是经过 100 kHz 带宽扫频滤波并放大后得到的, 信噪比相当好。

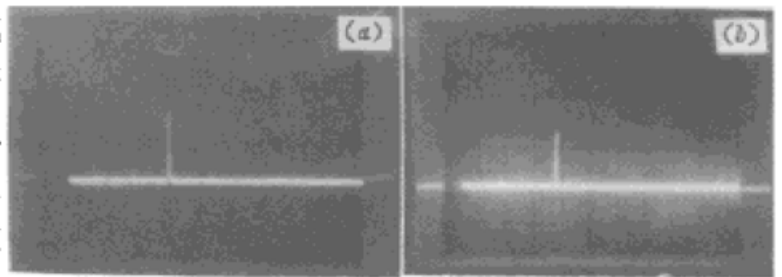


图 3 建筑物后向散射信号(0.5 V/cm)

(a) 距离 7.05 km; (b) 距离 7.8 km

Fig. 3 Backscattered signals from some buildings (0.5 V/cm)

(a)  $R = 7.05$  km; (b)  $R = 7.8$  km

## 5 结 论

本文介绍的相干式 CO<sub>2</sub> 激光跟踪雷达光学系统具有比较优良的像质, 光路中用 1/4 波片第二界面的微弱反射光作本振, 回避了分束片多次反射可能造成的影响, 较好地保证了本振光在探测器光敏面上分布均匀。同时, 这种方案减少了光学器件, 大大地提高了发射效率和接收效率, 使系统在激光功率低、光束质量差的不利条件下实现了较远的作用距离。

**致谢** 衷心感谢“相干式 CO<sub>2</sub> 激光雷达关键技术”课题组所有同事的大力协助。

### 参 考 文 献

- 1 M. C. Teich. Homodyne detection of infrared radiation from moving diffuse target. *Proc. IEEE*, 1969, **57**(5) : 786
- 2 J. L. Meyzonnette, G. Saccomani. Imaging CO<sub>2</sub> laser radar a comparison of three techniques: LFM pulse compression, FMCW, CW. *Proc. SPIE*, 1988, **999**, Laser Radar : 91~ 99
- 3 J. Daugherty, H. Hyman, J. G. McCoy *et al.*. Rapid optical beam steering sensor suite for tactical weapon tracking applications. *Proc. SPIE*, 1994, **2120** : 211~ 217
- 4 M. R. Stiglitz, C. Blanchard. A laser radar experiment. *Micro-wave Journal* (special report), sep., 1990, 57~ 60
- 5 Duane L. Patrick. Laser tracker : Sandia National Laboratories' second generation laser tracking system. *Proc. SPIE*, 1991, **1482** : 61~ 68
- 6 J. Y. Wang. Heterodyne laser radar SNR from a diffuse target containing multiple glints. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(3) : 464~ 476
- 7 J. H. Shapiro. Target reflectivity theory for coherent laser radars. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18) : 3398~ 3408
- 8 D. Letalick, I. Renhorn, O. Steinvall. Measured signal amplitude distributions for a coherent FM-CW CO<sub>2</sub> laser radar. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21) : 3927~ 3938
- 9 J. C. Dandy. Laser Speckle and Related Phenomena. Beijing : Science Press, 1981. 9~ 11 (in Chinese)
- 10 He Ji, Wu Jian, Liu Shenggang. Theoretical study of laser scattering from rough surfaces. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(9) : 1200~ 1208 (in Chinese)
- 11 He Yi. Phase matching of a heterodyne detection system. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(10) : 930~ 934 (in Chinese)

## Optical System of a Coherent CO<sub>2</sub> Laser Radar for Edge Tracking

He Yi Wu Jian

(Research Institute of Applied Physics, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract** An optical system is designed and fabricated on the basis of the target scattering characteristics and the edge tracking concept. This system is the optical head of a frequency modulated continuous wave CO<sub>2</sub> laser radar in which only a single mode CO<sub>2</sub> laser is used. Using a collimator tube, the tested minimum light speckle on the focus plane is 50 μm in diameter. The acceptable error signals are engendered when a slender laser beam of 0.18 mrad angular divergence is directed on the diffuse target edge. The backscattered signals from buildings at 7.8 km are obtained with a fairly good SNR when the laser output is about 5 W.

**Key words** coherent laser radar, edge tracking, optical system