

腔内线性调频影响激光相干性的实验研究

何 毅 吴 健

(电子科技大学应用物理研究所 成都 610054)

提要 介绍了腔长调制线性调频信号体制引起激光相干性降低的实验研究。对这种影响的机制提出一种理论分析,认为腔长调制可能使激光器谐振腔端镜产生随机振动,从而影响激光的相干长度。

关键词 激光雷达,线性调频,相干性,相干探测

1 引 言

调频连续波(FMCW)^[1,2]是 CO₂ 激光雷达技术的一种重要的信号体制,它采用相干探测方式提取回波信号,对激光相干性要求较高。我们进行的激光雷达关键技术研究^[3],采用腔内调频连续波和腔外声光调频脉冲压缩两种信号体制。作者利用研制的激光雷达天线^[4,5]比较了两种信号体制对激光相干性的影响,发现腔内线性调频体制容易引起激光相干长度减小。

2 实验用光学系统

实验研究使用了两套激光雷达光学天线。

图 1 为腔内线性调频雷达光学系统。它通过在贴有反射镜片的压电陶瓷上加电压,周期性地微调激光谐振腔长度来实现线性调频。其光路原理是:(1) 信号光路。激光器发射的水平线偏振光束经预扩束器 BCT 扩束后,由反射镜 M₁ 反射,完全透过布儒斯特片 BP, $\lambda/4$ 波片 QWP 把线偏振变为圆偏振后,主要的部分透过分束片 BS,由反射镜 M₂ 和 M₃ 精确地反射到主天线副镜 T₁ 上,再反射到主天线主镜 T₀ 上射向目标。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% 的信号光修正为完全垂直的线偏振,反射到场镜 L;(2) 本振光路。把 $\lambda/4$ 波片与空气的第二界面所反射的光用作本振光,它返回并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聚焦到探测器光敏面上混频产生外差信号。

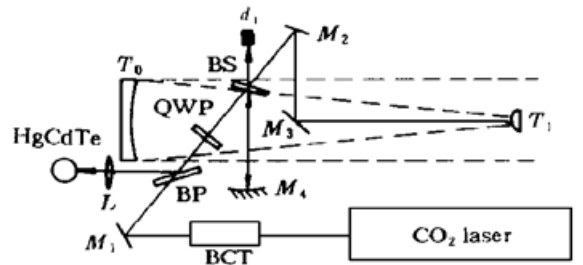


图 1 线性调频激光雷达光学系统

Fig. 1 Optical system of the FMCW laser radar

光学系统孔径为 $\phi 150$ mm, 测得其组合像差弥散斑直径约为 0.05 mm, 发射效率约为 0.8, 接收效率约为 0.4。

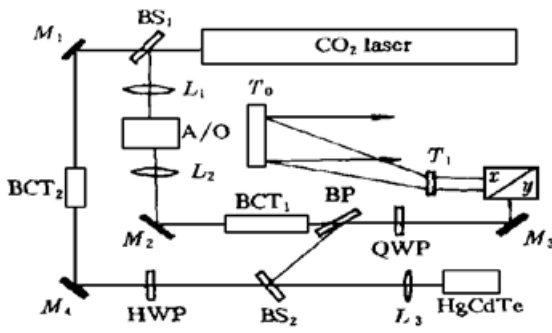


图 2 调频脉冲压缩激光雷达光学系统

Fig. 2 Optical system of the LFM pulse compression laser radar

图 2 是采用腔外声光调频脉冲压缩(LFM pulse compression)信号体制的激光雷达光学系统光路, 其原理是: (1) 信号光路。激光器发射的水平线偏振激光束经分束片 BS_1 反射后, 主要的光能透过透镜 L_1 聚焦到声光调制器晶体中心。衍射的 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 , 扩束准直后完全透过布儒斯特片 BP , 再透过 $\lambda/4$ 波片 QWP 后变为圆偏振, 由反射镜 M_3 反射到 X/Y 扫描器中, 扫动光束通过主天线(T_1 和 T_0) 发射出去。目标的后向散射光按原路返回, 重新透过 $\lambda/4$ 波片后偏振态变为近似垂直的线偏振, 约 50% 的光

被布儒斯特片 BP 校正成垂直线偏振反射到合束片 BS_2 ; (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 后变成垂直线偏振, 并在合束片 BS_2 上与信号光合束, 由场镜 L_3 聚焦到探测器光敏面上产生外差信号。

光学系统孔径为 $\phi 150$ mm, 测得其组合像差弥散斑直径约为 0.08 mm, 发射效率约为 0.25, 接收效率约为 0.4。

3 实验观察

外差激光雷达的作用距离不仅与光学系统孔径、激光功率和信号提取过程等有关, 更取决于激光的短期频率稳定度。这里所说的“短期”是指相干探测时, 探测器响应激光拍频所需的时间约为纳秒量级。如果激光短期频率稳定度带宽为 $\Delta\nu$, 则激光雷达的最大可能作用距离 R_{\max} 应满足

$$R_{\max} \leq \frac{c}{2\Delta\nu} \quad (1)$$

式中 c 为光速。

作者把同一厂家生产的几只激光器安装在图 1 所示的腔内调频连续波激光雷达光学系统上, 分别测试了不同距离选定目标的散射回波信号, 结果示于表 1。每只激光器的操作过程和实验条件相同, 且均选择其信号最强支线 (P_{20})。

表 1 使用不同激光器时, 雷达接收到不同距离上目标的回波信号

Table 1 Signals from selected targets at different distances for 3 different laser tubes

laser	noise/mV	output power/W	1048 m signal/mV	2300 m signal/mV	3143 m signal/mV	4582 m signal/mV
90-8-5	1.5	6.5	20	weak	No	No
96-3-2	4	5.2	160	weak	No	No
96-3-1	3	5	90	6	13	7

比较表中的数据不难发现,90-8-5号激光器的信号情况最差,说明它的相干性受到的影响最大。96-3-2号激光器在1048 m处有很强的回波信号,但距离稍远时信号却迅速降低,到2300 m处几乎没有信号了。96-3-1号激光器功率不高,在1048 m的信号并非最大,然而在2300 m处的信号比较明显,在3143 m处的信号较好,直到4582 m也有不错的信号可以观察到。需要说明的是各距离上选定目标的表面散射特征有明显差异,因而距离近的目标不一定信号强。

用9501号激光器分别在腔内调频和图2所示的腔外声光调频脉冲压缩激光雷达光学系统中使用,作用距离出现了明显的差异。在腔内调频雷达中使用时未能收到3 km以外选定目标的散射信号;然而把它用在腔外声光调频脉冲压缩雷达中时,不仅很容易地探测到了3 km以外所选定目标的回波信号,而且能接收到7800 m距离内各种建筑物散射的回波信号。腔外声光调频脉冲压缩体制不影响激光的相干性,因此信号体制的不同是造成作用距离差异的根本原因。

由此可见,腔长调制线性调频体制要影响激光的相干性。

4 理论分析

腔长调制对激光相干性的影响程度与激光器谐振腔参数、压电陶瓷材料性能以及腔内气压的变化等多种因素有关,但归根到底是由于激光短期频率稳定度降低而造成的。实验时压电陶瓷的机械伸缩幅度 $\ll 1 \mu\text{m}$,激光器谐振腔长度则有450 mm,有理由认为产生这种影响的主要原因应集中在受驱动的端镜上。

设激光器谐振腔长度为 L ,微调腔长使激光频率改变,则

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu$ 为频率改变量, ν 为激光频率。可见,只要随时间线性地改变腔长 L ,就可以线性地调制激光的频率。不妨把线性变化的激光频率写作

$$\nu(t) = \nu_0 + \eta t \quad (3)$$

其中 η 为调频斜率; ν_0 为稳态(未调制)输出的激光频率。

用于相干探测的 CO_2 激光器频率 ν_0 的短期(纳秒量级)稳定度容易超过 10^{-9} 。在我们的实验中, η 约为30 MHz/ms,它对激光的短期稳定度影响甚微。因此,如果激光振荡不受其他因素影响,则短稳带宽 $\Delta\nu \approx \Delta\nu_0$ 。

根据统计光学的观点^[6],不妨把激光场表示为

$$u(t) = u_0(x, y, z) \cos[2\pi\nu(t)t - \theta(t)] \quad (4)$$

式中 u_0 为与激光横模有关的光振幅,频率 $\nu(t)$ 由(3)式表示, $\theta(t)$ 为初相位。如果腔长调制引起谐振腔端镜产生随机振动,那么 $\theta(t)$ 是与时间有关的随机量。

位相的涨落可以看成由激光频率随机涨落引起^[6]。令振荡模式的总位相为

$$\varphi(t) = 2\pi\nu(t)t - \theta(t) \quad (5)$$

把(3)代入(4)式,瞬时频率可定义为

$$\nu'(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) \approx \nu_0 - \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

因而激光短期频差 $\Delta\nu'$ 应包含稳态输出时短期频差 $\Delta\nu_0$ 和端镜随机振动影响 $\Delta(d\theta/dt)$ 两项之

和。所以 $\Delta\nu' > \Delta\nu_0 \approx \Delta\nu$, 也就是说, 端镜的随机振动要引起激光输出频谱展宽, 相应地, 激光的相干长度就减小了。这种频谱展宽也可以直接从统计光学理论导出^[6]。

5 结 论

用激光雷达光学天线, 通过对使用不同激光器时信号情况和作用距离的比较, 以及同一激光器分别用在腔内和腔外调制激光雷达天线中时作用距离的差异, 得出了腔长调制要影响激光相干性的观点。从统计光学出发, 并考虑到调制可能引起谐振腔端镜产生随机振动, 因而理论上可以认为腔长调制有可能使激光频谱展宽, 从而缩短激光相干长度。

参 考 文 献

- 1 Dietmar Letalick, Ingmar Renhorn, Ove Steinvall. Measured signal amplitude distributions for a coherent FM-CW CO₂ laser radar. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21): 3927~ 3938
- 2 Jean Louis Meyzonnette, Georges Saccomani. Imaging CO₂ laser radar, a comparison of three techniques: LFM pulse compression, FMCW, CW. *SPIE*, 1988, **999**: 91~ 99
- 3 He Yi. Study on beam-expanding and field-regard by the optical antenna of a laser radar. *J. UESTC* (电子科技大学学报), 1994, **23**(Suppl. 1): 87~ 91 (in Chinese)
- 4 He Yi, Wu Jian. Optical system of a coherent CO₂ laser radar for edge tracking. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(7): 667~ 671 (in Chinese)
- 5 He Yi, Wu Jian. Optical system of an imaging CO₂ laser radar. *SPIE*, 1996, **2889**: 282~ 287
- 6 Qi Kangnan, Qin Kecheng, Cheng Lu. Introduction to Statistical Optics. Tianjin: Nankai University Press, 1987. Chap. 7 (in Chinese)

Experimental Studies of Influence of Resonant Cavity Length Modulation on the Laser Coherence

He Yi Wu Jian

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

Abstract The experimental studies of influence of laser coherence induced by the resonant cavity length modulation is introduced in this paper. A theoretical analysis shows that the influence mechanism is the random vibration of the resonant cavity mirror induced with the PZT.

Key words laser radar, linearly frequency modulation, coherence, coherent detection