

着陆导航激光多普勒雷达

舒嵘, 凌元, 崔桂华, 洪光烈

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 研究了一种可用于着陆导航的全光纤线性调频连续波(LFMCW)-连续波(CW)激光多普勒雷达. 以窄线宽激光器作为种子源, 利用声光调制器对激光进行频率调制, 通过平衡相干探测和基于 FPGA 的数字信号处理可实时获得航天器相对于天体的矢量速度. 基于速度模拟发生器的实验结果表明, 该多普勒雷达可获得高于 0.05 cm/s 的测速精度, 同时具有速度方向辨别能力.

关键词: 激光多普勒; 着陆导航; 线性调频连续波; 方向辨别; 激光雷达

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Laser Doppler radar for landing navigation

SHU Rong, LING Yuan, CUI Gui-Hua, HONG Guang-Lie

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Precise determination of the relative velocity between the spacecraft and celestial body is necessary to ensure the secure landing in space exploration. An all-fiber linear frequency modulation continuous wave (LFMCW)-continuous wave (CW) Doppler laser radar was developed for landing navigation. A narrow line width laser was used as the seed laser. The laser frequency was modulated by an acousto-optic modulator. Speed vector was measured in real-time by means of balance coherent detection and digital signal processing based on FPGA. Experiments made on laser Doppler radar with a speed generator proved that 0.05cm/s or better accuracy can be achieved while the velocity direction can be discriminated.

Key words: laser Doppler, landing navigation, linear frequency modulation continuous wave (LFMCW), direction discrimination, laser radar

PACS: 42.79.Qx, 06.30.Gv, 95.55.Pe

引言

随着航天技术的发展, 有效地保证航天器或探测器在天体表面进行安全软着陆是当前一个重要的研究课题. 航天器导航和控制平台需要激光雷达或微波雷达传感器精确地测量距离和速度变化来为航天器在行星表面下降、悬停、位置保持提供服务^[1]. 通过脉冲测距可获得脉冲间的平均速率, 但直接通过多普勒效应测量速度得到的精度优于通过脉冲测距时间平均的速率精度两个数量级以上^[2]. 相对于微波多普勒雷达, 激光多普勒雷达具有测量精度高、体积小、重量轻、易与激光测距一体化等优点, 更适

宜空间应用. NASA 于 2006 年提出自主着陆和障碍规避 (Autonomous precision Landing Hazard Avoidance Technology) 计划, 简称 ALHAT 计划, 旨在重返月球和探测火星等天体. ALHAT 计划提出研制调频连续波激光雷达, 精确地获得探测器相对于着陆天体的距离和速度, 该雷达具备两种模式, 一是调频连续波模式, 可同时获得距离和速度信息; 二是连续波模式, 只获得速度信息. 该雷达于 2008 年和 2010 年进行了两次机载飞行实验, 获得了较好的效果^[3-4].

航天器着陆过程中距离从远到近, 探测器速度由几百米每秒量级甚至更高减速到零, 因此需要激光多普勒雷达具备从低速到高速的大动态范围高精

收稿日期: 2013-01-06, 修回日期: 2013-09-05

基金项目: 国家 973 计划 (2009CB724004)

Foundation items: Supported by National 973 Project (2009CB724004)

作者简介 (Biography): 舒嵘 (1971-), 男, 上海市人, 研究员, 主要研究领域为激光遥感技术. E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2013-01-06, revised date: 2013-09-05

度测量能力,同时作用距离能覆盖几米至几公里.航天器着陆过程中各激光光束相对于天体的角度在发生变化,可能出现负向速度,因此还要求激光雷达具备多普勒方向辨别^[5]能力.采用线性调频连续波模式^[6]的激光雷达具有同时获得速度和距离信息,并可以区分正负速度,同时无距离和速度盲区的优点,但主要的缺点在于存在距离速度耦合.直接连续波测速,能够得到速度值大小,难以得到速度正负,若要得到速度方向,需要将本振或发射光移频到一个中频上^[6],在同轴光路中,会由于环形器泄露光(隔离度有限)或镜面反射光形成中频干扰,干扰频率为中频频率,越小的多普勒频率与中频频率越近,通过陷波将损失位于陷波器带宽内的有用信号,使得小速度无法测量,不能满足着陆导航激光雷达的应用需求.

设计了一种可用于着陆导航的调频连续波-连续波体制激光多普勒雷达,其主要特点是通过调频连续波模式获得距离和速度信息,并得到速度正负信息,通过连续波模式再次获得速度绝对值大小,解决了调频连续波出现的距离速度耦合问题.系统采用高速采样和频域信号处理,使得测量动态范围大、精度高,满足着陆导航的应用需求.

1 线性调频连续波激光雷达测速测距原理^[7-10]

调频连续波激光雷达距离速度测量原理如图 1 所示.

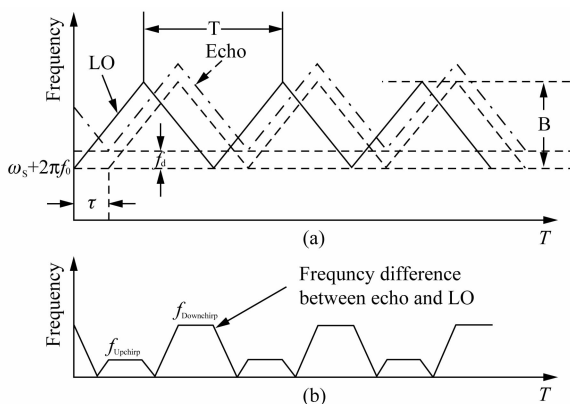


图 1 线性调频连续波激光雷达距离速度测量原理图
Fig. 1 Principle of range and velocity measurement of LFM-CW Radar

图 1(a)中实线为本振(LO)信号的频率时间关系图,它与发射信号经过相同调制,虚线为一定距离静止目标的回波信号频率与时间的关系,点划线为

运动目标的回波信号频率随时间关系图.回波信号与本振信号进行混频后得到两者的差频信号,该信号频率随时间关系如图 1(b)所示.

线性调频连续波激光雷达的本振信号(斜率为正的部分)可以表示为:

$$E_L(t) = A_L \cos((\omega_s + \omega_0 + 4\pi B/T \cdot t)t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为啁啾信号的起始频率, ω_s 为光频, A_L 为本振光的幅度, B 为调制带宽, T 为调制信号周期, φ_0 为初始相位.

一定距离的运动目标返回的信号表示为:

$$E_e(t) = A_R \cos((\omega_s + \omega_0 + 4\pi B/Tt + 2\pi f_d)(t - \tau) + \varphi_r) \quad (2)$$

其中 f_d 为多普勒频移, τ 为回波延时, φ_r 为回波的相位,两者经过相干探测混频,滤除直流量和高频分量得到:

$$S_p(t) = A_p \cos(2\pi(2\tau B/T - f_d)t + \varphi_0 - \varphi_r) \quad (3)$$

则可得到:

$$f_{\text{Downchirp}} = 2\tau B/T - f_d \quad (4)$$

同理得到斜率为负的部分的差频频率:

$$f_{\text{Upchirp}} = 2\tau B/T + f_d \quad (5)$$

由式(4)和式(5)得:

$$R = c\tau/2 = (f_{\text{Downchirp}} + f_{\text{Upchirp}})TB/8$$

$$v = \lambda f_d/2 = \lambda(f_{\text{Downchirp}} - f_{\text{Upchirp}})/4 \quad (6)$$

在频谱上,得到的 $f_{\text{Downchirp}}$ 和 f_{Upchirp} 值都为正,由式(6)也可知,当 $f_{\text{Upchirp}} > f_{\text{Downchirp}}$ 时,速度方向为正,探测器迎向着陆天体运动, $f_{\text{Upchirp}} < f_{\text{Downchirp}}$ 时速度方向为负,因此可进行速度方向鉴别以及速度和距离大小测量.

2 着陆导航激光多普勒雷达系统结构

着陆导航激光多普勒雷达系统原理框图如图 2 所示.窄线宽光纤激光器作为种子源,考虑人眼安全,采用了 1550 nm 波长,该波长光纤器件成熟,易于获得,使用的 InGaAs 探测器响应率高.种子激光器的线宽小于 5 kHz,输出连续波功率为 20 mW.

激光器输出的光经声光调制器(AOM)调制,AOM的调制信号由直接数字合成(DDS)驱动器,并经功放放大,DDS生成三角线性调频信号和单频连续波信号.三角线性调频信号正斜率部分和负斜率部分调制带宽 5 MHz,周期均为 50,单频连续波信号时间宽度为 100.

调制后的信号经分束器分为两部分,一部分作为相干探测的本振,本振经分束器再次被分成三通

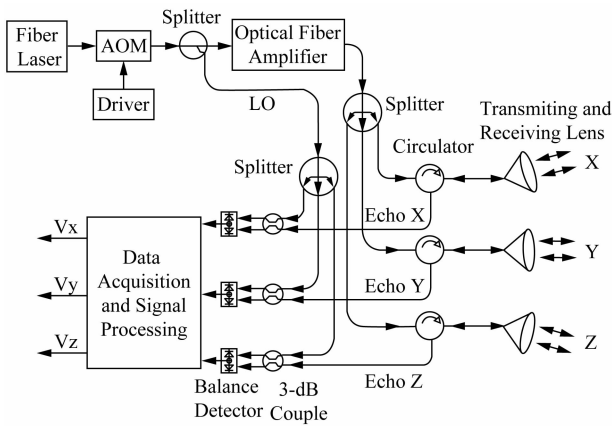


图2 着陆导航激光多普勒雷达系统框图
Fig.2 Block diagram of Laser Doppler radar for landing navigation

道,各通道光功率大小约为 1 mW,另一部分作为光放大器的种子光,种子光经光纤放大器进行光放大,放大后经分束器同样被分成三通道,每通道都经环形器和发射准直镜发射出去。

接收到的回波经环形器另一端口与本振共同被送入由 3 -dB 耦合器和平衡探测器组成的平衡相干探测系统,探测器输出的信号经放大后,通过高速数据采集和信号处理,得到三个通道的速度值,再将三个通道的速度值进行矢量计算得到航天器速度。

2.1 调制方式及测量原理

声光调制器的调制驱动信号频率随时间的关系如图 3 所示。

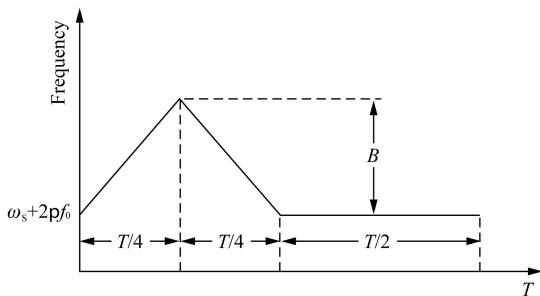


图3 调制波形频率时间关系图
Fig.3 Frequency-time diagram of the modulation wave

图 3 中 T 为调制周期, B 为调制带宽. 在本雷达系统中 T 为 $200 \mu\text{s}$, B 为 5 MHz . 发射波形在时间上分为两部分,前 $T/2$ 周期发射三角线性调频信号,后半周期发射单频连续波信号. 系统分别在线性调频信号正斜率、负斜率、连续波部分各采样一次,采样频率为 500 MHz ,采样时间分别为 $32.768 \mu\text{s}$ 、

$32.768 \mu\text{s}$ 、 $65.536 \mu\text{s}$,分别处理得到三个频率峰值 f_{Upchirp} 、 $f_{\text{Downchirp}}$ 、 f_d ,则有:

$$\begin{aligned} v &= \lambda f_d / 2 & f_{\text{Upchirp}} < f_{\text{Downchirp}} \\ v &= -\lambda f_d / 2 & f_{\text{Upchirp}} > f_{\text{Downchirp}} \end{aligned} \quad (7)$$

上式的成立建立在雷达与目标的距离:

$$\Delta R > c/2B = 30 \text{ m} \quad (8)$$

该距离等于雷达的距离分辨率,小于该距离时,由于 f_1 、 f_2 大小相等,无法判断速度方向. 增加带宽,提高距离分辨率,可降低最小不可判别方向的距离。

只利用前半部分的线性调频信号进行速度测量,在图 4 情况下,得不到正确的速度值。

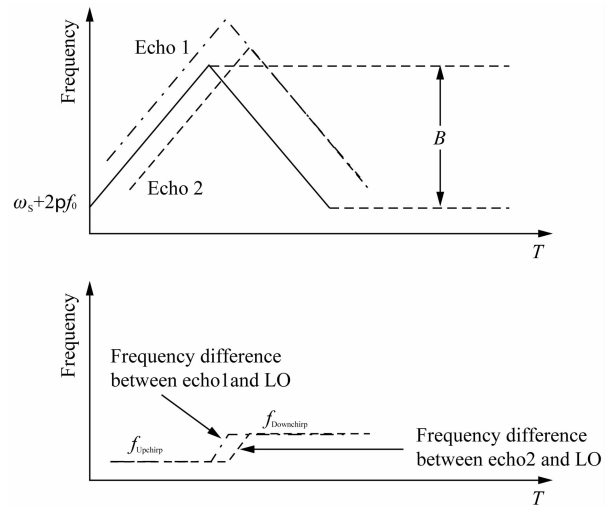


图4 远距离低速度目标与近距离高速度目标差频
Fig.4 Beat frequency of long range-low velocity and near range-high velocity targets echo

图 4 中回波 1 可看成是近距离高速目标回波,回波 2 可看成是远距离低速目标回波,由回波 1、回波 2 与本振的混频信号得到的两个频率分量大小均相等,只是存在正负差别,另外实数傅里叶分析无法区分频率正负,因此无法区分回波 1 和回波 2 的速度和距离。

2.2 着陆导航激光多普勒雷达数据处理

着陆导航激光多普勒雷达的数据处理系统框图如图 5 所示:

探测器输出电流信号经前放电路 (PreAMP) 放大,前放为跨阻增益放大电路,将电流信号转换为电压信号,放大后的信号经高通滤波器 (HPF) 滤除低频直流信号,该直流信号为环形器泄露光、镜面反射光及直接探测部分形成的干扰信号. 滤波后的信号,经功率分配器分成两部分,一部分用于检波电路,获得该信号大小,检波电路采用对数检波器 AD8310

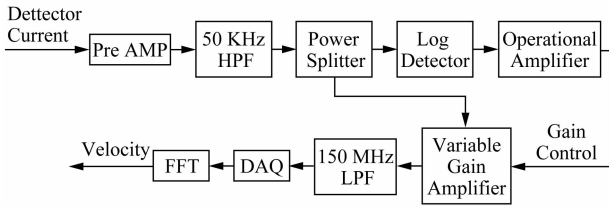


图 5 数据处理系统框图
Fig. 5 Block diagram of data processing system

实现. 其检波数据电压信号在 0.5 ~ 2.5 V, 经运算放大器 OP07 进行运算后得到增益控制电压, 使大信号放大倍数小, 小信号放大倍数大. 功率分配器的另一路输出给可变增益放大器 (VGA) AD8367, AD8367 在增益控制电压的控制下对信号进行放大, 实现信号动态范围的减小. VGA 输出的信号经低通滤波 (LPF)、数据采集 (DAQ) 及 FFT 频谱分析得到多普勒频率进而得到速度数据.

3 系统实验与结果

为对系统性能进行测试, 设计了如图 6 所示的实验系统框图, 采用单通道进行性能测试. 图 7 为搭建的实物图.

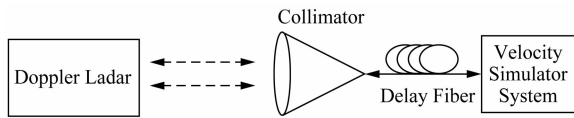


图 6 实验系统框图
Fig. 6 Block diagram of experimental system

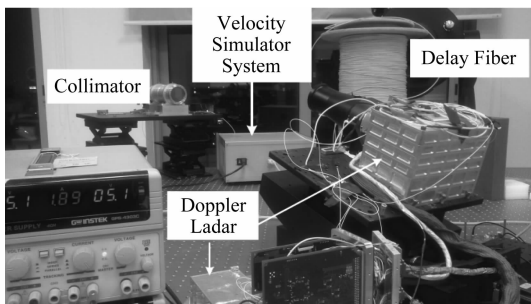


图 7 实验系统实物图
Fig. 7 Physical image of experimental system

多普勒雷达发出的激光经准直镜耦合到光纤中, 经过光纤延时送入速度发生器中, 速度模拟发生器产生多普勒频移, 对多普勒雷达发出的激光进行光频调制, 模拟运动物体产生的回波. 带有多普勒调制的激光回波信号经准直镜发射给多普勒雷达, 由激光雷达进行速度测量.

3.1 速度方向辨别试验

为验证系统对速度方向的鉴别功能, 将速度发生器设置速度值为 +5 m/s 和 -5 m/s, 对应理论多普勒频率应该为 +6.45 MHz 和 -6.45 MHz, 图 8 是未进行啁啾调制部分产生的频谱图.

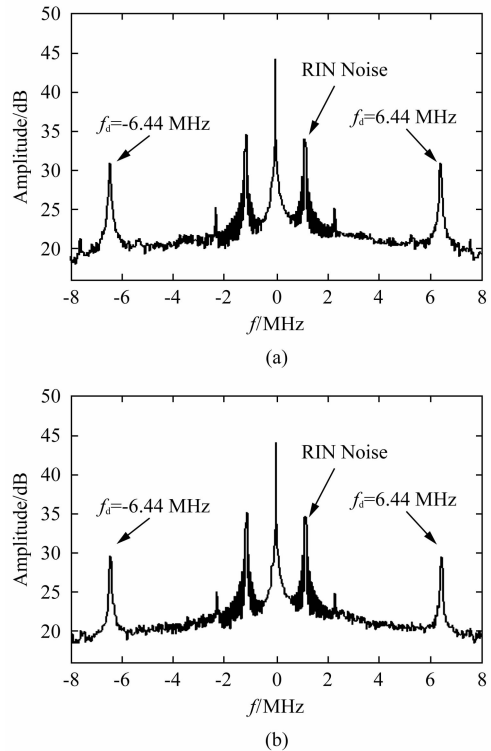


图 8 连续波模式得到的速度频谱图 (a) $V = +5$ m/s (b) $V = -5$ m/s
Fig. 8 Spectra produced by velocity of CW mode (a) $V = +5$ m/s (b) $V = -5$ m/s

由图 8 看出, 两者均在 +6.45 MHz 和 -6.45 MHz 附近产生了一个峰值, 峰值点的差异主要由于测量时的误差造成. 由图 8 无法直接判断速度是 5 m/s 还是 -5 m/s, 无法进行速度方向鉴别. 对进行调制的 Chirp 回波信号进行分析, 分别对上啁啾和下啁啾进行采样分析, +5 m/s 和 -5 m/s 时的信号频谱图见图 9.

图 9 显示出 Chirp 调制情况下, 5 m/s 与 -5 m/s 的频谱的不同之处, 左图中 $f_{Upchirp} < f_{Downchirp}$, 因此可判断速度方向为正, 右图中 $f_{Upchirp} > f_{Downchirp}$, 可判断出速度为负.

3.2 距离速度耦合试验

实验 1 中, 若无未经调制的单频连续波测得的速度数据, 在不存在其他先验知识的情况下, 也无法直接得到速度数据, 为验证该种情况, 进行了下面的实验.

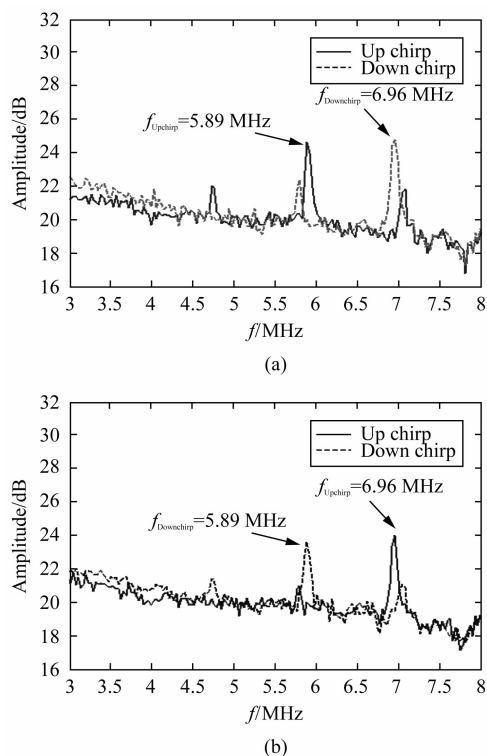


图9 线性调频连续波模式得到的速度频谱图 (a) $V = +5$ m/s (b) $V = -5$ m/s
Fig. 9 Spectra produced by velocity of LFMCW mode (a) $V = +5$ m/s (b) $V = -5$ m/s

首先设置速度为 0.43 m/s, 光纤长度为 1.04 km, 在本系统的参数下, 光纤延时带来的距离频移约为 1.013 MHz, 得到的频谱图见图 10.

图 10(a) 为进行了 Chirp 调制部分信号的差频频谱, 图 10(b) 为未进行调制的信号差频图.

其次设置速度大小为 0.818 m/s, 光纤长度为 510 m, 在本系统中对应的距离频移约为 550 kHz, 图 11 为得到的频谱图.

由于频谱分析得出的为频率的绝对值, 在无法知道 f_R 和 f_D 的大小关系时, 无法得到真实的 f_R 和 f_D 值. 如图 10(a) 和图 11(a) 中, 上啁啾和下啁啾得到的两个频率基本一致. 在图 10(a) 中, 上啁啾为 $f_R - f_D$, 下啁啾为 $f_R + f_D$, 而在图 11(a) 中, 上啁啾为 $f_D - f_R$, 下啁啾为 $f_R + f_D$. 通过增加直接的未调制信号进行测速, 可精确地测量得到 f_D 的大小, 可解决上述情况导致的无法得到真实距离和速度的情况.

3.3 系统探测范围及探测精度实验

激光多普勒雷达的探测精度主要由种子源的线宽、脉冲宽度 (τ)、系统信噪比 (SNR) 等影响, 其理论精度可由式 (9)^[2] 表示为:

$$\sigma_v = \lambda/2 * \sqrt{3}/(\pi\tau \sqrt{2SNR}) \quad (9)$$

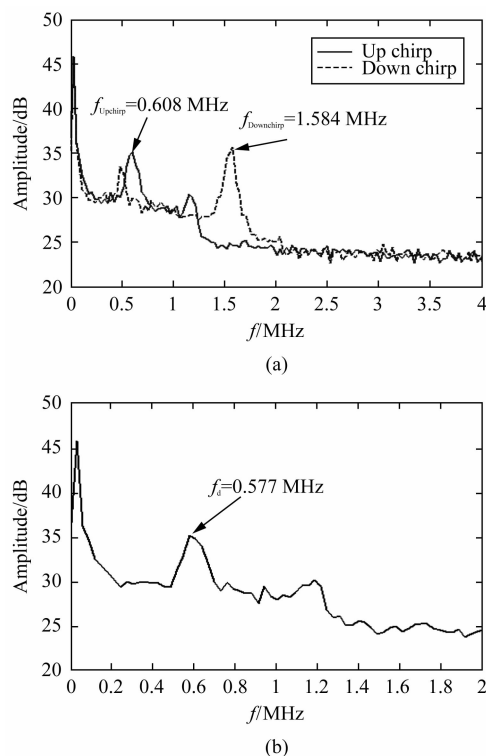


图 10 速度频谱图 ($V = 0.43$ m/s, $R = 1.04$ km) (a) LFMCW 模式, (b) CW 模式
Fig. 10 Spectra produced by velocity ($V = 0.43$ m/s, $R = 1.04$ km) (a) LFMCW mode, (b) CW mode

进行了系统测速精度的实验, 速度模拟器产生速度位于 $[-10, 70]$ m/s 之间的速度, 调节系统的回波功率约为 0.1 nW, 对应系统信噪比为 1.95. 通过 100 次测量得到每个速度值的统计均值和标准差. 表 1 为测量得到的速度平均值和标准差.

表 1 速度测量平均值及标准差
Table 1 Mean value and Standard deviation of velocity

序号	理论速度值 / (m/s)	测量速度平均值 / (m/s)	标准差 / (m/s)	序号	理论速度值 / (m/s)	测量速度平均值 / (m/s)	标准差 / (m/s)
1	-10	-10.0152	0.0258	10	30	29.9769	0.0381
2	-5	-5.0163	0.0303	11	35	34.9801	0.0425
3	-2	-2.0162	0.0451	12	40	39.9803	0.0215
4	2	1.9814	0.0299	13	45	44.9808	0.0301
5	5	4.9787	0.041	14	50	49.98	0.0148
6	10	9.9848	0.0355	15	55	54.976	0.0362
7	15	14.9818	0.0173	16	60	59.9807	0.0418
8	20	19.9804	0.0301	17	65	64.9804	0.0185
9	25	24.9785	0.0197	18	70	69.9806	0.0301

由表 1 可看出, 系统测量的范围达到了 80 m/s, 速度测量的标准差达到了 0.05 m/s 以下, 在 SNR = 1.95 时, 可由式 (9) 计算出理论的标准差为: $\sigma_v = 0.0064$ m/s, 实际测量精度与理论精度存在较大差

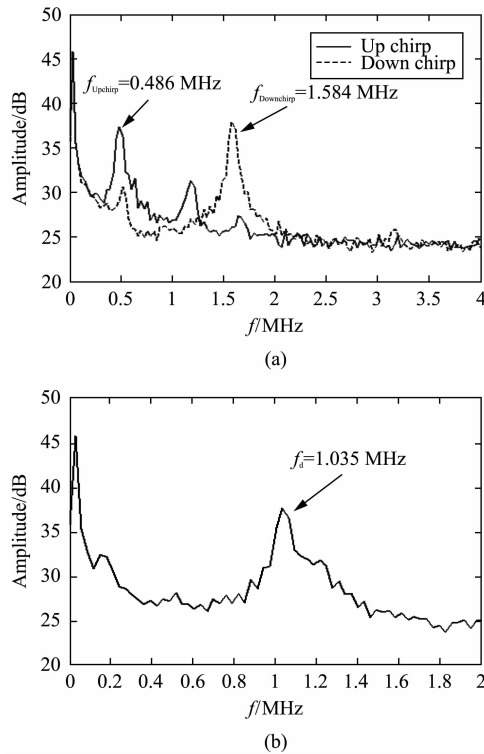


图 11 速度频谱图 ($V = 0.818 \text{ m/s}$, $R = 510 \text{ m}$)
(a) LFM CW 模式, (b) CW 模式

Fig. 11 Spectra produced by velocity ($V = 0.818 \text{ m/s}$, $R = 510 \text{ m}$) (a) LFM CW mode, (b) CW mode

异的主要原因在于式(9)中理论误差计算公式中未考虑激光器线宽、波长稳定性、AD 量化误差、FFT 分析的频率分辨率等因素的影响。

4 结论

提出了一种基于 LFM CW-CW 调制的着陆导航激光多普勒雷达系统,通过理论分析和实验证明,该多普勒雷达很好地解决了速度方向辨别和距离速度-模糊问题,实现了测速范围从 -10 m/s 到 70 m/s ,测速精度小于 0.05 m/s ,能够满足着陆导航需求.本系统设计中,由于只考虑进行速度测量,因此调制信号带宽较低,下一步将增加调制信号带宽,实现距

离和速度的同时高精度测量。

REFERENCES

- [1] Boone B G, Strohbehn K, Kluga B E, *et al.* Dual-band spacecraft sensor suite for lunar and small-body landing [J]. *Laser Radar Technology and Applications XII, Proc. Of SPIE*, 2007, **6550**:655007-1-655007-14.
- [2] Jelalian A V. *Laser Radar Systems* [M]. London: Aetrch House Boston, 1992:42-57.
- [3] Pierrottet D, Amzajerdian F, Petway L. Flight test performance of a high precision navigation Doppler Lidar [J]. *Laser Radar Technology and Applications XIV, Proc. of SPIE*, 2008, **7323**:732311-1-732311-9.
- [4] Pierrottet D, Amzajerdian F, Petway L. Navigation Doppler Lidar sensor for precision altitude and vector velocity measurements: flight test results [J]. *Sensors and Systems for Space Applications IV. Proc. of SPIE*, 2011, **8044**:80440S-1-80440S-11.
- [5] ZHOU Jian, WEI Guo, LONG Xing-Wu. Research on direction discrimination and low speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*. (周健,魏国,龙兴武. 激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究. *红外与激光工程*), 2012, **41**(3):632-638.
- [6] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*. 2004. **43**(21):4189-4198.
- [7] MENG Zhao-Hua, HONG Guang-Lie, HU Yi-Hua. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar [J]. *Acta Optica Sinica*. (孟昭华,洪光烈,胡以华. 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究. *光学学报*), 2010, **30**(8):2446-2450.
- [8] ZHAO Ji-Guang, ZHANG Zhi-Quan, DENG Chen. Research on design and experiment of FM/cw lidar system [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*. (赵继广,张智铨,邓陈. FM/cw 激光雷达系统设计与实验研究. *装备指挥技术学院学报*), 2009, **20**(3):61-64.
- [9] YU Xiao, HONG Guang-Le, LING Yuan. Homodyne detection of distance and velocity by Chirped-Amplitude modulated lidar [J]. *Acta Optica Sinica*. (于啸,洪光烈,凌元. 啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测. *光学学报*), 2011, **31**(6):0606002-1-7.
- [10] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor [J]. *Optical Engineering*. 2005, **44**(12):124404-1-5.