

文章编号: 0258-7025(2003)06-0555-04

# 窄脉冲 CO<sub>2</sub> 相干激光成像雷达 目标距离测量研究

王春晖, 成向阳, 刘丽萍, 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 较详细地研究了窄脉冲外差体制 CO<sub>2</sub> 激光成像雷达的目标距离测量, 指出了影响单个光脉冲测距精度的随机误差和系统误差的主要来源, 并利用现有的实验装置进行远目标测距对比实验, 观测到 CO<sub>2</sub> 激光器所发射的窄脉冲和 2355 m 目标回波波形, 精确地测量出光脉冲飞行的往返时间, 该方法可以用作系统误差校准和补偿标准。

**关键词** 雷达工程; 激光雷达; 外差探测; 激光测距

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## Distance Measurement of a Target with CO<sub>2</sub> Coherence Imaging Lidar of Short Pulse

WANG Chun-hui, CHENG Xiang-yang, LIU Li-ping, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Photoelectron Technique, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150006, China)

**Abstract** This article gives a detail study of short pulse heterodyne system about the target distance measurement with carbon dioxide laser radar. It points out the influence of random error on single pulse distance measure precision and the main source of system error. A contrast experiment of far target distance measure was carried out. The pulse trip-back time was measured.

**Key words** radar engineering; lidar; heterodyne detection; laser distance measure

## 1 引言

激光成像雷达可以对目标的回波强度和距离进行精确测量, 从而获取目标的三维特征图像信息。它所发射的激光束必须进行某种调制, 才能确定光束往返时间, 来实现距离测量。目前, 激光成像雷达常用的发射光束调制类型有: 脉冲调制、单频或多频正弦幅度调制和线性频率调制。从理论上讲, 脉冲调制是实现距离测量的最简单方法, 发射一个光脉冲, 测量该脉冲的往返时间就可以确定距离, 但产生脉冲激光输出的技术却往往是很复杂的, 对于 10.6 μm 波导 CO<sub>2</sub> 激光器, 目前常采用 Q 开关、腔倒空和腔倒空 Q 开关技术<sup>[1~3]</sup>。

## 2 距离测量精度分析

对于电光调 Q 波导 CO<sub>2</sub> 激光器, 其发射的窄脉冲近似看成高斯型脉冲<sup>[4]</sup>, 它的光束调制函数可用以下零均值高斯函数表达

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}f\tau} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \quad (1)$$

式中  $\tau$  为均方脉宽, 即  $h(t)$  下降至最大值的  $e^{-1/2}$  ( $\approx 0.6065$ ) 所需的时间,  $\tau$  表示  $h(t)$  的半宽度,  $f$  为脉冲重复频率。在实际脉宽测量中常用半高全宽度脉宽 ( $\tau_{3\text{dB}}$ ) 和有效带宽 ( $BW_{3\text{dB}}$ ) 来表示。从图 1 中标准高斯脉冲时域及频域响应曲线可以推导出均方脉宽  $\tau$ ,  $\tau_{3\text{dB}}$  脉宽和有效带宽  $BW_{3\text{dB}}$  之间的关系式

收稿日期: 2002-03-18; 收到修改稿日期: 2002-04-27

**作者简介:** 王春晖(1965—), 男, 哈尔滨工业大学光电子技术研究所副研究员, 在职博士生, 主要从事长波红外激光相干探测技术和光纤技术研究。E-mail: wangchunhui02@sohu.com 或 wang\_hit@up369.com

$$\tau = \frac{\tau_{3\text{ dB}}}{2\sqrt{2\ln 2}} \approx 0.4247\tau_{3\text{ dB}}$$

$$BW_{3\text{ dB}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\ln 2/2} \frac{1}{\tau} \approx \frac{0.4413}{\tau_{3\text{ dB}}} \quad (2)$$

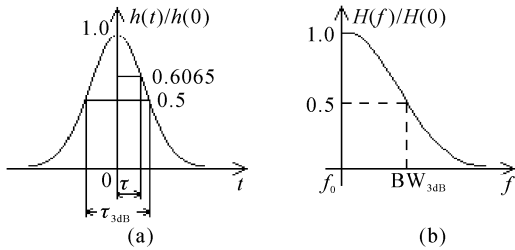


图 1 标准高斯脉冲时域及频域响应曲线  
(a) 时域; (b) 频域

Fig. 1 Curve of standard Gaussian pulse in the time domain (a) and frequency domain (b)

将(2)式代入(1)式,则(1)式可改写成以后常用的光脉冲调制函数表达式

$$h(t) = \frac{0.612}{\sqrt{f\tau_{3\text{ dB}}}} \exp\left[-2.772\left(\frac{t}{\tau_{3\text{ dB}}}\right)^2\right] \quad (3)$$

根据脉冲回波测距原理,激光雷达是通过向目标发射激光脉冲并测量光脉冲飞行的往返时间来确定其距离的。距离等于该介质(大气介质折射率  $n = 1$ )中的光速  $c$  乘以往返时间  $\Delta t$  再除以 2,即目标距离  $R$  为

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (4)$$

激光脉冲外差探测时,回波中频信号的混频光电流和信号交流项(亦即中频信号的瞬时光强和积分光强)为<sup>[3]</sup>

$$i(t) \approx 2\alpha\eta_H^{1/2} \sqrt{P_S P_{LO}} a(t) \cos[\omega_{if}t + P(t)] \times \frac{0.612}{\sqrt{f\tau_{3\text{ dB}}}} \exp\left[-2.772\left(\frac{t-2R/c}{\tau_{3\text{ dB}}}\right)^2\right]$$

$$I(t) \approx \alpha^2 \eta_H P_{LO} P_S a^2(t) \frac{0.375}{f\tau_{3\text{ dB}}} \times \exp\left[-5.544\left(\frac{t-2R/c}{\tau_{3\text{ dB}}}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为光脉冲传输的衰减系数;  $\eta_H$  为系统的外差量子效率;  $a(t), P(t)$  分别为光脉冲的随机振幅和位相;  $P_S, P_{LO}$  分别为本振光和信号回波光功率;  $\omega_{if}$  为信号光与本振光的差频频率。

激光雷达对距离的测量常用分辨率、精度以及模糊性来表征。每一个参数都与激光雷达的设计特性以及激光雷达回波的信噪比密切相关。

距离分辨率是指测量沿同一视线上两个分离物

体间距离的能力极限,而不是指当分离物体的角度可分辨时,测量它们之间在距离上差异的能力。为确定一个目标在出现一个或几个其他目标时能否被探测,可能需要对模糊函数及其旁瓣做详细的测量。它与激光雷达发射光束的调制波形有关。对于高斯光脉冲,其距离分辨率  $\rho$  ( $-3\text{ dB}$  宽度)取决于发射脉冲的有效带宽  $BW_{3\text{ dB}}$ ,即

$$\rho \approx \frac{c}{2BW_{3\text{ dB}}} = 1.133c\tau_{3\text{ dB}} \quad (6)$$

窄脉冲激光回波测量的目标距离误差由两部分组成:一是随机误差,它是服从统计规律的,表征多次测距数据的分散程度,是设备本身精度高低的标志;二是未修正的系统误差,即所谓系统误差的残余,它是一种固定的或服从一定函数关系的误差。原则上,系统误差是可以消除的,但由于采取的修正方法不同,或多或少地要残留下一部分。误差常用测量值的标准差(均方根值)  $\sigma_R$  表示,  $E(R)$  为概率分布,即

$$\sigma_R = E(R^2) - [E(R)]^2 \quad (7)$$

逻辑电路中的时钟和激光器发射的光脉冲一般是不同步的,因此前一次记录的距离计数脉冲将是下一个时钟脉冲的跃迁点,发生在发射激光脉冲之后。这就引入计时误差,其值可以认为从零到时钟周期之间的任何值,概率密度为均匀分布。例如标准等概率分布函数为  $E(0,1)$ ,其期望值为  $1/2$ ,均方值为  $1/12$ ,因此计时误差引起的均方距离误差  $\sigma_{R1}$  为

$$\sigma_{R1} = \frac{c}{4\sqrt{3}f_c} \quad (8)$$

式中  $f_c$  为距离计数器的振荡频率。

与式(8)类似的等概率分布的随机误差还有:计数器有限分辨率引入的误差( $l_0/4\sqrt{3}$ ,  $l_0$  为计数器分辨率);回波脉冲上升时间随机分布引起的误差( $c\tau_R/4\sqrt{3}$ ,  $\tau_R$  为脉冲前沿时间)等等。

在激光外差探测中,必须考虑回波光场的散斑效应,其回波光强分布服从 Rice 统计规律,这样一来在阈值检测电路中高幅度脉冲比低幅度脉冲提前跃过阈值,所指示的目标距离较短,引起探测随机误差,它是 SNR, 阈值以及激光脉冲瞬时形状的函数。因此探测误差引起的均方距离误差  $\sigma_{R2}$  的理论值为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_{R2} = \frac{c}{2B\sqrt{2\text{SNR}}} \quad (9)$$

式中  $B$  为系统接收带宽; SNR 为探测信号回波的功

率信噪比。

系统误差主要来源于:在计数器时标振荡器周期  $T_c$  (相应频率为  $F_c$ ) 时间内,光在真空中传播的距离与计数器分辨率不等引起的误差;大气折射率造成的实际光速不等于真空光速引起的误差;系统时间延时引入的误差。在计算系统延时误差时,必须考虑回波延时的两种定义方法:1) 以目标回波脉冲前沿作为它到达时刻;2) 以回波脉冲中心作为它到达时刻。这两种定义差异所引起的固定延时差为  $\tau_{3\text{ dB}}/2$ 。

从以上测距误差分析来看,总误差为随机误差(如  $\sigma_{R1}$ ,  $\sigma_{R2}$  等)和系统误差的平方和,即均方距离误差由(7)式写成如下形式

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2 + \sigma_{R3}^2 + \sigma_{R4}^2 + \dots} \quad (10)$$

随机误差源中主要是计时量化误差  $\sigma_{R1}$  和探测误差  $\sigma_{R2}$  起作用,其他可能存在随机误差相对于这两个误差数值都很小,可忽略不计。随机误差在光脉冲测距过程中是必须考虑的因素,是无法校正和补偿的,而系统误差因素在信号检测电路中,可以采取相关技术措施进行校正和补偿,使其小于随机误差。因此,最终影响测距精度的决定因素是随机误差。

### 3 实验结果与分析

实验装置见参考文献[6]中的图 1,其中 pulsed-CO<sub>2</sub> laser 为腔内 CdTe 电光调 Q 波导 CO<sub>2</sub> 激光器,作为主振激光器发射脉冲激光,脉宽  $\tau_{3\text{ dB}} = 293\text{ ns}$  (如图 4(a), (b)), 峰值功率  $P_{\text{peak}} = 300\text{ W}$ , 重复频率  $f = 41\text{ kHz}$ ; CW-CO<sub>2</sub> laser 为光栅选支 (P20) 连续输出波导 CO<sub>2</sub> 激光器,作为本振激光器与信号回波混频,平均功率  $P_{\text{av}} = 1.5\text{ W}$ , 同时在其输出窗镜加装 PZT 晶体用于把外差信号的中心频率调谐到 60 MHz, 以便可探测静止目标; Detector 为光伏 HgCdTe 探测器,它的响应截止频率为 300 MHz; Brewster plate 为 ZnSn 布鲁斯特窗片,它与  $\lambda/4$  和  $\lambda/2$  波片构成偏振隔离匹配光学系统,使目标回波与发射光偏振隔离,同时使线偏振的本振光与回波在探测器敏感面上保持偏振匹配; beam expander 为伽里略型预扩束镜,将  $\phi 2.3\text{ mm}$  的出射光斑放大到  $\phi 20\text{ mm}$ ; XY-scanning mirror 为检流计式振镜,将  $\phi 20\text{ mm}$  的光斑通过 telescope (开普勒型望远镜) 快速扫描,并放大到  $\phi 100\text{ mm}$  以  $0.26\text{ mrad}$  的角分辨率发射到探测目标上。

在图 2 所示的信号检测系统中,通过测量单脉

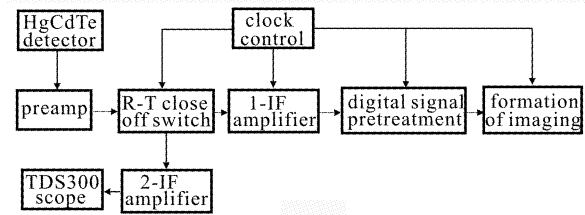


图 2 信号检测系统

Fig. 2 Signal examination system

冲往返时间来确定目标距离。HgCdTe 探测器前置放大器后加一个克服后向散射光的隔离开关(距离波门),因任何光学系统的透过率都不可能为 100%,存在比较强的后向散射光,它将压制目标信号回波,采用距离波门衰减近距离散射光,目标回波延时后经中频放大。该距离波门为光脉冲前沿触发工作方式(波门起始延时 62 ns),关断时间 300~4000 ns 连续可调,开关通断比 54 dB。隔离开关之后并联两个中频放大器:一路采用 AGC 放大,A/D 采样,送给数字预处理器和图像处理器显示目标强度和距离图像;二路中频放大接示波器,精确测量发射光脉冲和目标回波的波形和延时。脉宽  $\tau_{3\text{ dB}} = 293\text{ ns}$  时,由公式(2)可计算光脉冲有效带宽  $2BW_{3\text{ dB}} \approx 3\text{ MHz}$ ,根据采样定理确定 A/D 采用速率为 10 MHz。

在图 2 中还采用距离选通门技术给出目标距离信息。时钟控制系统给激光器一个发射光脉冲的发射触发信号并同时预置一个距离波门(接收触发)。发射触发信号发出后,激光器需要  $1.5 \sim 2\ \mu\text{s}$  的脉冲建立时间才能产生光脉冲(发射光脉冲)。检测系统参数:最小功率信噪比  $\text{SNR} = 10$ ,中心频率  $f_c = 60\text{ MHz}$ ,接收带宽  $B = 10\text{ MHz}$ ,脉宽  $\tau_{3\text{ dB}} = 293\text{ ns}$ ,计数器时钟  $f_c = 10\text{ MHz}$ 。将这些参数代入公式(8),(9),(11),可计算出距离测量的随机误差  $\sigma_R = 14.4\text{ m}$  (计时量化误差和脉冲探测量化误差  $\sigma_{R2} = \sigma_{R1} = 4.3\text{ m}$ ,探测误差  $\sigma_{R3} = 3.4\text{ m}$ ,  $\sigma_{R4} = 12.6\text{ m}$ ,其他随机误差均远远小于这三个因素)。接收触发信号(预置距离选通门时间)连续可调,大范围搜索目标回波,搜索到回波后,数字预处理器采用峰值检测,根据上面理论计算的随机误差,确定采集点为 8 个,每点门宽为 10 ns (距离分辨和距离精度 12 m)。

图 3 中的方波信号为发射光脉冲的触发信号(前沿触发),很高的尖峰为调 Q 激光脉冲波形,它前方的小尖峰为激光器射频高压干扰,两个尖峰之间的延时为激光脉冲建立时间。实验中,该路给出某一

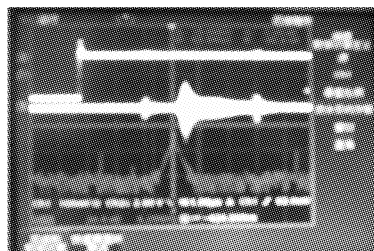


图3 接收触发波形、脉冲(每格  $5 \mu\text{s}$ )

Fig. 3 Received signal of triggering shape pulse wave  
(each mesh  $5 \mu\text{s}$ )

远处目标的回波延时的平均值  $15.58 \mu\text{s}$ (2337 m)。

图4(a)~(c)给出从前放直接测量到目标信号回波波形和延时的实验结果。由于带宽  $B = 300 \text{ MHz}$ , TDA300 示波器的采样速率为  $1 \text{ GHz}$ , 在不考虑激光在大气中传输起伏和目标纵深等因素引起

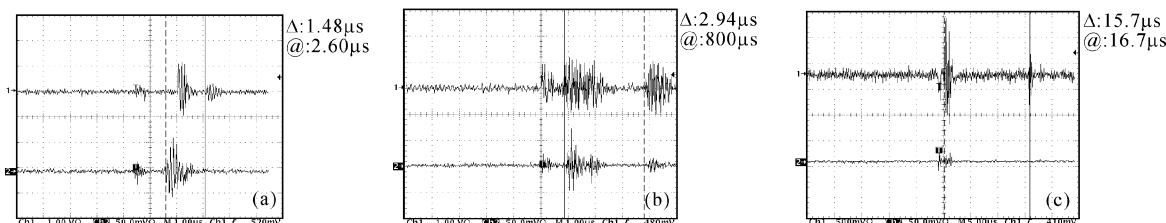


图4 发射脉冲和信号回波波形

Fig. 4 Shot and received shape of the pulse wave  
(a)  $1.48 \mu\text{s}$ ; (b)  $2.84 \mu\text{s}$ ; (c)  $15.7 \mu\text{s}$

## 4 结 论

综上所述,窄脉冲  $\text{CO}_2$  相干激光成像雷达在进行目标距离信息提取过程中,为了实现快速实时图像显示,一般大多采用单脉冲测距技术,这是一种以牺牲测距精度为代价的快速三维成像技术。根据目前高性能价格比 A/D 采样等电子技术的发展趋势,采用高速 A/D,局部像元叠加多脉冲检测提高信噪比,以及  $\text{CO}_2$  激光器腔倒空 Q 开关技术进一步压缩脉宽,可以大幅度提高窄脉冲体制  $\text{CO}_2$  激光成像雷达的测距精度,从而提高其距离像的分辨率。

### 参 考 文 献

1 Zhaoshuo Tian, Qi Wang, Chunhui Wang. Investigation

光脉冲的展宽情况下,随机误差主要由公式(9)确定(约  $0.1 \text{ m}$ ),因此可以认为第二路检测到回波脉冲基本上复原发射光脉冲和其回波的波形形状,它所测量的光脉冲往返延时相对于第一路来讲是精确的。在图4(a),(b),(c)中左侧不完整的波形为未被隔离干净的发射光脉冲和干扰,右侧为信号回波的完整波形。测量结果:图4(a)信号回波延时  $1.48 \mu\text{s}$ (约  $222 \text{ m}$ );图4(b)信号回波延时  $2.84 \mu\text{s}$ (约  $426 \text{ m}$ );图4(c)是图3的同一目标,信号回波延时  $15.7 \mu\text{s}$ (约  $2355 \text{ m}$ )。同一目标总的延时差  $0.12 \mu\text{s}$ ( $18 \text{ m}$ )。

图3与图4(c)是对同一目标距离测量的对比实验。如果认为图4(c)的测量结果是准确的,那么图3测量的结果与图4(c)相比,误差  $0.12 \mu\text{s}$ ( $18 \text{ m}$ )。实验表明,窄脉冲  $\text{CO}_2$  激光成像雷达的距离信号处理系统达到设计要求。

of the pulsed heterodyne of an electro-optically Q-switched radio-excited  $\text{CO}_2$  waveguide laser with the channels [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18):3033~3037

2 I. Renhorn, O. Steinvall. Performance study of a coherent laser radar [C]. *SPIE*, 1983, **415**:39~50

3 Albert H. Reynolds.  $\text{CO}_2$  radar modulation trade-off studies [C]. *SPIE*, 1983, **415**:155~165

4 Wang Chunhui, Wang Qi *et al.*. Characteristics of Q-switched  $\text{CO}_2$  short-pulse heterodyne signal with CdTe electrooptic modulation [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(12):1085~1088 (in Chinese)

5 D. K. Barton. Radar System Analysis [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979. 330~353 (in Chinese)

6 Wang Chunhui, Wang Qi. Analysis of 1st order statistic specialty of  $\text{CO}_2$  laser pulse heterodyne detector [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(5):476~480 (in Chinese)