基于 1.55μm的全光纤测速激光雷达

马宗峰 张春熹 王夏霄 王纪强

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对传统相干激光雷达难于实现本振光与信号光波前匹配的问题,设计了一种基于光纤低损窗口 1.55μm的全光纤测速激光雷达.系统以全光纤器件构成整个光路结构,偏振无关光纤环形器与 Cassegrain型望远镜组成收发合置光学天线.给出了激光雷达的整体方案和系统设计,并对接收机的光混频、天线与单模光纤的耦合、信号检测和数据采集处理等技术进行了讨论.通过实验说明,全光纤测速激光雷达对空间光随机噪声有较好的抗干扰能力,提高了干涉条文可见度和雷达系统的性能,所得的速度分辨率优于 0.5mm/s,输出非线性度小于 0.1%.

关 键 词: 激光雷达; 单模光纤; 点扩散函数; 频谱分析

中图分类号: TN 958.8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)05-0596-04

All-fiber laser radar at 1.55μm for speed measurement

Ma Zongfeng Zhang Chunxi Wang Xiaxiao Wang Jiqiang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Strict optical alignment is essential for conventional coherent laser radar to match the local oscillator (LO) and signal modes. The scheme and system design of simple, continuous-wave (CW) coherent laser radar at 1.55 μm for speed measurement were presented. The system was based on all fiber instruments. A polarization-independent fiber-optic circulator and a Cassegrain telescope were used as the monostatic optical antenna. The fiber mixing technique of the receiver, the coupling efficiency between antenna and single-mode fiber (SMF) for spatial light, signal detection, digital data acquisition and processing were discussed. The experimental results indicate that the laser radar system has good robustness to random fluctuation noise of spatial light. In addition, the interference fringe visibility and the performance of the laser radar system are enhanced greatly. The speed resolution is less than 0.5mm/s, and the output nonlinearity of this laser radar is less than 0.1%.

Key words: laser radar; single-mode fiber; point spread function; spectral analysis

激光雷达是以激光作为载波的雷达,是传统雷达技术与现代激光技术相结合的产物.随着激光器和各种相关技术的发展和成熟,激光雷达得到了长足的发展,已经广泛应用于各种测量.近年来,关于大气风场探测的报道很多,发射机为激光脉冲发射方式,鉴频采用双边缘法布里-珀罗干涉仪或双通道马赫-泽德干涉仪,速度分辨率为 m/s量级,距离分辨率为几十米[1-2].测速激光雷达从探测体制上分为直接探测和相干探测两种,探测原理是激光多普勒效应.应用于大气探测的激光雷达,由于探测距离较远、探测目标离散,回波信号具有很强的随机性,多采用直接探测方式;对于探测距离较近的固体目标,实现场的空间匹配相对容易,采用转化增益高、滤波性能优良的外差探测有利于微弱回波信号的检测.

在 20世纪 90年代中期,由于光纤技术的飞速发展,光纤在激光雷达中的应用越来越多[1-4].我国的激光雷达发展相对滞后,对光纤在激光雷

收稿日期: 2007-05-14

作者简介: 马宗峰(1980-),男,山东临沂人,博士生,mzf706@163.com.

达中应用研究报道较少.捷联惯性导航系统(SNS, Strapdown Inertial Navigation System)与测速雷达组成的组合导航系统,即 SNS/Doppler组合可大大提高导航精度.本文开发了面向地面车辆组合导航系统应用的全光纤测速激光雷达.

1　方案原理

全光纤测速激光雷达原理框图见图 1.

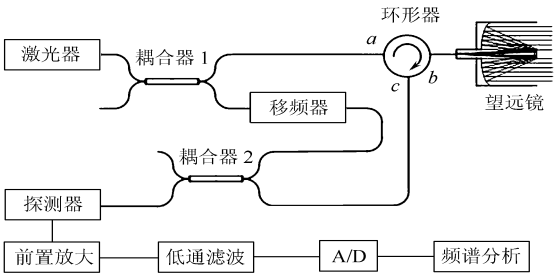


图 1　全光纤测速激光雷达原理框图

图 1中,由激光器发出的光经耦合器 1分成两束,一束经环形器的 *a*端口到 *b*端口,然后由收发合置光学天线(Cassegrain型望远镜)照射到探测目标上,由目标反射的回波信号经环形器的 *b*端口到 *c*端口,最后到达耦合器 2;另外一束经声光移频器到达耦合器 2.两束光在耦合器 2处合光,在探测器处中频信号的频率即为目标相对运动速度产生的多普勒频移:

$$\nu_d = 2V\cos\theta/\lambda \tag{1}$$

式中,ν_d为多普勒频移;λ为激光的波长;V为相对运动速度;θ为激光传输方向与相对运动速度方向的夹角.由多普勒频移可反演出运动速度.

2　关键技术

2.1　系统设计

测速激光雷达系统分为发射、接收和信号处理 3个部分,采用全光纤器件光路结构.

系统设计目标为给 SNS/Doppler组合导航提供速度信息,因此发射机选用测量精度高的连续光波(CW, Continuous-Wave)发射方式.望远镜接收孔径 D为 60mm.发射机的发射功率 P_t根据信噪比(SNR, Signal Noise Ratio)、雷达方程及系统设计的探测距离 R确立,需满足:

$$P_s \geq \frac{h\nu B \cdot \mathrm{SNR}}{\eta_h \eta} \tag{2}$$

$$P_t \geq \frac{4R^2}{\pi\beta\eta_0 D^2 T_R} \cdot P_s \tag{3}$$

其中,P_s为信号光功率;h为普朗克恒量;ν为激光的频率;B为电子带宽;η_h为外差效率;η为探测器的量子效率;η_0为光学系统效率;β为目标的反射率;T_R为大气传输系数.

信号处理部分的电子带宽和移频器的移频量由速度的动态范围确立,这里移频器的作用是消除速度方向模糊和降低低频噪声.

2.2　混频技术

光纤外差探测的一个关键技术是提高外差效率,通过解决本振光与信号光光场的空间匹配可提高 η_h,这要求光路非常稳定.η_h为[5]

$$\eta_h = \frac{\left|\int_A E_s \cdot E_l \exp(j\varphi)\,\mathrm{d}S\right|^2}{\int_\infty |E_s|^2\,\mathrm{d}S \int_A |E_l|^2\,\mathrm{d}S} \tag{4}$$

其中,E_s和 E_l分别为信号光与本振光的归一化复振幅;φ为相位差;A为探测器光敏面.

激光雷达接收机一般为基模高斯光束与艾里光场(Airy)的外差,理想条件下两者外差的最大外差效率为 0.83[5-6].若采用分立光学元件,场分布受环境和载体平台的影响较大,容易形成场分布横向、轴向的偏移或偏角,这时 η_h会急剧下降.合光和分光采用体积小、抗震性好的全光纤器件光路结构,可以减小传输通道的衍射,消除传输过程中的干扰,形成稳定的接收光路.

在地面车辆的组合导航系统中,以地面为参照物,激光雷达的探测距离较近(十几米到几十米),而光路器件均是偏振无关的光纤器件,所以回波的偏振态变化不大.在探测过程中,由于大气湍流和探测目标的作用,回波可以看成远场单频漫反射光信号,其振幅与相位是随机变化的.这里采用具有良好空间滤波性能的单模光纤,耦合进光纤的光在纤芯内以基模方式传输并发生干涉,若信号光与本振光的偏振态相同,可实现最佳混频,其 η_h接近最大值 100%[7].

2.3　耦合技术

光纤应用于激光雷达的另一个关键技术是提高空间光的耦合效率.直接探测是能量探测,为了提高接收到的回波信号的光功率,均使用了模场直径较大的多模光纤[1-2].而外差探测中使用单模光纤,回波信号耦合难度相对较大,耦合效率相对较低.因此,任何提高微弱回波信号耦合效率的措施都具有非常重要的意义.

光纤内本振光与信号光的模式相同,在纤芯横截面内的场分布近似为高斯函数:

$$E_l(r) = E_s(r) \approx \mathrm{e}^{-\left(\frac{r}{w_0}\right)^2} \tag{5}$$

其中,r为横向坐标;w_0为基模的模场半径.光的

耦合效率取决于信号光在焦平面的波前与纤芯的基模匹配,耦合进光纤的能量百分比为[8]

$$\rho = \frac{\left| \iint E(r) H^*(r) \mathrm{d}^2 r \right|^2}{\iint E(r) E_1^*(r) \mathrm{d}^2 r \cdot \iint H(r) H^*(r) \mathrm{d}^2 r} \quad (6)$$

式中 $H(r)$为焦平面的波前,对于均匀平面光为狄喇克函数.这里,单模光纤的作用是对透镜点扩散函数进行空间滤波,由式(5)和式(6)得

$$\rho(\alpha) = 2 \frac{\mathrm{e}^{-\alpha^2} (1 - \mathrm{e}^{-\alpha^2})^2}{\alpha} \quad (7)$$

其中

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \frac{d}{f} w_0 \quad (8)$$

式中 d和 f分别为耦合透镜的直径和焦距.

当 $\alpha = 1.121$时,ρ最大为 81.45%.此时,对于 1.55μm的耦合系统有 $d/f = 0.213$.

2.4 信号检测和数据采集处理

外差探测的本振光信号取值一般较大,噪声主要由本振的散粒噪声构成.信号光与本振光在耦合器 2处合光,经光电探测器的光电转换生成的光电流:

$$i = \frac{q\eta}{h\nu} \frac{1}{Z} \iint_A \frac{1}{2} [|E_1|^2 + |E_s|^2 + 2\mathrm{Re}(E_1 E_s^*)] \mathrm{d}S \quad (9)$$

其中,q为电子电量;Z为探测器光敏面的特征阻抗.那么中频光电流:

$$i_{\mathrm{if}} = \frac{q\eta}{h\nu} \frac{1}{Z} \int_A E_1 |E_s| \cos(2\pi \nu_{\mathrm{d}} + \phi) \mathrm{d}S \quad (10)$$

由式(9)和式(10)看出外差探测的信号特点为大直流信号与小振幅交流信号的叠加.为了确保信号不失真,探测器采用自动增义控制技术.探测器集成低噪声、宽带放大组件和隔直电路,实现对交流中频信号的预放大.

频谱分析型测速激光雷达的探测器输出的电信号经放大、低通滤波等预处理后,由 A/D转换、数据采集获得数字信号,然后做快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier Transforms)以提高噪声适应能力和信号处理速度,最终获得频谱峰值的频率[9].

由于 FFT存在栅栏效应,频率分辨率较低.若将 FFT的频谱峰值的频率作为多普勒频移,会使速度分辨率 V_{res}较低.

$$V_{\mathrm{res}} = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{M}{N} \quad (11)$$

其中,M为采样率;N为 FFT的数据宽度.

激光雷达与微波雷达相比其载波频率高 4～6个数量级,由式(1)知对于相同的相对运动速度,激光雷达产生的多普勒频移也高 4～6个数量级,数据量也就大得多.为满足不同的测速任务需求,要求雷达有很大的速度测量范围,为了保证采样后不产生频谱混叠,应满足采样定律.当目标实际的多普勒频率远小于最大可能的多普勒频率,按照固定采样率进行采样会有很多的冗余数据[10].在同样分辨率和测量精度情况下,这些冗余数据对实时信号处理提出了更高的要求,且占用大量存储空间,不利于长时间跟踪测量.为此,在数据采集处理上采用下采样和抗混叠滤波器,实时改变采样频率,实现多速率信号处理.

3 实验测试

按照上面的原理和设计方案,完成的原理样机部分器件参数如表 1所示.

表 1 测速激光雷达参数

器件	参数	参数取值
激光器	λ/μm	1.55
	功率/mW	10
	线宽/Hz	3.0×10^4
探测器	B/MHz	30
	灵敏度/dBm	-40
光纤	w_0/μm	10.4
环形器	隔离度/dB	55

探测目标为在单轴速率转台上树立的目标板,如图 2所示.速率转台为中国船舶工业集团公司生产的 TS-420型,其速率精度为 0.005(°)/s,物体到转台转轴的距离 $L = 0.2$m,物体的线速度 $V = L\omega$.

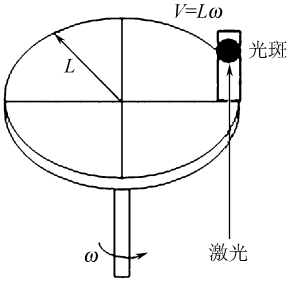


图 2 测速雷达标定目标

图 3是转台角速率为 0.1(°)/s时的雷达输出频域信号,此时目标的速度为 0.349mm/s.

图 4和图 5分别是转台角速率为 301.9(°)/s时的雷达输出时域和频域信号.

由图 4可以看到清晰的外差中频信号,表明全光纤方案具有混频效率高、抑制噪声能力强的特点.在单轴速率转台上对测速激光雷达系统进

行了不同角速率的速度测试,随机选取了 12个测试点,测试数据如表 2所示.

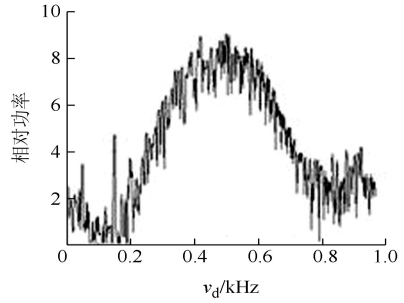


图 3　转台角速率为 0. 1(°)/s时的频域信号

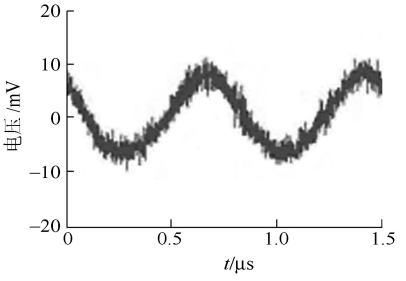


图 4　转台角速率为 301. 9(°)/s时的时域信号

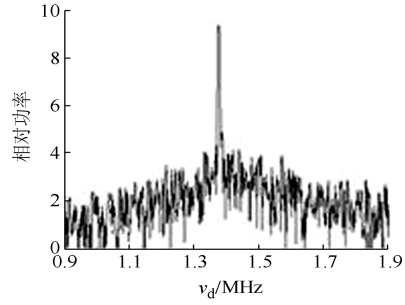


图 5　转台角速率为 301. 9(°)/s时的频域信号

表 2　测速实验数据

转台角速率/((°)·s^{-1})	频移/kHz	转台角速率/((°)·s^{-1})	频移/kHz
0. 1	0. 501	149. 5	682. 136
1. 2	5. 499	201. 1	917. 500
4. 9	22. 250	251. 8	1 148. 750
9. 9	45. 000	301. 9	1 377. 500
49. 5	225. 957	350. 2	1 597. 649
99. 4	453. 324	399. 9	1 824. 433

建立测速激光雷达输入输出的线性模型:

$$v_{dn} = K \cdot \omega_n + v_0 \qquad (12)$$

式中,v_{dn}为第 n个输入角速率 ω_n的输出频移值;K为模拟直线的斜率;v_0为模拟零位.

将 12个测试点的测试数据带入线性模型,根据最小二乘法拟合,计算得到线性模型非线性度小于 0. 1%.

4　结　论

相干探测要求本振光与信号光的振幅、相位和偏振较好匹配,中频信号的时域波形是判断探测性能的主要标志. 全光测速激光雷达是现代光纤技术与相干探测技术相结合的产物,很好地解决了传统相干探测难于实现波前匹配的难题. 系统的混频效率高,信号时域波形清晰. 数据处理采用变采样和频谱校正算法,提高了频率分辨率. 实验测试结果表明,该相干雷达性能稳定,速度分辨率高,可以实现非表面接触的速度测量.

参考文献 (References)

[1] Bruce M G, Chen Huailin, Li S X. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1231 - 1233

[2] Bruneau D. Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar[J]. Applied Optics, 2001, 40(3): 391 - 399

[3] Ridley K D, Pearson Guy N, Michael H. Improved speckle statistics in coherent differential absorption lidar with in-fiber wavelength multiplexing[J]. Applied Optics, 2001, 40(12): 2017 - 2023

[4] Pearson G N, Ridley K D, Willetts David V. Chirp pulse compression three dimensional lidar imager with fiber optics[J]. Applied Optics, 2005, 44(2): 257 - 265

[5] Takenaka T, Tanaka K, Fukumitsu O. Optical heterodyne detection of an Airy signal field with a Gaussian local oscillator field[C]// Kamerman G W. Select Papers on Laser Radar. Washington: SPIE, 1997: 419 - 425

[6] 马宗峰, 张春熹, 高爽, 等. 相干激光雷达接收机混频效率[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 377 - 379
Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Gao Shuang, et al. Mixing efficiency in coherent lidar receiver[J]. Optical Technique, 2006, 32(Suppl): 377 - 379(in Chinese)

[7] Donald K J, Martin B M, Bradley D D. Heterodyne ladar system efficiency enhancement using single mode optical fiber mixers[J]. Optical Engineering, 1995, 34(11): 3122 - 3129

[8] Weyrauch T, Vorontsov M A, Gowens J W, et al. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication[C]// Voelz D G, Ricklin J C. Free-Space Laser Communication and Laser Imaging. Washington: SPIE, 2002: 177 - 184

[9] McGrath A. An Erbium: glass coherent laser radar for remote sensing of wind velocity[D]. Australia: The Flinders University of South Australia, 1998

[10] 江志红, 袁俊泉, 王展, 等. 一种新的多频连续波雷达数据采集系统设计[J]. 现代雷达, 2006, 28(3): 51 - 54
Jiang Zhihong, Yuan Junquan, Wang Zhan, et al. A new design of multifrequency radar data acquisition system[J]. Modern Radar, 2006, 28(3): 51 - 54(in Chinese)

(责任编辑:赵海容)