

# 基于卡尔曼滤波的高精度相干激光测距方法

赵潇<sup>1</sup>, 杨海马<sup>1\*</sup>, 强佳<sup>2</sup>, 刘瑾<sup>3</sup>, 王建宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

<sup>3</sup>上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620

**摘要** 以单频-线性频率调制连续波(S-LFMCW)激光作为发射信号,提出了一种基于卡尔曼滤波的高精度相干激光测距方法。对回波信号与本振信号进行拍频测量,获得了频差,通过模数转换和数字信号处理,利用频差信号解算出目标的距离和速度。最后采用卡尔曼滤波算法对测量值进行数据融合,获得了高精度的目标距离估计值。实验结果表明,所提方法适用于大范围动态相干测距激光雷达系统,系统的有效测距范围为8 m~2.7 km,测距精度在0.1 m以内。

**关键词** 测量; 遥感; 相干激光雷达; 调频连续波; 卡尔曼滤波; 数据融合

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1412001

## High-Precision Coherent Laser Ranging Method Based on Kalman Filtering

Zhao Xiao<sup>1</sup>, Yang Haima<sup>1\*</sup>, Qiang Jia<sup>2</sup>, Liu Jin<sup>3</sup>, Wang Jianyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3</sup>College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract** A high-precision coherent laser ranging method based on Kalman filtering is proposed using a single-linear frequency modulated continuous wave (S-LFMCW) laser as the transmitting signal. By measuring the beat frequency between the echo signal and the local oscillator signal, the frequency difference is first obtained. The distance and speed of the target are then calculated with this frequency difference signal through analog-to-digital conversion and digital signal processing. Finally, the Kalman filter algorithm is used to fuse the measured data, and the target distance estimation is obtained with high accuracy. The experimental results show that the proposed method is suitable for large-scale dynamic coherent laser ranging lidar systems. The effective ranging range of the system is 8 m to 2.7 km, and the ranging accuracy is within 0.1 m.

**Key words** measurement; remote sensing; coherent lidar; frequency modulated continuous wave; Kalman filter; data fusion

**OCIS codes** 120.2440; 280.3640; 060.2630; 120.1880

## 1 引言

在大范围动态测距的同时提高测距的精度是航空航天、精密测量及国防等领域非常重要的研究课题。激光雷达凭借其方向性好、探测范围广、精度高、相干性强等优点,在测距性能方面有着显著优势。与脉冲激光雷达相比,调频连续波(FMCW)激

光雷达具有较高的距离分辨率与抗干扰能力<sup>[1-6]</sup>。研究人员搭建了调频连续波激光测距光路,设计了半导体激光光源反馈控制系统,测距分辨率为1.5 mm<sup>[7]</sup>。Iiyama等<sup>[8]</sup>利用单模垂直腔面发射激光器搭建了测距系统,空间测距分辨率达到了250 μm,测距范围为1 m。Baumann等<sup>[9]</sup>利用光学频率梳对激光器的光频进行校正,将测距分辨率提

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-03-24; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金(U1831133, 61701296)、上海市自然科学基金(17ZR1443500)

\* E-mail: snowyhm@sina.com

高到了  $130\ \mu\text{m}$ , 重复精度达到了  $6\ \text{nm}$ 。国内学者采用等光频间隔重采样技术以及相位差测频算法, 在  $8.3\sim 9.3\ \text{m}$  的测距范围内将 FMCW 激光测距的精度提升至  $100\ \mu\text{m}^{[10-11]}$ 。但是以上方法难以应用于大动态范围激光雷达测距系统中。由于激光的波长短, 而多普勒频移量与目标速度大小呈正比, 与波长呈反比, 在相同的信号处理方式下, 与微波雷达相比, 激光雷达获得的速度信息精度高好几个量级。也正是因为激光雷达对目标速度的敏感特性, 若采用微波测距雷达常用的线性调频连续波(LFMCW)测量方法, 目标的距离差频和多普勒差频将会耦合在一起, 从而难以提取目标的距离测量结果。2011年, 美国国家航空航天局(NASA)的自主着陆和避险技术(ALHAT)项目采用三角波调频激光雷达, 在距离目标星体  $2.5\ \text{km}$  处测量了着陆器相对于地面的速度和距离信息, 测距的精度为  $1\ \text{m}^{[12-13]}$ 。中国科学院上海物理技术研究所研究出了一种双频双调制双本振(DFDMDL)对称三角线性调频相干测距测速激光雷达系统<sup>[14-15]</sup>, 该系统可以高频次地解算出激光雷达的距离信息和速度信息。受到激光调频带宽范围和系统资源消耗的限制, 目前大范围 FMCW 激光雷达的动态测距精度有限。

本文提出了基于卡尔曼滤波的单频-线性频率

调制连续波(S-LFMCW)相干激光测距方法, 采用单频激光和线性频率激光循环调制的方式进行相干探测, 方便地解算出目标的距离及速度值。并且在几乎不增加系统功耗的前提下, 通过卡尔曼滤波算法对雷达测量值进行数据融合, 获得了连续的高精度的测距估计值。经实验验证, 本文所提出的方法有效提高了 S-LFMCW 激光雷达的测距精度, 数据融合后的测距精度提升了一个数量级以上, 并且达到了较好的滤波效果。

## 2 S-LFMCW 相干激光探测系统

### 2.1 S-LFMCW 相干激光探测系统结构

S-LFMCW 相干激光探测系统的结构如图 1 所示: 采用频率调制(FM)信号发生系统产生 S-LFMCW 信号<sup>[16]</sup>, 并使用该信号对发射激光进行调制, 调制后的激光经分束器后被分为两束, 其中能量较大的一束激光用于发射, 另一束作为本振信号; 激光发射系统发射 S-LFMCW 激光, 回波激光经过同轴收发望远镜及激光接收系统并被接收; 将回波光信号和本振光信号作为  $90^\circ$  光学桥接器的输入, 混频后的信号再依次通过平衡探测器及高速模数转换器(A/D), 最后由数字信号处理模块解算出目标的距离及速度。

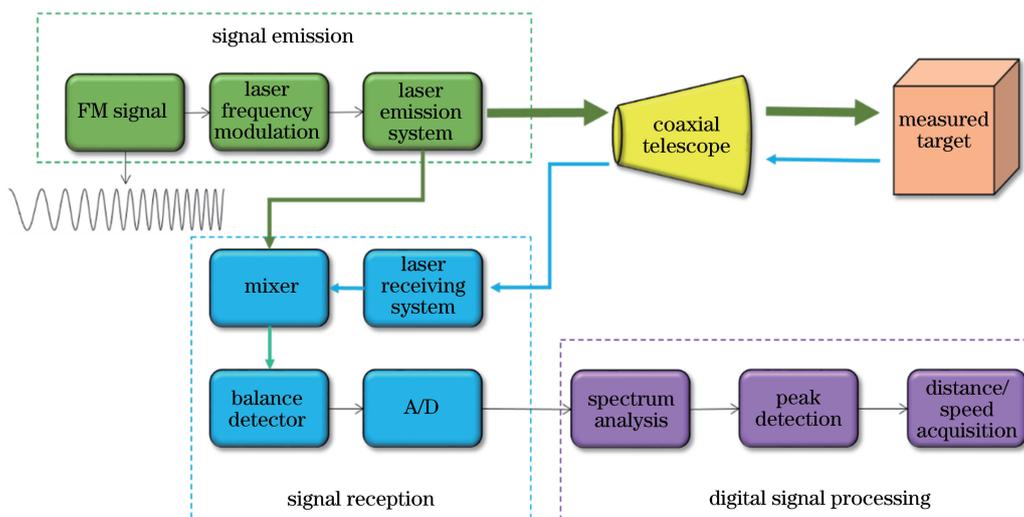


图 1 S-LFMCW 相干激光探测系统原理图

Fig. 1 Schematic of S-LFMCW coherent laser detection system

### 2.2 S-LFMCW 相干激光探测系统原理

图 2 是相干激光探测的原理简图, 回波光和本振光经过自由空间或者光纤光路实现光束的重叠, 两束光入射到光电探测器光敏表面时, 二者模式、波前、偏振、入射角、光束直径等一致, 以实现较高的相

干探测效率<sup>[17]</sup>。本振光信号与回波光信号在相干拍频测量的时候电场互相叠加, 在光敏面上形成的电场  $E$  为

$$E(t_p) = E_R \cos(\omega_R t_p + \varphi_R) + E_L \cos(\omega_L t_p + \varphi_L), \quad (1)$$

式中:  $t_p$  为光电探测器的探测时间;  $E_R$ 、 $E_L$  分别为回波光和本振光的振幅;  $\omega_R$ 、 $\omega_L$  分别为回波光和本振光的角频率;  $\varphi_R$ 、 $\varphi_L$  分别为回波光和本振光的初始相位。

根据光电探测器的平方律特性,探测器的输出电流  $i$  为

$$i(t_p) = R_1 E^2(t_p), \quad (2)$$

式中:  $R_1$  为探测器的响应率 ( $A \cdot W^{-1}$ )。

将(2)式展开并舍去无法被探测器响应的高频

分量,得到

$$i(t_p) = R_1 P_R + R_1 P_L + 2R_1 \sqrt{P_R P_L} \cos[(\omega_R - \omega_L)t_p + (\varphi_R - \varphi_L)], \quad (3)$$

式中:  $P_R$ 、 $P_L$  分别为回波光功率和本振光功率;  $R_1 P_R$ 、 $R_1 P_L$  为零频分量;  $2R_1 \sqrt{P_R P_L} \times \cos[(\omega_R - \omega_L)t_p + (\varphi_R - \varphi_L)]$  为本振信号与回波光信号之间的差频。

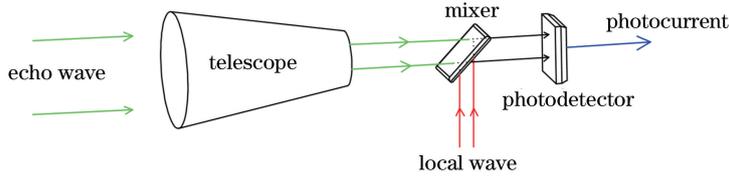


图 2 相干激光探测原理简图

Fig. 2 Principle of coherent laser detection

由于激光的波长短,在激光动态相干探测时回波信号将会获得较大的多普勒频移,采用 LFM CW 系统进行探测难以解算出目标的距离。本文采用单频信号和线性调频信号交替调制连续波(S-LFMCW)并进行测速测距。在 S-LFMCW 系统下,根据 2.2.1 节通过相干探测获得的回波信号与本振信号间的差频,可以方便地解算出目标的速度及距离。

假设 S-LFMCW 相干激光探测系统发射的激光频率为  $f_0$ ,发射光和接受光的单位法向量分别为  $e_e$ 、 $e_r$ ,被测目标的运动速度为  $v$ ,且目标运动方向和激光发射方向之间的角度为  $\theta$ ,根据相对论的变换式<sup>[18-19]</sup>可得,目标接收到的激光频率  $f_1$  为

$$f_1 = f_0 \left( 1 + \frac{v \cdot e_e}{c} \right) = f_0 \left( 1 + \frac{|v| \cos \theta}{c} \right), \quad (4)$$

S-LFMCW 相干激光探测系统接收到的激光频率  $f_2$  可近似为

$$f_2 = f_1 \left( 1 - \frac{v \cdot e_r}{c} \right) = f_0 \left( 1 + \frac{2|v| \cos \theta}{c} \right), \quad (5)$$

多普勒频率  $f_d$  可表示为

$$f_d = f_2 - f_0 = f_0 \frac{2|v| \cos \theta}{c} = \frac{2|v| \cos \theta}{\lambda}, \quad (6)$$

式中:  $c$  为光速;  $\lambda$  为发射激光波长。

如图 3 所示, S-LFMCW 相干激光探测系统采用周期为两个线性调频周期的连续信号和等时长的单频调制信号对激光进行交替调制。其中,发射激光在进行单频调制时,系统探测得到的多普勒频移为  $f_D$ ;发射激光在进行线性频率调制时,系统探测得到的差频信号为  $f_R$ 。

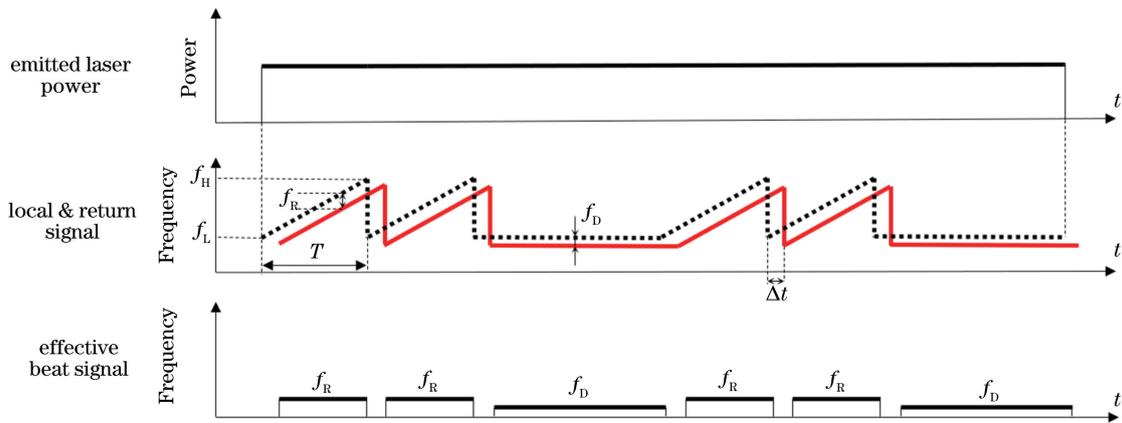


图 3 S-LFMCW 测距原理简图

Fig. 3 Principle of S-LFMCW ranging

根据(6)式可得目标在激光径向的速度  $v_r$  为

$$v_r = \frac{f_D \lambda}{2}. \quad (7)$$

通过对  $f_R$  和  $f_D$  作差,即可获得与发射激光飞行时间呈正相关的差频信号  $f_r$ ,再结合系统的连续线性调频周期  $T$  和调频带宽  $B$ ,即可解算出目标的距离  $R$  为

$$R = \frac{f_r T c}{2(f_H - f_L)} = \frac{(f_R - f_D) T c}{2B}, \quad (8)$$

式中: $f_H$ 、 $f_L$  分别为调频的上、下限频率。

### 3 S-LFMCW 相干激光探测系统的测距精度优化

#### 3.1 S-LFMCW 相干激光探测系统的精度分析

在 S-LFMCW 相干激光探测系统中,测距的精度受到信号调频直线度、调频带宽、回波采样率、信号处理的采样点数等因素的影响。在不考虑目标形状及飞行姿态对回波特性的影响<sup>[20]</sup>,且系统的调频直线度较好的情况下,系统的测距精度  $\Delta R$  为

$$\Delta R = \frac{T f_s c}{2BN}, \quad (9)$$

式中: $f_s$  为系统模数转换采样率; $N$  为系统信号处

理的采样点数。

结合(7)式,得出 S-LFMCW 相干激光探测系统测速的精度  $\Delta v_r$  为

$$\Delta v_r = \frac{f_s \lambda}{2N}. \quad (10)$$

激光的调频带宽  $B$  受到光学器件的限制,根据(9)式可知,FMCW 激光测距系统的测距精度  $\Delta R$  有限。在大范围动态测距时,需要通过提高扫频周期  $T$  来获得远距离目标的距离信息,但会导致测距精度  $\Delta R$  较低。而通过增加信号处理的采样点数  $N$  来提高测距精度,会导致处理器资源消耗量的显著增加。由于激光波长短,根据(10)式可知,S-LFMCW 相干激光探测系统的测速精度  $\Delta v_r$  较高,且  $\Delta v_r$  不会受探测目标范围的限制,故该系统在大范围动态探测时仍然具有较高的测速精度。

表 1 所示为基于 LFMCW 的测速测距精度对比。从 S-LFMCW 激光雷达和 LFMCW 微波雷达的测速测距精度数据对比可以得出:在调频带宽相同的情况下,两者具有相同的测距精度;激光雷达具有较高的测速精度  $\Delta v_r$ ,而微波雷达对速度不敏感。

表 1 LFMCW 测速测距精度对比

Table 1 Accuracy comparison of speed and range measurement based on LFMCW

Radar type	$\lambda$ /mm	$B$ /MHz	$\Delta R$ /m	$\Delta v_r$ /( $m \cdot s^{-1}$ )
LFMCW microwave radar	8	120	2.746	48.5
	8	240	1.373	48.5
	10	120	2.746	60.6
	10	240	1.373	60.6
S-LFMCW lidar	$0.905 \times 10^{-3}$	120	2.746	$0.55 \times 10^{-3}$
	$0.905 \times 10^{-3}$	240	1.373	$0.55 \times 10^{-3}$
	$1.55 \times 10^{-3}$	120	2.746	$0.94 \times 10^{-3}$
	$1.55 \times 10^{-3}$	240	1.373	$0.94 \times 10^{-3}$

#### 3.2 卡尔曼滤波数据融合

在 S-LFMCW 相干激光探测过程中,目标的距离信息  $R$  和径向速度  $v_r$  满足

$$R = R_0 + \int_0^t v_r dt_d, \quad (11)$$

式中: $R_0$  表示开始探测时目标的初始距离; $t_d$  表示雷达探测的时间。

通过比较可知,大范围 S-LFMCW 相干激光探测系统的测速精度  $\Delta v_r$  远高于测距精度  $\Delta R$  (高两个数量级),且随着探测范围的增大,测距精度还会持续降低。因此可以将高精度的测速数据用于修正激光雷达测距的精度。有多种数据融合方法可以采

用,其中卡尔曼滤波是最典型的方法之一。鉴于 S-LFMCW 相干激光探测系统测量结果的线性关系,本文采用测量融合的方法,直接融合测量数据以获取加权或组合测量值,然后采用卡尔曼滤波器获得融合测量后的最终测量估计值<sup>[21-22]</sup>。本文通过卡尔曼滤波器对 S-LFMCW 相干激光探测系统的测量结果进行数据融合,以获得高精度测距结果。

卡尔曼滤波器的输入是 S-LFMCW 相干激光探测系统得到的目标距离及径向速度。卡尔曼滤波器的作用主要有两点:卡尔曼滤波器将系统  $t$  时刻的输入信息和基于  $t-1$  时刻的预测信息进行融合,从而计算出系统当前时刻  $t$  的预测信息,这样可以使系统信息更加连续、平滑,有较好的滤波效果;卡尔

曼滤波算法可以融合目标的距离数据和高精度速度数据,并对距离精度进行修正,从而实时获得具有较高精度的数据融合测距结果。

卡尔曼滤波的计算分为 5 个步骤,其中下标“ $t-1/t, n$ ”表示用  $t-1$  时刻的系统第  $n$  个状态量估计  $t$  时刻的系统第  $n$  个状态量,并将下标“ $t/t, n$ ”简记为“ $t, n$ ”。

1) 定义初始条件

$$\hat{\mathbf{X}}_{0,n} = \begin{bmatrix} R_0 \\ v_{r0} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{0,n} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}$  为系统的初始状态信息; $R_0, v_{r0}$  分别为 S-LFMCW 相干激光探测系统的距离初始值及速度初始值( $R_0=0, v_{r0}=0$ ); $\mathbf{P}$  为协方差矩阵; $\sigma$  为初始协方差矩阵系数,  $\sigma^2=2\pi B/f_s$ 。

2) 系统状态预测及协方差预测

$$\hat{\mathbf{X}}_{t/t-1,n} = \mathbf{M} \cdot \hat{\mathbf{X}}_{t-1,n} + \mathbf{W}, \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{t/t-1,n} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{P}_{t-1,n} \cdot \mathbf{M}^T + \mathbf{E}_x, \quad (15)$$

式中: $\mathbf{M}$  为系统状态转换矩阵,  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\Delta t$  为

卡尔曼滤波器数据输入间隔时间; $\mathbf{W}$  为零期望的高斯态噪声矢量,误差估计协方差矩阵  $\mathbf{E}_x =$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q} & 0 \\ 0 & \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \mathbf{Q} \text{ 为状态误差估计协方差矩阵系数。}$$

3) 计算卡尔曼增益

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t/t-1,n} \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{t/t-1,n} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{E}_z)^{-1}, \quad (16)$$

式中: $\mathbf{K}_t$  为  $t$  时刻的卡尔曼增益矩阵; $\mathbf{H}$  为观测矩阵; $\mathbf{E}_z$  为测量噪声的协方差矩阵。

4) 计算测量估计值

$$Z_t = R_t + n_t, \quad (17)$$

$$e_t = Z_t - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{X}}_{t/t-1,n}, \quad (18)$$

式中: $Z_t$  为  $t$  时刻的观测值; $R_t$  为  $t$  时刻的距离测量值; $n_t$  为  $t$  时刻的零均值高斯噪声; $e_t$  为  $t$  时刻的预测值和实际观测值之间的误差。

5) 系统状态及协方差矩阵更新

$$\hat{\mathbf{X}}_{t,n} = \hat{\mathbf{X}}_{t/t-1,n} + \mathbf{K}_t \cdot e_t, \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_{t,n} = (\mathbf{I} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{K}_t) \cdot \mathbf{P}_{t/t-1,n}. \quad (20)$$

卡尔曼数据融合后,距离  $Z_t$  的测距精度  $\Delta R_K$  可表示为

$$\Delta R_K = \frac{\sum_0^t (P_1 \cdot \Delta t + K_t^R \cdot P_2)}{t} + e_k, \quad (21)$$

式中: $e_k$  为卡尔曼数据融合误差; $P_1$  为  $t$  时刻速度测量值与实际值之间的偏差; $P_2$  为  $t$  时刻距离测量值与实际值之间的偏差; $K_t^R$  为  $t$  时刻距离状态量的卡尔曼增益值。

因为无法直接观测到过程信号,所以通常情况下难以确定  $\mathbf{Q}$  的值。一种解决方法是通过设定一个合适的  $\mathbf{Q}$  值,给过程信号“注入”足够的不确定性来建立一个简单的可以产生可接受结果的过程模型。为了提高滤波器的性能,通常要按一定标准进行系数的选择与调整<sup>[23]</sup>。

在 S-LFMCW 相干激光探测系统中,卡尔曼滤波器输出的结果更多地依赖于状态预测模型的精确性,因此应当给  $\mathbf{Q}$  赋予较小的值( $0 < \mathbf{Q} < 1$ )。理论上当  $\mathbf{Q}$  不断减小且趋近于 0 时,系统的测距精度将会趋近于  $\Delta v_r \cdot \Delta t$ 。但在实际探测中,考虑到目标的姿态变化以及目标追踪脱靶率等因素,若  $\mathbf{Q}$  的取值太小,则数据融合后的测距值会过度依赖状态预测模型的精确性,这可能导致目标测距值的失真,因此应当根据目标的飞行状况以及探测环境选取适当的  $\mathbf{Q}$  值。

## 4 实验与结果分析

本文分别进行了静态目标及动态目标的探测实验,以验证本文所提的基于卡尔曼滤波的高精度 S-LFMCW 相干激光测距方法的可行性。本实验所涉及的 S-LFMCW 相干激光探测系统参数为:扫频周期  $T=90 \mu\text{s}$ ,扫频带宽  $B=120 \text{ MHz}$ ,回波采样率  $f_s=100 \text{ MHz}$ ,信号处理点数  $N=8192$ ,激光波长  $\lambda=1550 \text{ nm}$ 。根据(9)式及(10)式,分别计算得到 S-LFMCW 相干激光探测系统的理论测距精度  $\Delta R=1.373 \text{ m}$ ,理论测速精度  $\Delta v_r=0.00946 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 4.1 静态目标的探测实验及结果

选取图 4 中红圈内的楼房作为静态探测目标,连续探测该目标并将系统探测得到的数据实时输入卡尔曼滤波器中,从而获取融合测距结果。本实验中卡尔曼滤波器的数据输入间隔时间  $\Delta t=50 \text{ ms}$ ,进行三组数据融合实验,状态误差估计协方差矩阵系数  $\mathbf{Q}$  分别设置为  $\mathbf{Q}_1=10^{-1}$ 、 $\mathbf{Q}_2=10^{-2}$  和  $\mathbf{Q}_3=10^{-3}$ 。

图 5 和图 6 分别为静态目标的 S-LFMCW 相干激光探测系统的探测结果和测量数据融合结果

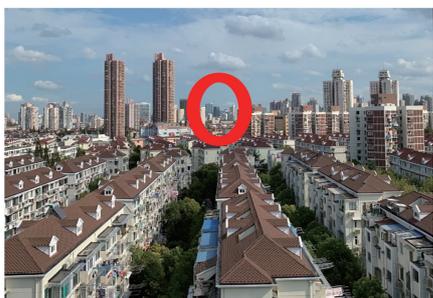


图 4 静态目标

Fig. 4 Static target

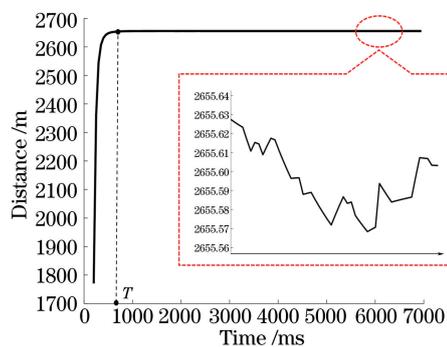


图 6 静态目标数据融合结果

Fig. 6 Data fusion results of static target

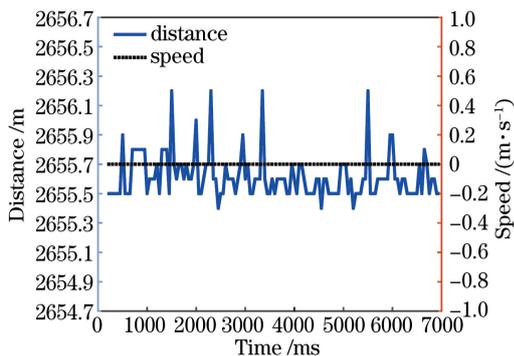


图 5 静态目标的探测结果

Fig. 5 Detection results of static target

( $Q=Q_3$ ), 可以看出, 目标的距离探测值在 2655.7 m 上下波动, 速度探测值为 0。在数据融合开始阶段,

卡尔曼滤波算法还未收敛, 融合结果会有较大偏差。卡尔曼滤波算法的收敛时间  $T_{cvg}$  约为 670 ms, 当算法收敛后, 卡尔曼融合测距结果的偏差波动范围明显小于 S-LFMCW 相干激光探测系统。

图 7 为静态测距偏差对比图, 其中图 7(a) 为 S-LFMCW 相干激光探测系统的测距偏差, 图 7(b) 为  $Q=10^{-1}$  时数据融合测距的偏差, 图 7(c) 为  $Q=10^{-2}$  时数据融合测距的偏差, 图 7(d) 为  $Q=10^{-3}$  时数据融合测距的偏差。通过静态测距偏差的对比可知, 在系统其他参数不变的情况下, 随着卡尔曼状态误差估计协方差矩阵系数  $Q$  的不断减小, 数据融合后的静态测距偏差逐渐减小。

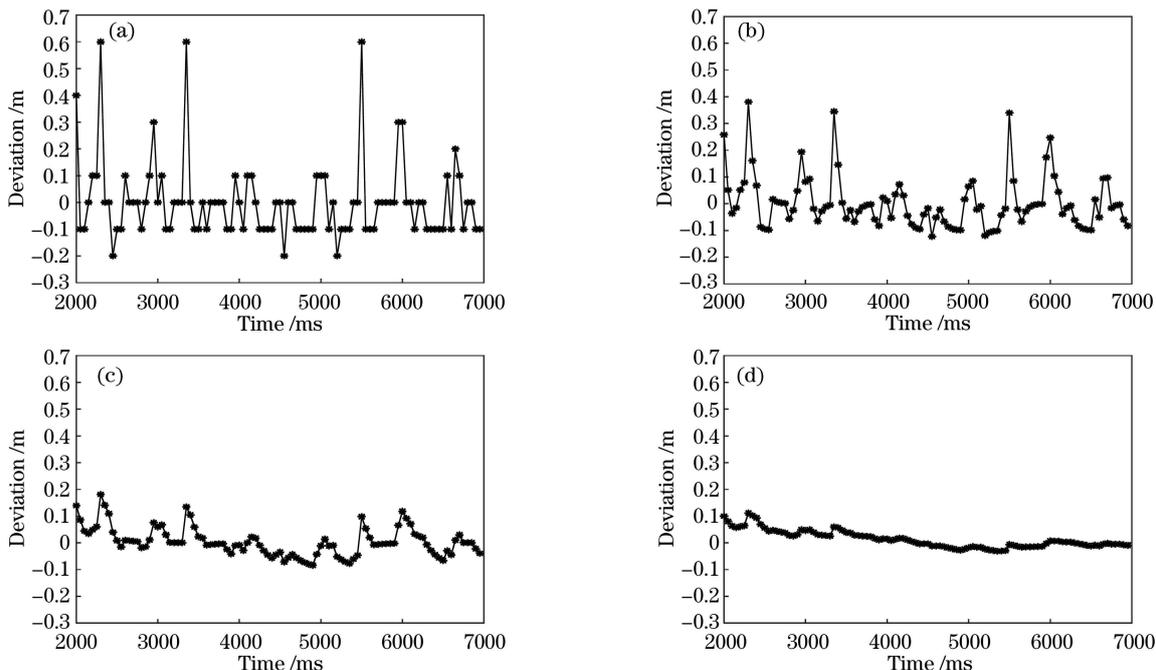


图 7 不同条件下静态测距偏差的对比。(a) S-LFMCW 相干激光探测系统; (b) 数据融合 ( $Q=Q_1$ ); (c) 数据融合 ( $Q=Q_2$ ); (d) 数据融合 ( $Q=Q_3$ )

Fig. 7 Comparison of static ranging deviations under different conditions. (a) S-LFMCW coherent laser detection system; (b) data fusion ( $Q=Q_1$ ); (c) data fusion ( $Q=Q_2$ ); (d) data fusion ( $Q=Q_3$ )

### 4.2 动态目标的探测实验及结果

如图 8 所示,本实验将待测目标放置于移动的小车上,通过对小车施加外力,控制车上待测目标进行运动;对目标进行连续探测并将雷达探测得到的数据实时输入到卡尔曼滤波器中,以获取数据融合测距结果。本实验中卡尔曼滤波器的数据输入间隔时间  $\Delta t = 50 \text{ ms}$ ,进行三组数据融合实验,状态误差估计协方差矩阵系数  $Q$  分别设置为  $Q_1 = 10^{-1}$ 、 $Q_2 = 10^{-2}$  和  $Q_3 = 10^{-3}$ 。

在本实验中分别进行了简谐运动目标探测、变加速运动目标探测及匀减速运动目标探测。在简谐运动目标探测实验中,通过对小车反复施加径向的正负外力,控制目标进行简谐运动;在变加速运动目标探测实验中,通过对小车施加无规律的外力,使小车在径向进行随机的运动;在匀减速运动目标探测实验中,通过对小车施加径向的外力,使小车获得一定的初速度,然后释放小车,使小车在较为光滑的地面进行匀减速运动。

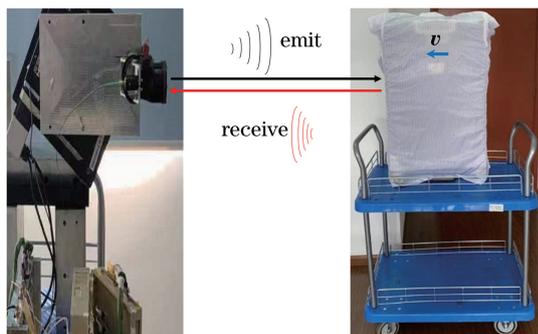


图 8 动态目标探测实验图

Fig. 8 Experimental diagram of dynamic target detection

图 9~11 分别为简谐运动实验结果、变加速运动实验结果及匀减速运动实验结果,图中的三条曲线分别表示 S-LFMCW 相干激光探测系统的测距结果、S-LFMCW 相干激光探测系统的测速结果以及卡尔曼数据融合的测距结果。图 9 和图 10 中红色圆圈所圈出的点是 S-LFMCW 相干激光探测系统在简谐运动目标探测实验及变加速运动目标探测实验中出现的距离测量偏差较大的数据点,系统测速结果总体偏差较小,通过卡尔曼滤波数据融合后,可以得到连续平滑的融合测距结果。图 11 中 S-LFMCW 相干激光探测系统测距结果大致为二次曲线,具有相对较大的误差波动范围,S-LFMCW 相干激光探测系统测速结果大致为直线,误差波动范围相对较小,卡尔曼滤波数据融合后的测距结果接近为二次曲线,误差波动范围较小。

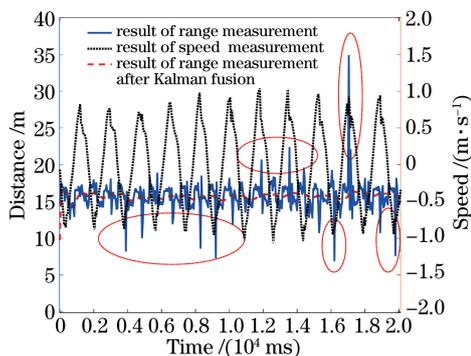


图 9 简谐运动实验结果

Fig. 9 Experimental results of simple harmonic motion

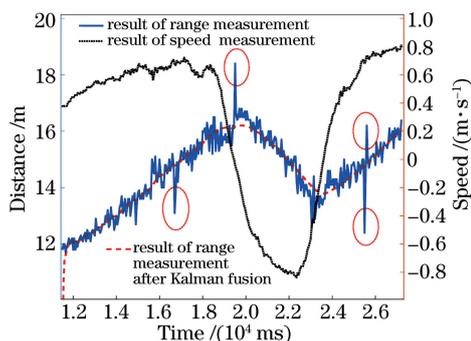


图 10 变加速运动实验结果

Fig. 10 Experimental results of variably accelerated motion

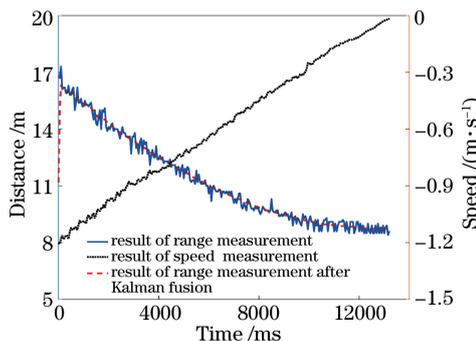


图 11 匀减速运动实验结果

Fig. 11 Experimental results of uniformly retarded motion

图 12 为动态测距误差的对比图,其中图 12(a)为 S-LFMCW 相干激光探测系统的测距误差,图 12(b)为  $Q = 10^{-1}$  时数据融合测距的误差,图 12(c)为  $Q = 10^{-2}$  时数据融合测距的误差,图 12(d)为  $Q = 10^{-3}$  时数据融合测距的误差。通过动态测距偏差的对比可知,卡尔曼滤波数据融合可以有效减小 S-LFMCW 相干激光探测系统的测距误差。在连续追踪到目标且系统其他参数不变的情况下,随着卡尔曼状态误差估计协方差矩阵系数  $Q$  的不断减小,数据融合后的测距精度会逐渐提高。

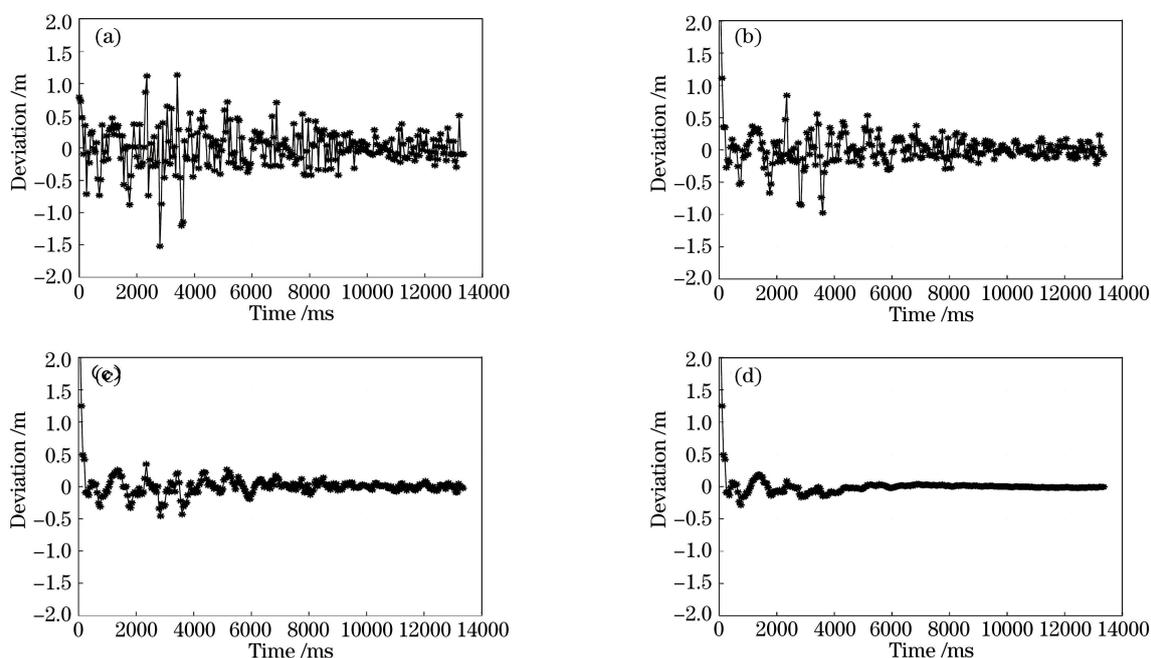


图 12 不同条件下动态测距误差的对比。(a) S-LFMCW 相干激光探测系统;(b)数据融合( $Q=Q_1$ );  
(c)数据融合( $Q=Q_2$ );(d)数据融合( $Q=Q_3$ )

Fig. 12 Comparison of dynamic ranging errors under different conditions. (a) S-LFMCW coherent laser detection system;  
(b) data fusion ( $Q=Q_1$ ); (c) data fusion ( $Q=Q_2$ ); (d) data fusion ( $Q=Q_3$ )

## 5 结 论

提出了一种基于卡尔曼滤波的高精度 S-LFMCW 相干激光测距方法,搭建了 S-LFMCW 相干激光探测系统。采用线性频率调制和单频调制循环的相干探测方法,通过一系列数字信号处理算法提取出目标的速度和距离信息。通过对系统测速测距精度的分析,在几乎不提高系统功耗的前提下,采用卡尔曼滤波算法对 S-LFMCW 相干激光探测系统结果进行数据融合,获得了高精度测距结果,显著优化了系统的测距精度和测距准确度。

实验结果表明:通过采用卡尔曼滤波算法对所提 S-LFMCW 相干激光探测系统的测量结果进行数据融合,可以获取目标的连续高精度距离信息,其中系统的测距范围为  $8\text{ m}\sim 2.7\text{ km}$ ,测速范围为  $0\sim 20\text{ m/s}$ 。通过设定一个合适的状态误差估计协方差矩阵系数值,可以将 S-LFMCW 相干激光探测系统的测距精度从  $1.373\text{ m}$  提升至  $0.1\text{ m}$  以内,测距精度提高了一个数量级以上。所提方法在大范围激光雷达动态高精度测距领域具有较为重要的意义,在航天探测、空间目标定位及反导反侦察等领域具有较高的实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Ni S X, Li Y F. Development trend of military lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32 (2): 111-114.  
倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 111-114.
- [2] Chen H M, Liu W B, Gu J, et al. Design of FMCW laser fuze detecting system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 66-72.  
陈慧敏, 刘伟博, 顾健, 等. 调频连续波激光引信探测系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 66-72.
- [3] Cohen S C. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity [J]. Applied Optics, 1975, 14(8): 1953-1959.
- [4] Yang H M, Ma C W, Wang J Y, et al. The transmission of polarized light of space attitude in quantum communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(12): 1227002.  
杨海马, 马彩文, 王建宇, 等. 量子光通信中偏振光空间姿态传递 [J]. 光子学报, 2015, 44 (12): 1227002.
- [5] Bazin G, Journet B. Laser range-finding: global characterization of the optical head and implementation of measurement methods [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2909: 131-138.

- [6] Zeng Z Y, Zhang X Y, Jia X. Measurement of linear frequency-modulated continuous-wave laser radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 022802.  
曾朝阳, 张晓永, 贾鑫. 线性调频连续波激光雷达测量方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 022802.
- [7] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18):15991-15999.
- [8] Iiyama K, Matsui S I, Kobayashi T, et al. High-resolution FMCW reflectometry using a single-mode vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 703-705.
- [9] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, et al. Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12):2026-2028.
- [10] Zhang T, Qu X H, Zhang F M. Laser frequency modulated ranging method based on triggering resample from outside clock signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0428003.  
张桐, 曲兴华, 张福民. 基于外部时钟信号触发重采样的激光频率调制测距方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0428003.
- [11] Ji N K, Zhang F M, Qu X H, et al. Ranging technology for frequency modulated continuous wave laser based on phase difference frequency measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104002.  
吉宁可, 张福民, 曲兴华, 等. 基于相位差测频的调频连续波激光测距技术[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1104002.
- [12] Amzajerdian F, Pierrottet D, Petway L, et al. Lidar systems for precision navigation and safe landing on planetary bodies [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8192: 819202.
- [13] Amzajerdian F, Pierrottet D, Petway L B, et al. Lidar sensors for autonomous landing and hazard avoidance[C] // *AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition*, September 10-12, 2013, San Diego, CA. Reston, Virginia: AIAA, 2013.
- [14] Wu J, Hong G L, He Z P, et al. A coherent range and range-rate detection lidar with large ranging dynamic range and high-repetition-rate ( I ): mechanism and performance [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(6): 680-690.  
吴军, 洪光烈, 何志平, 等. 一种大测距动态范围高重频相干测距测速激光雷达( I ): 体制及性能[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(6): 680-690.
- [15] Wu J, Hong G L, Zhang H Y, et al. A coherent range and range-rate detection Lidar with large ranging dynamic range and high-repetition-rate ( II ): signal modulation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(3): 321-332.  
吴军, 洪光烈, 张鸿翼, 等. 一种大测距动态范围高重频相干测距测速激光雷达( II ): 信号调制[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(3): 321-332.
- [16] Fei Y C, Chen S W, M H. Research on generation technology of wideband radar signal based on DDS [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(8): 1022-1027.  
费元春, 陈世伟, 米红. 基于 DDS 的宽带雷达信号产生技术研究[J]. *电子学报*, 2001, 29(8):1022-1027.
- [17] Kachelmyer A L. Coherent laser radar performance in the presence of random and systematic errors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 999:176-191.
- [18] Bai R X, Wang B Y, Tong P. Research status of laser Doppler velocity radar technology[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 249-253.  
白蕊霞, 王斌永, 童鹏. 激光多普勒测速雷达技术研究现状[J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 249-253.
- [19] Xu X J, Huang P K. Radar system and its information processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010:174-178.  
许小剑, 黄培康. 雷达系统及其信息处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 174-178.
- [20] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6):0610001.  
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0610001.
- [21] Qin Z Q. Data fusion technique and its application [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2003, 22(5): 25-28.  
秦志强. 数据融合技术及其应用[J]. *兵工自动化*, 2003, 22(5): 25-28.
- [22] Roecker J A, McGillem C D. Comparison of two-sensor tracking methods based on state vector fusion and measurement fusion [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 447-449.
- [23] Peng D C. Basic principle and application of Kalman filter[J]. *Software Guide*, 2009, 8(11): 32-34.  
彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. *软件导刊*, 2009, 8(11): 32-34.