

利用微波调制激光技术测速的实验研究

郝文泽^{1,2}, 胡 雄¹, 徐轻尘¹, 宋 亮¹, 吴小成¹, 王 鑫³

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京气象应用研究所, 北京 100190)

摘要: 为了验证微波调制激光技术进行速度测量的可靠性, 构建了一套通过微波调制激光技术测速的实验系统。利用激光作为载波, 微波作为模拟调制信号对激光信号进行强度调制, 光电探测器对信号光强度进行直接探测。利用射频电路, 获得多普勒频移数据反演发射端和接收端相对运动速度。同时通过测量运动距离和时间计算平均运动速度, 作为第三方数据, 用于与微波调制激光技术测速的数据进行比较。理论分析了这套系统的原理并对其进行了实验验证。实验结果表明, 利用微波调制激光技术测速的数据与第三方数据平均偏差小于 2.0%, 符合性好。

关键词: 微波调制激光技术; 多普勒频移; 速度测量

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0306002

Experimental research on velocity measurement based on microwave modulated laser technologies

Hao Wenze^{1,2}, Hu Xiong¹, Xu Qingchen¹, Song Liang¹, Wu Xiaocheng¹, Wang Xin³

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to verify the reliability of the velocity measurement by microwave modulated laser technologies, a system of microwave modulated laser velocity measurement was developed. In the system, laser as carrier was intensity-modulated by microwave signal, transmitted the signal intensity was directly detected by the receiver on a movement platform. After the signal processing, the Doppler frequency shift data was obtained, from which the relative velocity was obtained. Meanwhile, the average velocity as the third party data was calculated by measurements of the movement distance and time, which was used to compare with velocities calculated by Doppler shift. The theoretical analysis and verification experiment are presented and the results show that the velocities calculated by Doppler shift are in good agreement with the third party velocities with a mean deviation of 2.0%.

Key words: microwave modulated laser technologies; Doppler shift; velocity measurement

收稿日期: 2016-05-06; 修订日期: 2016-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(41104099); 高分专项(GFZX04060103)

作者简介: 郝文泽(1990-), 男, 硕士生, 主要从事临近空间激光探测技术方面的研究。Email: wenze1323@163.com

导师简介: 胡雄(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事临近空间环境物理及其应用方面的研究。Email: xhu@nssc.ac.cn

0 引言

微波调制激光技术是将微波信号调制于载波激光上进行传输的一种技术,主要应用于光控相控阵雷达、光通信、高分辨测距以及水下目标探测等系统应用中^[1-8]。微波调制激光技术可利用多普勒效应对运动目标的速度进行测量。调制激光的办法主要有双频激光拍频和外调制技术^[9]。2007年,李磊等演示了一种变光外差为电外差的双频激光位移探测系统^[10],经过声光移频器的光束与原光束拍频产生 100 MHz 的信号成功用于位移探测。2010年,张艳艳等提出了一种利用双频激光器进行多普勒测速的方法^[11],2013年,刘长清等提出了一套双纵模 He-Ne 激光器的多普勒测速系统^[12]。同年,Vallet M 等提出了一套基于射频调制光脉冲的测速仪^[13],实验测速数据符合理论推导。相比于双频激光拍频技术,外调制技术更加容易获得微波调制激光信号。北京交通大学的傅迎光在其硕士论文中提出了一套基于调制光源的光子多普勒测速系统^[14],采用数字相位调制方式进行测距测速,测距实验结果与仿真相符。2011年,于啸等构建了一套用线性调频信号去调制激光振幅的激光相干雷达实验系统^[15],成功获得了测距和测速结果。上述技术都属于相干激光测速技术,对激光器要求较高。中国海洋大学毕德仓在其博士论文中提出了微波调制激光雷达应用于大气风速测量的新方法^[16],该方法基于激光器的强度调制,降低了对激光器线宽的要求,更容易实现;但是,迄今未见有关实验结果报道。

文中构建了一种微波调制激光测速实验系统,采取强度调制和直接探测方式,成功获得了测速实验数据,并对测速数据与第三方速度数据进行比较,首次验证了这种方法的可靠性。

1 微波调制激光测速系统原理

微波调制激光测速技术是利用微波信号对激光进行强度调制,提取直接探测信号的多普勒频率,实现对运动速度的测量,激光调制采取马赫曾德电光强度调制器(MZM),下面简要介绍调制器和测速的原理。

1.1 马赫曾德电光强度调制器原理

由激光器输出的光输入 MZM 中,设 MZM 的输

入光信号为^[1,16]:

$$E_{in}=A\exp[j(\omega_0t+\varphi_0)] \quad (1)$$

式中: ω_0 为光信号圆频率; φ_0 为相位; A 为振幅,光信号进入 MZM 的第一个耦合器被分成功率相等的两束同频同相光,忽略 MZM 的插入损耗,那么这两列相同的光信号可表示为:

$$E_{in1}=\frac{\sqrt{2}}{2}A\exp[j(\omega_0t+\varphi_0)] \quad (2)$$

$$E_{in2}=\frac{\sqrt{2}}{2}A\exp[j(\omega_0t+\varphi_0)] \quad (3)$$

经过波导臂传输,其中一个波导臂在外加微波电场的作用下,其折射率呈现微波频率变化。它的波动函数可以写为:

$$E_{out1}=A_0\exp[j(\omega_0t+m\cos(\Omega t)+\varphi_0)] \quad (4)$$

另一路的波导臂的波动函数为:

$$E_{out2}=A_0\exp[j(\omega_0t+m\cos(\Omega t)+\varphi_0+\pi/2)] \quad (5)$$

$$\sqrt{2}A_0=A \quad (6)$$

调制器工作在线性工作点,因此两臂的固有相位差为 $\pi/2$, m 为调制深度。两束光在第二个耦合器相遇时,其波动函数为:

$$E_1=2J_1(m)\cos[(\Omega+v\Omega/c)t]+\exp[j(\omega_0t+v\omega_0/c)t+\varphi_0] \quad (7)$$

利用贝塞尔函数展开得:

$$E_{out}=A_0\sqrt{1+J_0^2(m)}\exp[j(\omega_0t+\varphi_0)]+2A_0\sum_1^{\infty}(-1)^n\times J_{2n}(m)\cos(2n\Omega t)\exp[j(\omega_0t+\varphi_0)]+2A_0\sum_1^{\infty}(-1)^n\times J_{2n+1}(m)\cos[(2n+1)\Omega t]\exp[j(\omega_0t+\varphi_0)] \quad (8)$$

第一项为光载波,第二项为偶数次边频带,第三项为奇数次边频带。经过傅里叶变换可以得到频率为: $\omega_0, \omega_0\pm\Omega, \omega_0\pm2\Omega, \omega_0\pm3\Omega\cdots$

可见,MZM 输出信号的频谱由光载波和对称分布在光载波两旁的多个高阶边带组成。

一次边频带能量要高于二次和二次以上的边频带能量。光电探测器直接对光信号强度探测,探测器为交流响应,光载波项和其他高阶项通过软硬件滤波方法来进行抑制,选取一阶边频带为使用频率。

1.2 微波调制激光测速原理

当接收站相对于发射站具有相对运动速度时,运动速度为 v ,则接收站接收的光波动函数为^[12]:

$$E_{Dout}=A_0(1+J_0(m))\exp[j(\omega_0+v/c)t+j\varphi_0]+A_0\sum_1^{\infty}(-1)^n J_{2n}(m)\times\exp[j(\omega_0+2n\Omega+v(\omega_0+2n\Omega/c)t+j\varphi_0]+A_0\sum_1^{\infty}(-1)^n J_{2n+1}(m)\times\exp[j(\omega_0+(2n+1)\Omega+$$

$$v(\omega_0+(2n+1)\Omega/c)t+j\varphi_0] \quad (9)$$

从上式可以看出多普勒频移后的光束包含了所有边频的多普勒频移项, c 为光速, 大小为 3×10^8 , 在这里只考虑一次边频带($n=0$):

$$E_1=2J_1(m)\cos[(\Omega+v\Omega/c)t]\exp[j(\omega_0+v\omega_0/c)t+j\varphi_0] \quad (10)$$

公式(10)表示不仅光载波发生多普勒频移而且调制于光载波上的微波信号也发生了多普勒频移。

从激光的角度出发, 解调角频率 $\omega_0+v\omega_0/c$ 的变化可以得到多普勒频移。激光波长 $\lambda=1550\text{ nm}$, 则 1 m/s 的速度对应的多普勒频移为 0.645 MHz , 100 m/s 的速度对应的多普勒频移为 64.5 MHz , 可以看出多普勒信号的频率范围高达 10^7 量级, 一般电路难以处理。

从微波的角度出发, 解调角频率 $\Omega+v\Omega/c$ 的变化也可以得到多普勒频移。微波角频率为 $\Omega=2\pi \times 1.772 \times 10^9\text{ Hz}$, 则 1 m/s 的速度对应的多普勒频移为 5.9 Hz , 100 m/s 的速度对应的多普勒频移为 590 Hz , 很容易利用在微波频域内成熟、精确的信号处理电

路获取。

相对运动速度与多普勒频率的关系表达式为:

$$v=2\pi f_D/c \quad (11)$$

式中: f_D 为微波调制信号的多普勒频移。

2 微波调制激光测速实验系统

为了验证微波调制激光技术测速的可靠性, 设计并搭建了微波调制激光测速实验系统。实验系统框图如图 1 所示。整个实验系统分为三部分: 第一部分为光信号发射站; 第二部分为获取第三方速度数据的实验装置; 第三部分为可移动光信号接收站。

在第一部分中, 采用的激光光源为北京康冠世纪光电科技有限公司提供的中心频率为 1553.8 nm 的半导体 DFB 连续光激光器(OS-D-D-1-1-1550-S-20-FC/APC), 最大输出功率为 21 mW , 调制器为该公司提供的 MZM 电光强度调制器(KG-AM-10), 最大输入光功率为 100 mW , 最大调制速率 10 Gbps 。

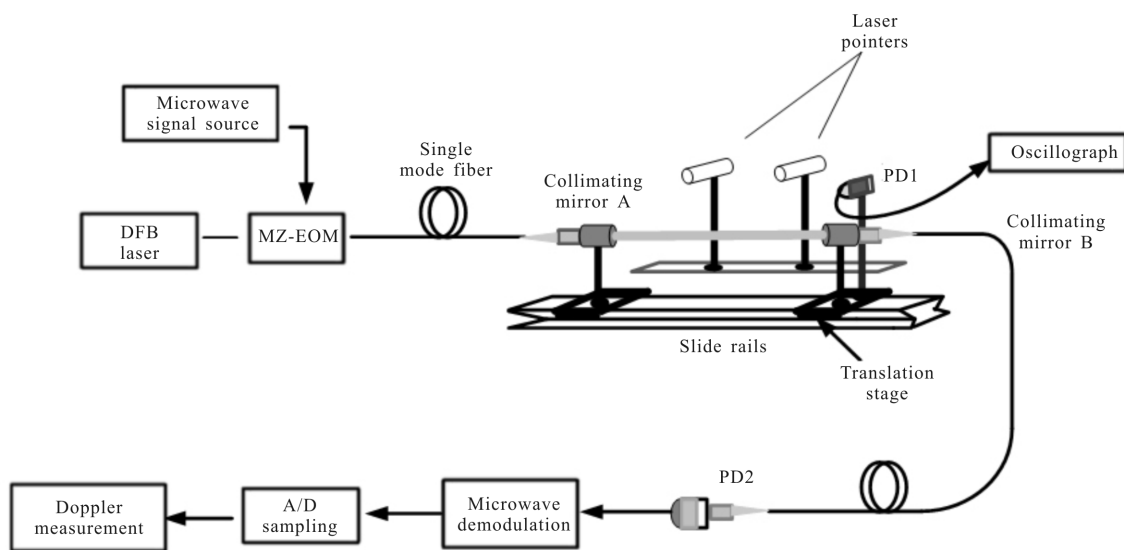


图 1 实验系统结构框图

Fig.1 Block diagram for experimental system

由光源输出的激光经过 MZM, 将 1.772 GHz 的微波信号调制于激光上输出, 输出的信号光经过单模光纤传输, 耦合到准直镜 A 内出射; 在第二部分中, 准直镜 A 固定于滑轨左端不可移动平台上, 在滑轨的另一端是一可移动的平台, 在其上固定可见光电探测器 PD1 和接收信号光准直镜 B, 将 PD1 连接示波器(Agilent DSO7104A), PD1 与两只可见光激光笔固定在同一高度, 通过手动来缓慢移动固定于滑轨上

的可移动平台, 示波器用来测量两支激光笔激光入射到光电探测器光敏面上所经过的时间差, 然后再测得两只激光笔之间的距离, 通过计算可以得到接收端的平均移动速度, 作为第三方速度数据; 在第三部分中, 光电探测器 PD2 为北京康冠光电公司提供的光电探测器(KG-PT-10G), 响应波长为 $1060\sim 1650\text{ nm}$, 饱和光功率为 1 mW , 在接收端将准直镜 B 接收到的信号光通过光纤输入光电探测器 PD2 中,

再通过滤波、微波解调, A/D 采样, 最后由多普勒检测系统来检测得到微波的多普勒频移。微波调制激光测速实验系统采样率为 19.53 kHz, 最大可测量多普勒频移为 9.765 kHz, 理论最大可测速度为 1 653 m/s。

3 速度测试实验

于 2015 年 1 月份在国家空间科学中心临近空间环境研究室光学实验室内开展了微波调制激光技术测速的验证性实验, 一共获得了 6 组不同运动速度的实验数据, 负速度表示相背离运动, 正速度表示相向运动。将获得的实验数据与第三方速度数据进行比较, 如表 1 所示。

u_t 为第三方数据, 如表中第一列所示, 由 $u_t=L/t$ 计算得来, L 为激光笔发射的光束入射到可见光探测器光敏面上之间的距离差, 也即运动距离, 大小为 49.93 ± 0.1 , 单位为厘米, 通过钢尺来测量, 最小单位为 0.1cm。一共测量 8 组距离差数据, 得到其统计平均值, 保留到小数点后两位, 为 49.93 cm。运动距离不确定度 σ_L 大小为 0.1 cm; t 为所需运动时间, 运动时间由示波器读数给出, 读数不确定度 σ_t 为 0.02 s, u_t 的不确定度 σ_{u_t} 由 σ_L 和 σ_t 经不确定传递函数计算得来。不确定度传递公式为: $\sigma_{u_t}=\sqrt{(\sigma_L/t)^2+(L\sigma_t/t^2)^2}$, 由此得出表 1 中的速度不确定度 σ_{v_t} 。

表 1 速度测量结果

Tab.1 Results of velocity measurement

$u_t\pm\sigma_{u_t}/m\cdot s^{-1}$	$v\pm\sigma_v/m\cdot s^{-1}$	Relative error
-0.167±0.001	-0.169±0.047	1.2%
-0.151±0.001	-0.152±0.045	0.7%
-0.128±0.001	-0.127±0.037	-0.8%
0.145±0.001	0.152±0.045	4.8%
0.165±0.001	0.169±0.047	2.4%
0.215±0.002	0.220±0.063	2.3%

多普勒测速数据 v 如表中第二列所示, 其测量方法以其中一组实验为例进行说明。图 2 是第三组实验的原始数据。图中横轴表示采样时间, 单位为秒; 纵轴表示整个运动过程内的相位变化, 单位为弧度。可以看出整个运动过程较为匀速, 根据相位和时

间的关系可以求出每一时刻的瞬时速度。但是由于第三方速度数据为固定距离内的平均速度, 在进行多普勒数据处理时, 提取图中虚线(2~6.5 s)时间区间内的一段数据, 利用快速傅里叶变换, 获得多普勒测量结果, 由公式(11)计算得到这段时间区间内的平均速度 v , 大小为 0.127 m/s。为了提高频率分辨率, 将数据做补零插值至 20 s。需要指出的是, 第三方速度数据与多普勒测速数据的时间区间不是完全对等, 而是包含于多普勒测速数据的时间区间内。

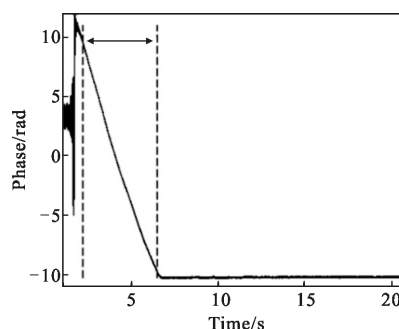


图 2 相位随时间的变化

Fig.2 Phase vs time

多普勒测速数据 v 的不确定度 σ_v 由不确定度传递公式 $\sigma_v=0.169\sigma_{f_d}$ 得出, σ_{f_d} 为频率不确定度, 0.169 为不确定度传递因子。每组实验所选的时间区间不同, 以图 2 为例, 快速傅里叶变换的时间窗口为 4.5 s, 相对应的频率不确定度为 0.22 Hz, 则速度的不确定度为 0.037 m/s。

相对偏差(Relative error)由 u_t 和 v 给出, 公式为: $Relative\ error=v-u_t/v\times 100\%$, 计算结果如表 1 所示。

从实验结果来看两者符合性好, 平均相对偏差小于 2.0%, 实验结果从原理上验证了该技术用于速度测量的可靠性。基于现有的实验条件暂时只能开展低速测量实验, 如前所述, 理论上文中实验系统可以测量的速度范围为小于 1.653 km/s。

4 结论

文中构建了一套利用微波调制激光技术测速的实验系统。其原理是: 将激光作为载波, 利用微波信号源和马赫曾德尔调制器对激光进行强度调制, 接收端通过光电探测器对信号光进行直接探测, 解调得出微波信号的多普勒信息, 最后获得相对运动速度。通过

开展测速实验,成功获取实验数据,实验结果首次验证了这种技术应用于速度测量的可行性。

该技术相比于相干激光测速系统,大大降低了对激光器线宽和频率稳定性的要求,更加容易实现。微波调制激光技术在大气激光雷达、目标测速等领域具有广泛的应用前景和发展潜力。

参考文献:

- [1] Pu Tao, Wen Chuanhua, Xiang Peng, et al. The Principle and Application of Microwave Photonics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 235-240. (in Chinese)
蒲涛, 闻传花, 项鹏, 等. 微波光子学原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 235-240.
- [2] Zhou Bo, Zhang Hanyi, Zheng Xiaoping, et al. Developing status of microwave photonics [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(2): 81-84. (in Chinese)
周波, 张汉一, 郑小平, 等. 微波光子学发展动态[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 81-84.
- [3] Linda Jeanne Mullen, Amarildo J C Vieira, Peter R Herczfeld. Application of radar technology to aerial lidar systems for enhancement of shallow underwater target detection[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 1995, 43(9): 2370-2377.
- [4] Stann B L, Ruff W C, Sztankay Z G. Intensity-modulated diode laser radar using frequency-modulation/continuous-wave ranging techniques [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(11): 3270-3278.
- [5] Liu Yuzhou, Zhu Guoli, Zhao Bin. Phase-shift range finder based on Mach-Zehnder Modulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(21): 99-104. (in Chinese)
刘玉周, 朱国力, 赵斌. 基于马赫增德尔调制器的相位式激光测距[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 99-104.
- [6] Zhou Bo, Liang Kun, Ma Yong, et al. Semi-physical simulation platform of filter bandwidth of modulated lidar on optical carrier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 930-934. (in Chinese)
周波, 梁琨, 马泳, 等. 载波调制激光雷达滤波带宽的半实物仿真平台[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 930-934.
- [7] Yang Ran, Zhang Gaofei, Zhang Zichen, et al. Design and experiment of a laser ranging scheme for aerospace applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 700-706. (in Chinese)
杨冉, 张高飞, 张紫辰, 等. 一种面向空间应用的激光测距方案设计实验[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 700-706.
- [8] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsan. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 28-38. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 28-38.
- [9] Morvan L, Lai N D, Dolfi D, et al. Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5702-5712.
- [10] Li Lei, Zhao Changming, Gao Lan, et al. Laser detection by electronic instead of optical using two-frequency laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 249-252. (in Chinese)
李磊, 赵长明, 高岚, 等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 249-252.
- [11] Zhang Yanyan, Huo Yujing, He Shufang, et al. A new dual-frequency laser Doppler velocity measurement method [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 694-696. (in Chinese)
张艳艳, 霍玉晶, 何淑芳, 等. 一种新的双频激光多普勒测速方法的实验研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 694-696.
- [12] Liu Changqing, Nie Xiaoming, Fu Yangying, et al. Laser Doppler velocimeter based on dual-longitudinal-mode He-Ne laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 921-924. (in Chinese)
刘长青, 聂晓明, 傅杨颖, 等. 双纵模 He-Ne 激光器的多普勒测速系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 921-924.
- [13] Vallet M, Barreaux J, Romanelli M, et al. Lidar-Radar velocimetry using RF-modulated optical pulses generated by non-resonant frequency-shifted feedback [C]//CLEO: Science and Innovations, 2013.
- [14] Fu Yingguang. Photonic Doppler velocimetry system based on modulated light source [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
傅迎光. 基于调制光源的光子多普勒测速系统 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [15] Yu Xiao, Hong Guanglie, Ling Yuan, et al. Homodyne detection of distance and velocity by chirped-amplitude modulated lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 13-19. (in Chinese)
于啸, 洪光烈, 凌元, 等. 啁啾调幅激光雷达对距离和速度的零差探测[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 13-19.
- [16] Bi Decang. Research on key technologies for microwave modulated lidar and temperature lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)
毕德仓. 微波调制测风激光雷达新方法和激光雷达测量温度关键技术的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.