

相干式 CO₂ 激光成像雷达光学系统

何 毅

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

摘 要 根据目标粗糙表面散射回波统计理论和随机相位匹配规则分析了相干激光雷达光学天线参数确定和本振光设计方法, 研制了一套扫描激光雷达光学天线系统, 并应用于单管线性调频脉冲压缩激光雷达接收到了 7.8 km 外房屋的散射回波信号, 信噪比较好, 激光功率约为 5 W。

关键词 激光雷达, 成像, 光学系统, 相干探测。

1 引 言

第一套相干式 CO₂ 激光雷达实验系统成功提取信号以后^[1], CO₂ 激光波段的相干探测技术受到各国高度重视, 相干激光雷达取得了显著进展^[2-7]。由于激光束发散角很小, 高分辨率的激光成像雷达尤其受到重视。相对其它激光器而言, CO₂ 激光相干性好、对人眼安全、大气传输性能优越, 且与近地使用的热像仪波段兼容, 因此 CO₂ 激光有较大外场使用价值。

激光雷达获得成功取决于诸多因素, 作为传感器的光学系统直接影响整机性能。研制相干探测激光雷达光学系统, 除了考虑发射和接收效率等参数外, 更应重视本振光与信号光波前的匹配效果^[8]。目标表面散射产生的信号光是复随机量, 光学系统有效孔径和光束远场发散角等参数的设计必须充分考虑散射回波的统计特性^[9]。介绍 CO₂ 激光雷达的文献很多, 但涉及到光学系统参数确定和设计细节的报道不多。本文较详细地介绍作者的基本思路。

2 光学系统参数确定和本振光设计

2.1 总体要求

国内激光稳频和高重复频率高峰值功率技术等都不成熟, 双管外差体制难以实现。因而本文介绍的相干激光成像雷达采用单管线性调频脉冲压缩体制, 频率的线性调制通过声光调制器来实现。由于激光器输出功率低(5 W 左右), 考虑到作用距离(> 3 km)、视场(2°×1°)、像素(200×100)等指标的要求, 光束发散角定为 0.18 mrad。

探测器灵敏度和高频响应要求光敏面尺寸必须较小。兼顾到光学系统动态扫描和系统组合像差弥散斑大小设计需要, 并参考国外类似系统参数, 光敏面直径定为 0.33 mm。

2.2 根据目标散射回波统计特性确定雷达孔径

目标表面各面元散射的激光分量相干, 因而空间任一观察面上的散射光要形成斑纹图

样^[10]。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：

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

$I_s(t)$ 通常是一个与时间有关的随机变量。若 $P(x, y, t) = \rho$ ，则 t 时刻很短的一段时间内：

$$I_s(t) = I(t) \iint_{\infty} P(x, y, t) dx dy = I(t) \rho S \quad (2)$$

I 表示雷达孔径面内的平均强度。 S 为雷达接收孔径面积， ρ 可理解为接收效率。(2) 式说明回波积分强度与雷达孔径面内的平均强度成正比。

外差探测系统的信号幅度正比于光振幅，即 $i(t) \propto [I_s(t)]^{1/2}$ ，因而

$$i(t) \propto [I(t) \rho]^{1/2} D \quad (3)$$

D 为雷达接收孔径。利用(1)式，不难证明积分强度 $I_s(t)$ 服从 Γ 分布，其概率密度函数为：

$$P_{I_s}(I_s) = [I_s^{N-1} N^N / \Gamma(N) \langle I \rangle^N] \exp[-NI_s / \langle I \rangle] \quad (4)$$

$\langle \rangle$ 表示对观察面作平均。 N 为雷达接收孔径内目标散射光平均斑纹颗粒数。由此可得光敏面上积分强度平均值 $\langle I_s(t) \rangle$ 及其起伏均方差 σ_{I_s} 满足关系(衬比度)：

$$\sigma_{I_s} / \langle I_s(t) \rangle = 1/N^{1/2} \quad (5)$$

通常信号具有各态历经性，系统平均与时间平均等效。(3)~(5)式说明增大雷达接收孔径可以增大信号幅度，同时使信号出现大起伏的概率降低。若孔径 D 比一个斑纹颗粒还小，则(4)式、(5)式中 N 应取 1。把高斯光束的数学表达式代入文献[10]中的斑纹强度自相关函数(2.81)式，可得雷达孔径面上斑纹场平均颗粒半径：

$$r = 2\lambda/\pi\theta \quad (6)$$

λ 为激光波长， θ 为探测光束远场发散角全角。为了避免光电信号出现大的随机起伏，使信号光衬比度达到 3 dB 较合适，因而由(5)式，孔径内平均斑纹颗粒数应 ≥ 4 。把 $\theta = 0.18$ mrad， $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 代入(6)式，得平均斑纹颗粒半径 $r \approx 37.5$ mm，因此光学孔径应为 $\Phi 150$ mm。

2.3 确定信号光像斑总直径

天线内各元件表面后向反射要破坏本振光的均匀性，光学元件应采取离轴结构。直径为 150 mm 的光学天线主镜是从 $\Phi 90$ mm 的圆对称非球面物镜上切割下来的。该对称物镜的 F 数为 2，与次镜构成一个倍数为 7.5 的无焦主望远系统，其设计指标为组合像差弥散斑直径 ≤ 0.1 mm，接近衍射极限。光束发散角要使目标散射回波的衍射中心位置分布一个范围，若场镜焦距为 $f = 75$ mm，则系统等效焦距为 $75 \text{ mm} \times 7.5 = 562.5$ mm，信号光像斑总直径为 $0.1 \text{ mm} + 562.5 \text{ mm} \times 0.00018 \approx 0.2$ mm，能同时兼顾探测器光敏面大小和动态扫描的要求。

2.4 根据信号光与本振光的相位匹配规则确定本振光方案

作者根据相干探测基本理论和真实目标散射回波相位统计特性，从统计的观点重新认识了散射回波相干探测的相位匹配问题^[8]，提出微弱随机相位信号光外差探测的匹配规则是：在光敏面上本振与信号光斑重合范围内，本振光没有 π 相位拐变区域，即光敏面上信号光像斑半径 r_0 和本振光波前半径 $R(p + \lambda/2)$ 应满足临界条件：

$$r_0 \leq [\lambda R(p + \lambda/2) - \lambda^2/4]^{1/2} \quad (7)$$

式中， p 为探测器光敏面离本振光腰位置的距离。该规则得到了实验验证^[8]。根据(7)式，若

已知信号光像斑半径 r_0 (本文的系统中 $r_0 \approx 0.1 \text{ mm}$)，要实现良好的相位匹配，应调整本振光的光腰位置，使 $R(p + \lambda/2)$ 满足要求。因此光学系统中必须设置本振光腰调节装置。当然，这种调节装置必须保证激光束的高斯特性，同时使本振光在光敏面上分布连续均匀。

3 光学系统的实现

3.1 无焦主望远镜

光学系统主望远镜如图1所示，由离轴主镜 T_0 和离轴次镜 T_1 组成，它们是通过在配合设计加工的圆对称主镜和次镜上对应位置切出圆孔径来实现的。主镜孔径为 $\Phi 150 \text{ mm}$ ，其圆对称孔径为 $\Phi 90 \text{ mm}$ ，采用 K9 玻璃作成反射式。次镜孔径为 $\Phi 24 \text{ mm}$ ，其圆对称孔径为 $\Phi 64 \text{ mm}$ ，采用 ZnSe 玻璃作成透射式。在设计次镜时，必须仔细调整其面形，保证扫描过程中光束不出现正后向反射。系统调试时，首先把主镜和次镜的焦点调重合，构成 7.5 倍无焦望远系统。离次镜很近的扫描器把预扩束后的探测光束通过望远系统对观察区域进行扫描，回波近似按原路返回。采用这种折反式结构，一方面保证大的光学孔径不受材料的限制，另一方面又避免扫描过程中后向反射对本振光造成影响。

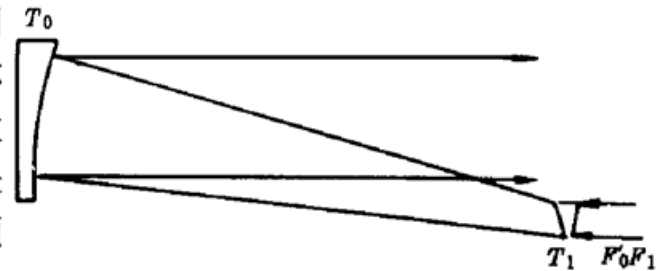


Fig.1 The dominant telescope of the laser radar optical system

3.2 光路原理

光学天线光路如图 2 所示，与边缘跟踪雷达天线光路^[9]存在较大差异。

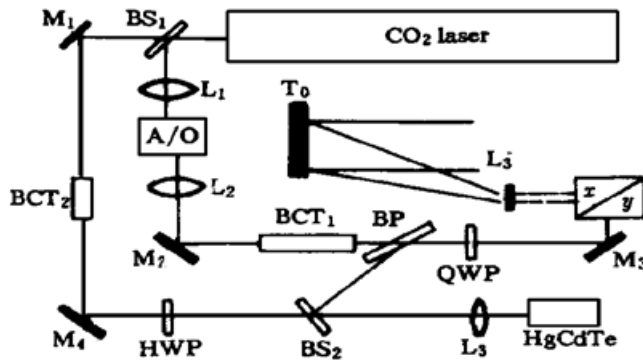


Fig. 2 Optical configuration of the laser radar

光路基本原理是：1) 信号光路。激光器发射一水平线偏振的激光束，经分束片 BS_1 反射，主要的光能透过非球面透镜 L_1 ，聚焦到声光调制器晶体中心。衍射后的 1 级光由透镜 L_2 还原成高斯光束，被反射镜 M_2 反射进入预扩束器 BCT_1 。经过扩束准直的光束完全透过布儒斯特片 BP (用 ZnSe 材料制成)，透过 $\lambda/4$ 波片 QWP 后原来的水平线偏振变为圆偏振，并由反射镜 M_3 反射到 X/Y 扫描器中，扫描光束通过主望远镜 T_1 和 T_0

发射出去。目标奇数次散射产生的后向散射信号光按原路返回，再一次透过 $\lambda/4$ 波片后，其偏振态变为近似垂直的线偏振，约 50% 的光被布儒斯特片 BP 反射到合束片 BS_2 ，这部分光的偏振态被校正成垂直线偏振。2) 本振光路。透过分束片 BS_1 的那部分光被反射镜 M_1 反射到预扩束器 BCT_2 中，经扩束后由反射镜 M_4 反射，透过 $\lambda/2$ 波片 HWP 后，原来的水平线偏振旋转 90° ，变成垂直线偏振，并在合束片 BS_2 上与信号光汇合。3) 外差匹配。精心调整的本振光和信号光在合束片 BS_2 上不仅具有完全相同的偏振态，而且波束轴线重合，一起由非球面场镜 L_3 聚焦于 $HgCdTe$ 探测器光敏面上。通过微调预扩束器 BCT_2 可以调整本振光腰位置，使之达到最佳的相位匹配效果。

与边缘跟踪激光雷达光学天线^[9]不同的是这套天线的信号光路和本振光路是分离的，考虑分束片的影响时可只留意本振光路。在实际设计中，分束片 BS_1 及合束片 BS_2 均为高反片，

都采用一个面镀高反膜、另一个面镀增透膜的方式制作,且其两个面人为地设置了一个夹角,较好地避免了本振光在分束片上的多次反射。较之国外类似系统光路^[3, 5],本光学系统中增加了本振光倍数可调扩束器 BCT₂,实验证明其效果非常显著。

4 实 验

4.1 作用距离实验

作用距离是评价激光成像雷达性能的一个重要指标。所用声光调制器的衍射效率不足 50%,加之光路元件较多,损耗较大,从雷达发射出去的线性调频探测光束峰值功率不到 1 W,研制过程中对作用距离的关注可想而知。最初的光路与国外的类似,本振光路中没有预扩束器,尽管反复调整光路,也难以探测到 1 km 以外的目标。经过仔细分析,作者在本振光路中设置了预扩束器 BCT₂,比较容易地实现了较好的外差匹配效果,并探测到了 7.8 km 以外的建筑物散射信号。

图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 分别是距离为 3143 m、4582 m 和 7800 m 处房屋的回波信号,照片是从模拟示波器上拍摄的。图中第一个脉冲由光学系统内部产生,把它用作计时零点。从图中可见,这些目标回波信号的信噪比比较高。

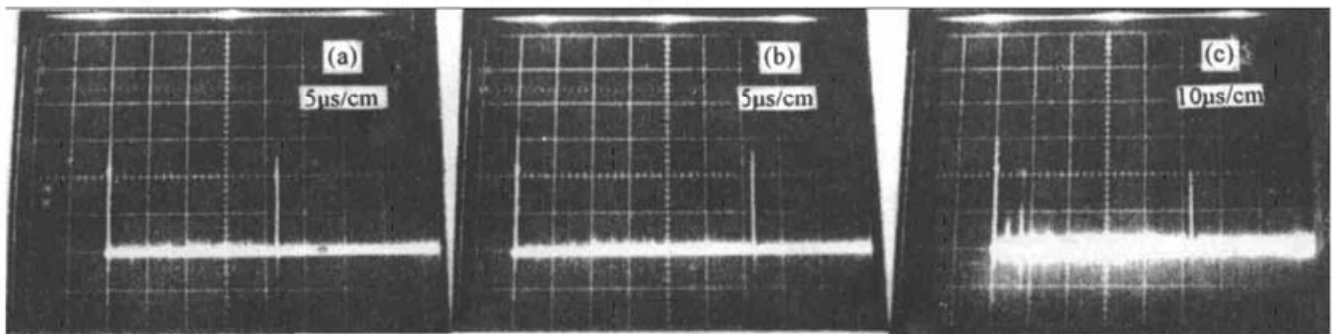


Fig. 3 Photo of chirp pulse signals from three buildings at different distances. (a) $R = 3143$ m, (b) $R = 4582$ m, (c) $R = 7800$ m

4.2 成像实验

成像质量是评价激光成像雷达性能的另一个重要指标。光学天线对探测光束远场发散角的压缩决定扫描成像激光雷达的角分辨率;同时,光学系统对光束扫描角的线性变换是保证图像不失真的基本条件。

原定的成像距离指标为 3 km,像素为 200×100 。每个像素的处理需要一定的时间,因而实际可显示图像的距离在约 3.2 km 以内,更远距离目标的散射回波信号在成像处理时被清零了。所以,尽管光学系统的作用距离较远,能显示出图像的距离却很有限。

不同距离上两个典型目标的雷达扫描像示于图 4。图 4(a) 是 910 m 处一抛物面天线的扫描像,其外形清晰。图 4(b) 是 3143 m 处珠峰宾馆墙壁的图像。可见,雷达成像质量较理想。

结 论 介绍了根据回波统计特性确定相干激光雷达光学系统孔径参数和根据随机相位匹配规则实现本振光与信号光相位匹配的思路和方法。通过设置本振光扩束器调整本振光腰位置,实现了较好的外差匹配效果。采用线性调频脉冲压缩体制,用普通小功率连续波激光器实现了 7.8 km 的探测距离,并且成像质量较好。

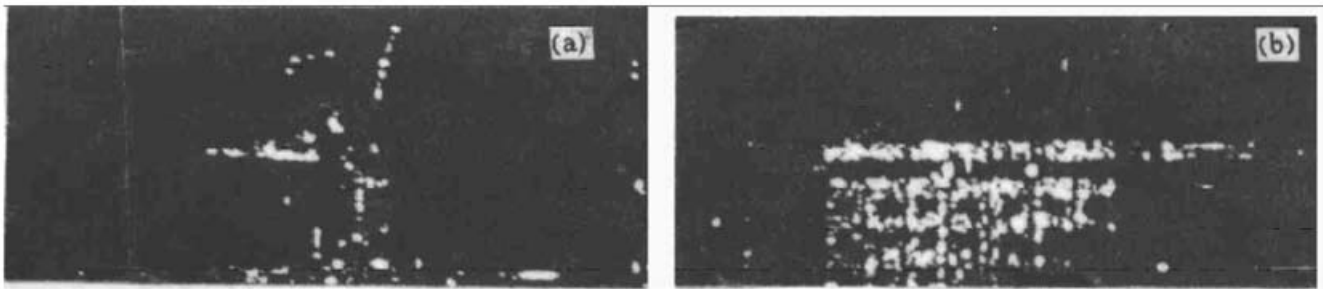


Fig. 4 The laser radar images of two typical targets

参 考 文 献

- [1] Teich M C. Homodyne detection of infrared radiation from moving diffuse target. *Proc. IEEE*, 1969, **57**(5) : 786~ 792
- [2] Daugherty J, Hyman H, McCoy J G *et al.*. Rapid optical beam steering sensor suite for tactical weapon tracking applications. *Proc. SPIE, Laser Beam Propagation and Control*, 1994, **2120** : 211~ 217
- [3] Meyzonnette J L, Remy B, Saccomani G *et al.*. Imaging CO₂ laser radar with chirp pulse compression. *Proc. SPIE, Laser Radar II*, 1987, **783** : 169~ 179
- [4] Ahlberg H, Lundqvist S, Letalick D *et al.*. Imaging Q-switched CO₂ laser radar with heterodyne detection: Design and evaluation. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17) : 2891~ 2898
- [5] Meyzonnette J L, Saccomani G. Imaging CO₂ laser radar a comparison of three techniques: LFM pulse compression FMCW, CW. *Proc. SPIE, Laser Radar III*, 1988, **999** : 91~ 99
- [6] Prutzer S, Biron D G, Quist T M. A high resolution airborne mutisensor system. *Proc. SPIE, Sensors and Sensor Integration*. 1991, **1480** : 46~ 61
- [7] Kranz W. Coherent laser radar for target classification. *Proc. SPIE, Surveillance Technologies*, 1991, **1479** : 270~ 274
- [8] 何 毅. 外差探测系统的相位匹配研究. *中国激光*, 1997, **A24**(10) : 930~ 934
- [9] 何 毅, 吴 健. 相干式 CO₂ 激光边缘跟踪雷达光学系统. *中国激光*, 1998, **A25**(7) : 667~ 671
- [10] 丹蒂 J C 编. 激光斑纹及有关现象(中译本). 北京: 科学出版社, 1981.

Optical System of an Imaging CO₂ Laser Radar

He Yi

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 610054)

(Received 30 December 1997; revised 17 June 1998)

Abstract According to the characteristics of the backscattered light from the rough surfaces of the target far away and the random phase matching rule, the method of coherent optical head coefficients designing is discussed. An optical system is developed that is an optical head of a coherent imaging CO₂ laser radar with chirp pulse compression. In the experimental laser radar only one continuous wave single mode CO₂ laser is used, and the signals from a building of 7.8 km away are obtained with acceptable SNR while the laser output is about 5 W.

Key words laser radar, imaging, optical system, coherent detection.