

同时测距和测速的注入锁定调频连续波激光雷达

张洪英¹, 田晓宁¹, 雷艳阳¹, 朱宗达², 董永康^{2*}

¹哈尔滨理工大学黑龙江省量子调控重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 将结合外调制技术与主从式注入锁定技术的方法用于获得宽带线性调频光源,并基于该光源实现了同时测距和测速的调频连续波激光雷达系统。主从式注入锁定系统包含作为主激光器的窄线宽光纤激光器和作为从激光器的分布反馈式半导体激光器,它们的输出波长均约为 1550 nm;使用频率范围为 8~14 GHz 的三角波线性调频微波对主激光器进行调制,调制后的光注入到从激光器,获得了 6 GHz 带宽、超过 20 dB 边模抑制比的宽带线性调频光源。基于该光源搭建了调频连续波激光雷达系统,采用该系统实现了对静态物体距离、运动物体瞬时距离与瞬时速度的测量,运动物体的距离和速度测量结果由不同的公式获得并可以相互验证,实现的距离和速度分辨率分别为 2.5 cm 和 7.8 mm/s。

关键词 遥感; 激光雷达; 注入锁定; 调频连续波; 测距测速

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1528001

Frequency Modulated Continuous Wave LIDAR Based on Injection-Locking Technology for Simultaneous Distance and Speed Measurement

Zhang Hongying¹, Tian Xiaoning¹, Lei Yanyang¹, Zhu Zongda², Dong Yongkang^{2*}

¹Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Quantum Manipulation & Control, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

²National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract This paper proposes a method combining external modulation technology and master-slave injection-locking technology to obtain a broadband linear-chirped laser source, and the laser source is used to realize a frequency modulated continuous wave light detection and ranging (LIDAR) system for simultaneous distance and speed measurement. The master-slave injection-locking system includes a narrow line-width fiber laser as the master laser and a distributed feed-back (DFB) semiconductor laser as the slave laser, and their wavelengths are both about 1550 nm. A triangular linear-chirped microwave signal with a frequency range of 8–14 GHz is used to modulate the output from the master laser, and then the modulated laser is injected into the DFB semiconductor laser to obtain a broadband linear-chirped laser with a 6 GHz bandwidth and a side-mode suppression ratio over 20 dB. We build a frequency modulated continuous wave LIDAR based on the laser source. Using this system, we perform the distance measurement of static objects and the instantaneous measurement of distance and speed of a moving object. The distance and speed of a moving object are obtained by different formulas and verified with each other. The distance and speed resolutions are 2.5 cm and 7.8 mm/s, respectively.

Key words remote sensing; light detection and ranging; injection locking; frequency modulated continuous wave; distance and speed measurement

OCIS codes 280.3640; 280.3400; 280.7250

1 引 言

从科学研究到工业生产及自动驾驶,激光雷达

(LIDAR)技术得到了广泛应用^[1-2]。与电学雷达相比,激光在传播过程中具有方向性和聚焦性,因此具有更高的轴向分辨率^[3-4]。常见的激光雷达体制有

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-04-20; 录用日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61575052)

* E-mail: aldendong@163.com

飞行时间(TOF)法与调频连续波(FMCW)法。虽然 TOF 法具有激光雷达系统结构简单的优点,但该方法也有不可忽视的缺点,如:存在距离盲区,不能测量近距离内的物体;系统的空间分辨率受限于脉冲宽度;依赖于高精度的计时器与脉宽为几纳秒的高质量脉冲光;接收时需要高精度的接收器,以分辨出失真的脉冲信号^[5]。FMCW 法具有以下优点:没有距离盲区;在不需要快速电学仪器和大功率激光的前提下可以实现更高的空间分辨率;FMCW 激光雷达采用的是外差探测技术,可以避免其他激光雷达的干扰;通过傅里叶分析和多普勒分析,可以同时得到物体的位置信息和速度信息。因此,FMCW 法获得了广泛关注^[6]。

在 FMCW 激光雷达中,锯齿波和三角波频率调制波形被广泛使用^[7-9]。对于锯齿波 FMCW 激光雷达,目标距离与速度信息会重叠在相同的拍频上,因此只能进行距离测量^[10];而对于三角波频率调制波形,在三角的上升段和下降段有两个频率不等的拍频信号,因此,三角波 FMCW 激光雷达可以通过两个拍频分别计算出目标的距离信息和速度信息。

FMCW 激光雷达使用线性调频光源进行探测,使用外差探测技术进行接收^[11-13]。从物体反射回来的光与本地的参考光混频后进入光电探测器,将含有物体距离与速度信息的拍频信号进行快速傅里叶变换(FFT),就可以得到物体的距离和速度信息^[14]。一般情况下,线性调频光源通过直接调制激光器的波长获得,这种方式可以得到大的调频带宽,但是直接调制激光器的波长会导致调频出现非线性,使结果的误差增大。解决调频非线性的传统方法之一是进行重采样,该方法通过等频率间隔采样来解决非线性问题,但会降低实时计算能力,并且增加处理时间,不能得到物体的实时距离与速度信息^[15-17]。另一种获得线性调频光源的方法是外调制技术,即通过外部的调频电信号与调制器对激光的强度或相位进行调制,但调制后的光波一般包括载波和边带的多个频率成分,需要额外使用滤波器以获得单频调频光。

主从式注入锁定是将主激光器输出的光注入到从激光器中,从而使从激光器跟随主激光器振荡的一种技术。主从式注入锁定系统通常使用窄线宽、频率稳定的激光器作为主激光器,并用其控制一个功率较大的从激光器。与其他的光放大技术相比,注入锁定技术具有装置简单、功率转换效率高、边模

抑制比较大的优点^[18]。

本文提出了一种结合外调制技术与主从式注入锁定技术的方法,并采用该方法获得了宽带线性调频光源;此外,本文基于该光源搭建了调频连续波激光雷达系统,实现了距离和速度的同时测量。

2 激光雷达原理与系统

2.1 测距和测速原理

FMCW 激光雷达发射频率呈线性变化的连续光信号,被物体反射回来的接收光与本地参考光混频后形成拍频信号,通过测量该拍频信号可以获得物体与雷达之间的距离及物体的速度信息。

图 1 所示为 FMCW 激光雷达的频率关系,其中实线和长虚线分别为参考光和接收光的频率,短虚线为二者的拍频频率。调制信号为三角波频率调制的线性调频连续信号, f_0 为激光初始频率, B 为调频带宽, f_{\max} 为激光的最大频率, τ 为接收光与参考光之间的时延, T 为调频周期, f_D 为多普勒频移, f_{b1} 为三角波上升段的拍频频率, f_{b2} 为三角波下降段的拍频频率。

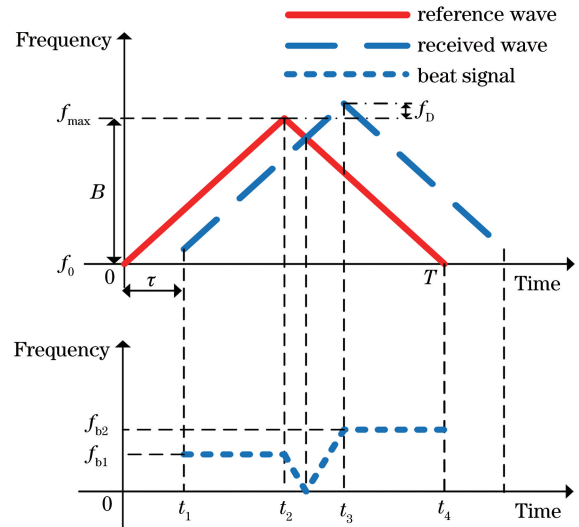


图 1 FMCW 激光雷达的频率关系

Fig. 1 Frequency relationship of FMCW LIDAR

雷达与物体的距离 R 可以表示为^[19-20]

$$R = \frac{cT(f_{b1} + f_{b2})}{8B}, \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速。距离分辨率为

$$\Delta R = \frac{c}{2B}. \quad (2)$$

物体的运动速度 v 可表示为

$$v = \frac{cf_D}{2f_0} = \frac{c(f_{b2} - f_{b1})}{4f_0}, \quad (3)$$

速度分辨率为

$$\Delta v = \frac{c}{f_0 T} = \frac{\lambda_0}{T}, \quad (4)$$

式中： λ_0 为 f_0 对应的波长。

2.2 注入锁定原理

主从式注入锁定就是将一束高质量的光束(主激光器的光束)注入到另一台激光器(从激光器)中。若注入光的频率 ω_1 足够接近从激光器的自由振荡频率 ω_0 , 则从激光器就会被注入信号完全控制, 其振荡模式的频率跃变为 ω_1 , 相位与注入信号同步。主从式注入锁定示意图如图 2 所示。

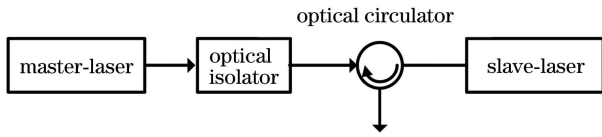


图 2 主从式注入锁定示意图

Fig. 2 Schematic of master-slave injection locking

假设激光器腔内光场处处相等(即平均场近似), 则描述半导体激光器的速率方程^[21-23]为

$$\frac{dE_0}{dt} = \frac{1}{2} \left[G_N(N - N_{th}) - \frac{1}{\tau_r} \right] E_0, \quad (5)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{N}{\tau_p} - G_N(N - N_{th})E_0^2, \quad (6)$$

其中： E_0 为输出光的电场复振幅； G_N 为光学增益； N 为腔内载流子密度； N_{th} 为阈值载流子数； τ_r 为光子寿命； J 为注入电流密度； q 为电子电量； d 为有源层厚度； τ_p 为载流子寿命。

从激光器满足半导体激光器的速率方程——(6)式。将注入项添加到(5)式就可以得到光注入下从激光器的非线性动态特性, 即

$$\frac{dE_0}{dt} = \frac{1}{2} \left[G_N(N - N_{th}) - \frac{1}{\tau_r} \right] E_0 + f_d E_1 \cos \phi, \quad (7)$$

式中： E_1 为从激光器注入光的电场复振幅； f_d 为模式间隔； ϕ 为从激光器的相位, 有 $\phi(t) = \phi_0(t) - \phi_1$ (ϕ_1 与 ϕ_0 分别为主激光器与从激光器自由运行时的相位)。相位满足关系式

$$\frac{d\phi}{dt} = -\Delta\omega + \frac{\alpha}{2} \left[G_N(N - N_{th}) - \frac{1}{\tau_r} \right] - f_d \frac{E_1}{E_0} \sin \phi, \quad (8)$$

式中： α 为谱线增宽因子； $\Delta\omega$ 为主激光器频率 ω_1 与从激光器自由运行时频率 ω_0 之差, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ 。当注入锁定达到稳态时, 有

$$\frac{dE_0}{dt} = 0, \quad \frac{dN}{dt} = 0, \quad \frac{d\phi}{dt} = 0. \quad (9)$$

将(9)式与(6)~(8)式联立, 可以得到

$$-f_d \sqrt{\frac{I_1}{I_0}(1 + \alpha^2)} < \Delta\omega < f_d \sqrt{\frac{I_1}{I_0}}, \quad (10)$$

式中： $I_1 = |E_1|^2$ 为注入光的功率； $I_0 = |E_0|^2$ 为从激光器的输出功率。当主从激光器的频率失谐 $\Delta\omega$ 在(10)式所示范围时, 从激光器处于稳定的锁定态。当主激光器注入的光功率过小或频率失谐过大时, 主从式注入锁定就会被破坏, 从激光器不再被锁定。

2.3 FMCW 激光雷达系统

图 3 为注入锁定调频连续波激光雷达系统框图, 其中虚线为电路, 实线为光路。主激光器是窄线宽光纤激光器, 波长约为 1550 nm, 线宽为 10 kHz。输出光经过偏振控制器后进入马赫-曾德尔电光调制器, 任意波形发生器产生微波信号, 通过电光调制器对激光进行载波抑制型调制, 调制后的光主要包含一阶上下边带, 载波和其他边带都被抑制。调制后的激光经过环形器进入从激光器。从激光器是分布反馈半导体激光器, 其输出功率为 20 mW, 输出激光的线宽为 2 MHz, 波长约为 1550 nm。通过调节主激光器的输出频率, 使注入光的一个边带落入从激光器的增益区, 从而使从激光器输出的激光锁定到该边带上。注入锁定后, 从激光器的输出光由环形器进入 90:10 的光纤耦合器后被分为两路: 90% 的一路为探测光, 探测光经过环形器与光纤准直器后进入空间中对目标物体进行探测, 经物体反射回来的光(接收光)进入 50:50 的光纤耦合器中; 10% 的一路为参考光, 参考光经偏振控制器进入 50:50 的光纤耦合器中。接收光与参考光在光纤耦合器中发生混频, 产生拍频信号, 之后由光电探测器将光信号转换为电信号并由数据采集卡进行采集。数据采集卡与任意波形发生器由电路实现同步。加载到电光调制器的调制信号是调频范围为 8~14 GHz(带宽 6 GHz)的三角波线性调频连续信号, 周期为 200 μ s。采集卡的采样频率为 100 MSa/s, 每个周期的采样点数为 20000 个, 在三角波频率调制信号的上升段和下降段各采集 10000 个点。实验系统由 LabVIEW 软件控制, 并进行数据处理。由上述参数与(2)、(4)式可以计算出雷达的距离分辨率为 2.5 cm, 速度分辨率为 7.8 mm/s。

3 实验结果

3.1 注入锁定光的表征

对主激光器的激光加载 6 GHz 带宽(8~14 GHz)的调制信号后注入到从激光器中进行注入

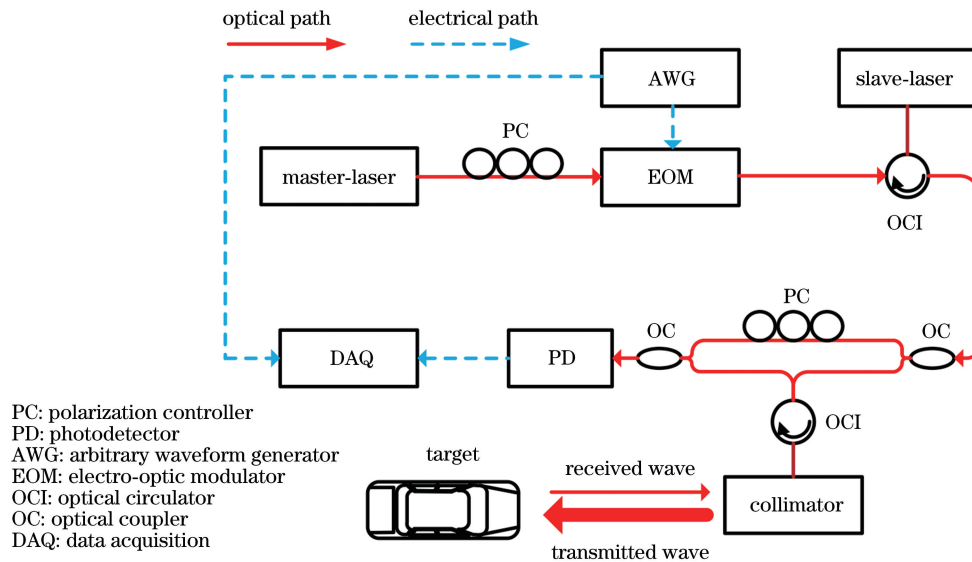


图 3 注入锁定调频连续波激光雷达实验系统

Fig. 3 Experimental system of injection-locked FMCW LIDAR

锁定,输出激光的光谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出,此线性扫频光源的边模抑制比达到了 21 dB,输出功率为 20 mW。

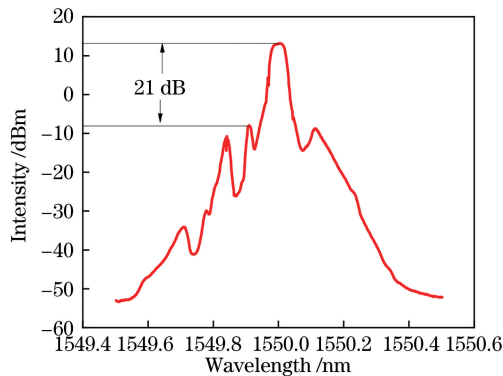


图 4 注入锁定后输出的光谱

Fig. 4 Output spectrum after injection locking

将外调制技术与注入锁定技术相结合可以得到高线性度的扫频光源。本实验中使用非平衡马赫曾德尔干涉仪对扫频线性度进行表征。在干涉仪中,注入锁定后的信号被分为两臂,其中两臂之间设置 64 ns 的延时,通过检测两臂拍频信号的周期来计算相对频率的变化。相对频率随时间的变化如图 5 所示,图中给出了测量到的相对频率数据与线性拟合曲线,频率上升段测量数据与拟合曲线之间残差的标准差为 46 MHz,表明在 6 GHz 范围内扫频的线性误差为 7.7×10^{-3} ; 频率下降段残差的标准差为 44 MHz,表明扫频的线性误差为 7.3×10^{-3} 。

3.2 静态物体的距离测量

静态测试时的待测物体为白色泡沫板。对静态

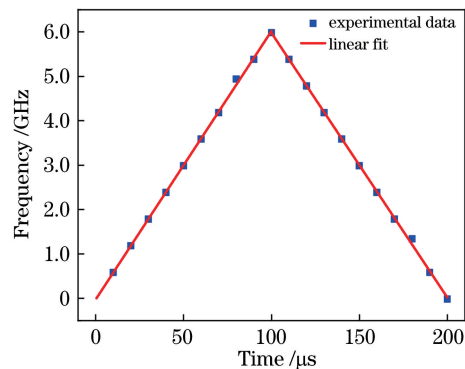


图 5 注入锁定后的扫频线性度

Fig. 5 Sweep linearity after injection locking

物体进行探测时没有额外的多普勒频移,因此在三角波频率调制信号的上升段与下降段得到的拍频信号的频率相等。图 6(a)为一个周期内加载的调制频率的变化曲线,可见:在 $0 \sim 100 \mu\text{s}$ 内加载的调制信号频率由 8 GHz 线性增大到 14 GHz;在 $100 \sim 200 \mu\text{s}$ 内,加载的调制信号频率由 14 GHz 线性减小到 8 GHz。实验中待测物体与准直器之间的距离为 3.93 m,所获得的一个周期的时域拍频信号如图 6(b)所示。对图 6(b)中时域信号的上升段和下降段分别进行 FFT 处理,得到的频谱图如图 6(c)所示,其中实线部分对应三角波的上升段,虚线部分对应三角波的下降段。由于待测物体处于静止状态,因此上升段和下降段的频谱相同。 $0 \sim 2.27 \text{ MHz}$ 这一段为雷达系统内部光路的反射信号,与待测物体无关;2.27 MHz 处的反射峰为光纤准直器的端面反射,即雷达的发射窗位置,将其作为

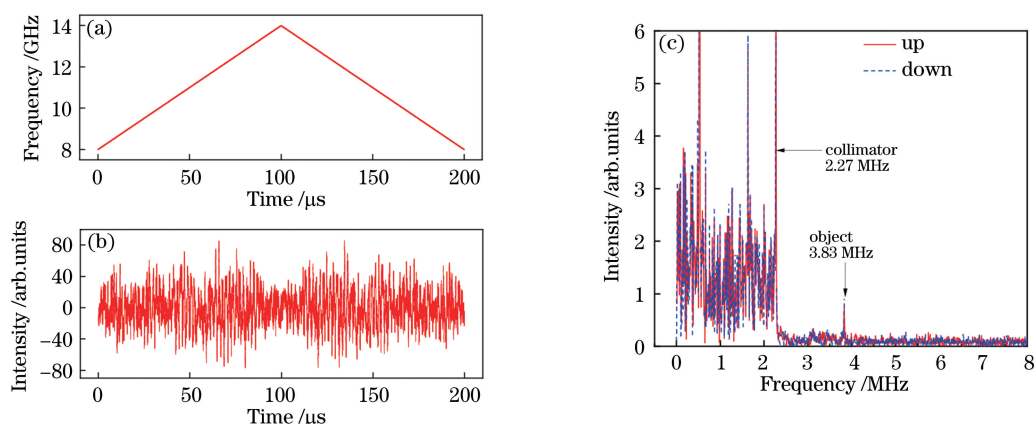


图6 典型的静态物体测量结果。(a)加载的调制信号;(b)时域拍频信号;(c) FFT处理后的信号频谱

Fig. 6 Typical results of static object measurement. (a) Loaded modulation signal; (b) time domain beat signal; (c) frequency spectra of beat signal after FFT

距离零点;3.83 MHz处的反射峰为待测物体的拍频峰。将在三角波频率的上升段与下降段得到的两个拍频信号重合在一起,并将拍频频率代入(1)式,可得物体的距离为3.93 m,测量结果与实际距离一致。

3.3 运动物体的距离与速度测量

3.3.1 运动物体远离雷达运动

运动物体(待测物体)为四驱小车,其上放置一个白色泡沫板,雷达发射的激光打在泡沫板上可以获得较稳定的反射信号。对于运动的物体,其接收到的光相较于本地参考光会产生额外的多普勒频移,因此在三角波频率调制信号的上升段与下降段得到的拍频频率不再相等,两拍频频率之差的大小取决于物体的运动速度。测试开始($t=0$ s)后,小车与雷达相距3.93 m,并远离雷达运动。

4个不同时刻拍频信号的频谱如图7所示,其中,2.27 MHz处的信号为准直器的反射峰,其右侧的两个峰为待测物体的反射光与参考光混频产生的两个拍频信号,实线对应三角波上升段的拍频,虚线对应三角波下降段的拍频。将拍频频率代入(1)式与(3)式即可得到物体的瞬时距离与瞬时速度信息。从图7所示的4幅图中可以看到:两拍频信号的频率均值逐渐变大,说明小车作远离雷达的运动;同时,两个拍频信号之间的频差逐渐增大,表明小车在作加速运动。由(3)式可知,运动物体远离雷达时($f_{b2} < f_{b1}$),其瞬时速度值为负值,负号表明小车远离雷达。

将图7中4个不同时刻的拍频信号频率值分别代入(1)式、(3)式,可以得到:当 $t=1.6$ s时,物体

的瞬时距离为4.06 m,瞬时速度为 -515.4 mm/s;当 $t=2.5$ s时,物体的瞬时距离为4.6 m,瞬时速度为 -813.8 mm/s;当 $t=3.5$ s时,物体的瞬时距离为5.60 m,瞬时速度为 -1069.5 mm/s;当 $t=4.0$ s时,物体的瞬时距离为6.15 m,瞬时速度为 -1170.3 mm/s。从4个不同时刻的瞬时速度可看出小车在作加速运动。

小车运动过程中距离和速度随时间的变化如图8所示,其中图8(a)为速度-时间曲线,图8(b)为距离-时间曲线。从图8(a)中可以看出:小车的速度由初始时刻的0 mm/s加速到了4.0 s时的 -1170.3 mm/s;小车在0~1.1 s内静止不动,在1.1 s后开始作加速运动。速度曲线的波动是由小车运动不平稳造成的。图8(b)中的实线为实时测量的距离曲线,可以看出:小车从3.93 m处开始远离雷达,4.0 s时与雷达相距6.15 m;小车在0~1.1 s内静止,在1.1 s后与雷达的距离逐渐增大。图8(b)中的虚线为对图8(a)中速度曲线积分的结果,将其与测量得到的距离曲线进行对比,可以看出两者十分吻合。图8(c)为测量结果与积分结果的残差曲线,可知在4 s附近时残差累积到近60 mm。这是由于随着距离增加,速度积分的累积误差也随之增大。4 s内残差的标准差为17.8 mm,残差较小,证明了所测速度曲线的准确性。

3.3.2 运动物体靠近雷达运动

使用与上述相同的四驱小车进行靠近雷达运动的测试。测试开始时,小车与雷达相距7.00 m。小车在运动过程中的距离和速度随时间的变化如图9所示,其中图9(a)为小车的速度-时间曲线,

图 9(b)为距离-时间曲线。从图 9(a)中可以看出：小车的速度由 0 mm/s 加速到了 4.0 s 时的 1181.9 mm/s；小车在 0.9 s 之前是静止的，在 0.9 s 后开始作加速运动。速度-时间曲线较为抖动是由小车运动不平稳导致的。图 9(b)中的实线为测量得到的实时距离曲线，可知小车从距离雷达 7.00 m 处开始朝向雷达运动，在 0~0.9 s 内小

车静止，0.9 s 后小车与雷达的距离逐渐减小，4.0 s 时运动至距雷达 4.44 m 处。图 9(b)中的虚线为图 9(a)中速度曲线的积分结果，其与测量得到的距离曲线十分吻合。图 9(c)为残差-时间曲线，残差的增大同样是由速度积分的累积误差增大导致的。4 s 内残差的标准差为 24.3 mm，残差较小，验证了所测速度曲线的准确性。

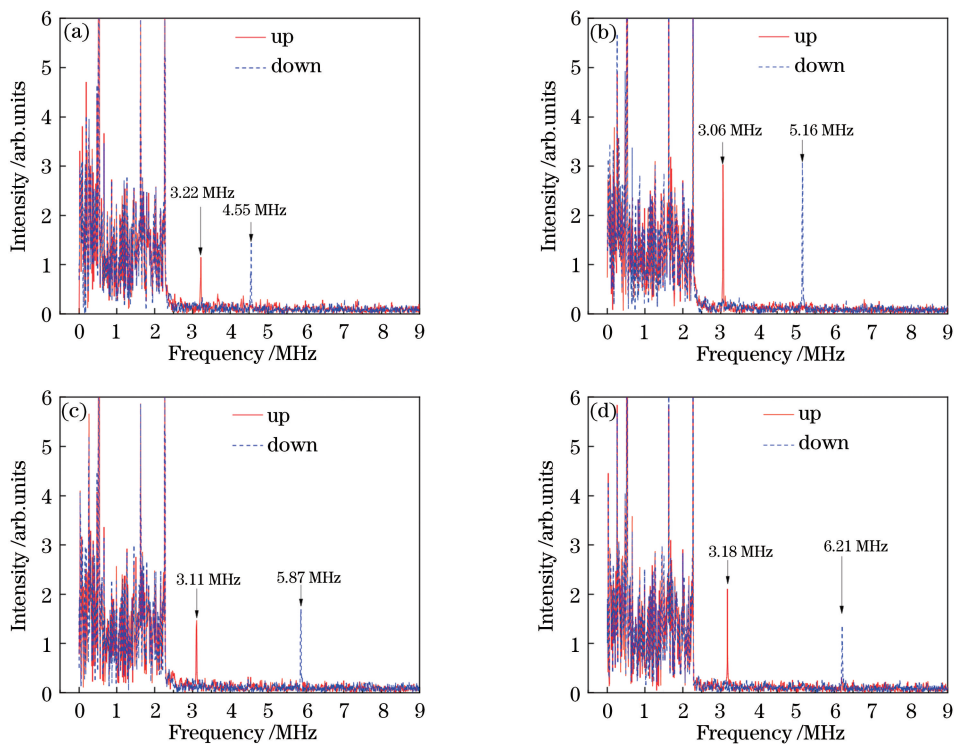


图 7 4 个不同时刻拍频信号的频谱。(a) $t=1.6$ s; (b) $t=2.5$ s; (c) $t=3.5$ s; (d) $t=4.0$ s
Fig. 7 Frequency spectra of beat signals at four different moments. (a) $t=1.6$ s; (b) $t=2.5$ s;
(c) $t=3.5$ s; (d) $t=4.0$ s

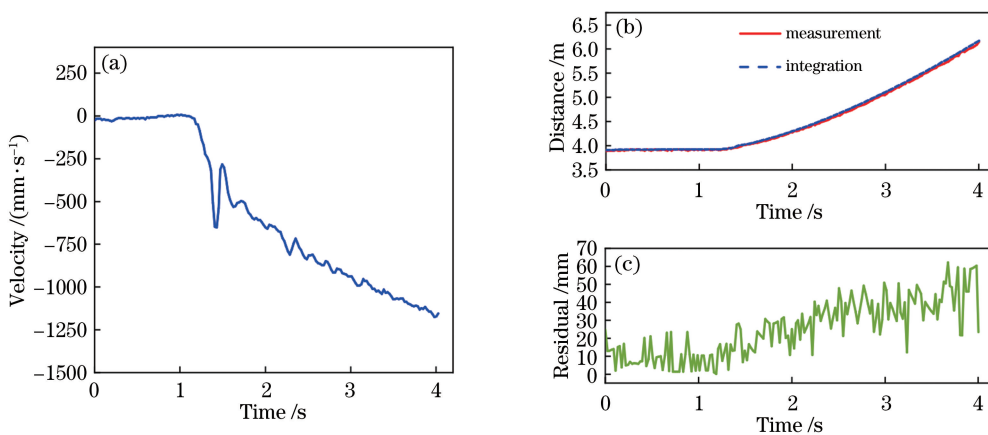


图 8 小车远离雷达运动的曲线。(a)速度-时间曲线;(b)距离-时间曲线;(c)残差-时间曲线
Fig. 8 Diagrams of object moving away from the LIDAR. (a) Speed-time diagram; (b) distance-time diagram;
(c) residual-time diagram

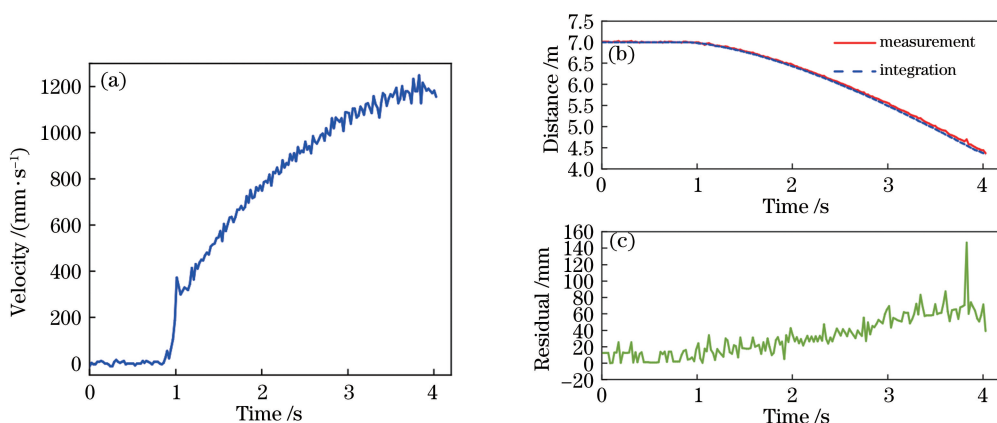


图 9 小车靠近雷达运动的曲线。(a)速度-时间曲线;(b)距离-时间曲线;(c)残差-时间曲线

Fig. 9 Diagrams of object moving close to the LIDAR. (a) Speed-time diagram; (b) distance-time diagram; (c) residual-time diagram

4 结 论

将激光外调制技术与注入锁定技术相结合,获得了 6 GHz 带宽、超过 20 dB 边模抑制比的宽带线性调频光源,其扫频线性误差最大为 7.7×10^{-3} 。基于该光源搭建了 FMCW 激光雷达,得到了 2.5 cm 的距离分辨率与 7.8 mm/s 的速度分辨率。对静态物体的距离以及运动物体的瞬时速度和瞬时距离进行了测量,速度曲线的积分结果与测量得到的瞬时距离曲线符合得较好,残差的标准差最大为 24.3 mm,验证了系统测量的准确性。

参 考 文 献

- [1] Schwarz B. Mapping the world in 3D[J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 429-430.
- [2] Rasshofer R H, Gresser K. Automotive radar and lidar systems for next generation driver assistance functions[J]. Advances in Radio Science, 2005, 3: 205-209.
- [3] Martin A, Dodane D, Leviandier L, et al. Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4640-4645.
- [4] Mitchell E W, Hoehler M S, Giorgetta F R, et al. Coherent laser ranging for precision imaging through flames[J]. Optica, 2018, 5(8): 988-995.
- [5] Lee J, Kim Y, Lee K, et al. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 716-720.
- [6] Shi G, Wang W. Dual interferometry FMCW laser ranging for high precision absolute distance measurement system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0806001.
- [7] Pierrottet D, Amzajerdian F, Petway L, et al. Linear FMCW laser radar for precision range and vector velocity measurements[J]. MRS Proceedings, 2008, 1076: 1076-K04-06.
- [8] Gao S, Hui R. Frequency-modulated continuous-wave lidar using I/Q modulator for simplified heterodyne detection [J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2022-2024.
- [9] Zhou G Q, Huang S, Zhang G Y, et al. Ranging principle and simulation analysis for multi-type FMCW laser radar[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(12): 1479-1485.
- [10] Gao S, O'Sullivan M, Hui R Q. Complex-optical-field lidar system for range and vector velocity measurement [J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25867-25875.
- [11] Karlsson C J, Olsson F A, Letalick D, et al. All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements [J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3716-3726.
- [12] Jing L Q, Zheng G, Zhang X X, et al. Nonlinear correction of frequency-modulated continuous wave interferometric laser sources[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1114001.
- [13] Shi C Z, Zhang F M, Pan H, et al. Distance

- measurement technique of large bandwidth laser frequency modulated continuous wave under sinusoid frequency modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201002.
- 史春钊, 张福民, 潘浩, 等. 正弦调频下大带宽激光调频连续波测距技术[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201002.
- [14] Xiong Z P, Li Q, Xia Z W, et al. Research on extraction of range image and noise suppression of frequency-modulation/continuous-wave lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s128002.
- 熊智鹏, 李琦, 夏志伟, 等. 调频连续波激光雷达距离像提取及噪声抑制仿真研究[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s128002.
- [15] Hariyama T, Sandborn P A M, Watanabe M, et al. High-accuracy range-sensing system based on FMCW using low-cost VCSEL[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 9285-9297.
- [16] Zhang X S, Pouls J, Wu M. Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9965-9974.
- [17] 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.
- [18] Wang J, Chen D J, Cai H W, et al. Fast optical frequency sweeping using voltage controlled oscillator driven single sideband modulation combined with injection locking[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7038-7043.
- [19] Onori D, Scotti F, Scaffardi M, et al. Coherent interferometric dual-frequency laser radar for precise range/Doppler measurement [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(20): 4828-4834.
- [20] Xu Z Y, Tang L Z, Zhang H X, et al. Simultaneous real-time ranging and velocimetry via a dual-sideband chirped lidar [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2254-2257.
- [21] Lau E K, Wong L J, Wu M C. Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: a tutorial [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 618-633.
- [22] Lau E K, Sung H K, Wu M C. Frequency response enhancement of optical injection-locked lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(1): 90-99.
- [23] Lau E K, Wong L J, Zhao X X, et al. Bandwidth enhancement by master modulation of optical injection-locked lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2584-2593.