

doi: 10.3788/gzxb20144301.0101002

新型双通道 Mach-Zehnder 干涉仪多普勒测风 激光雷达鉴频系统研究及仿真

汪丽, 谭林秋, 邢美丽, 狄慧鸽, 王玉峰, 华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要: Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪可作为鉴频器件应用于多普勒测风激光雷达系统中. 鉴于一般 M-Z 干涉仪的稳定性差, 不易于调节的缺点, 提出一种基于双棱镜结构的新型双通道 M-Z 干涉仪作为多普勒测风激光雷达鉴频器件. 在进行探测原理分析的基础上, 利用光学设计软件对其鉴频系统结构进行了参量优化设计和系统仿真. 通过设定实验参量并进行光线追迹模拟仿真实验结果, 应用反演理论获得了风速值. 利用多普勒频移公式计算获得理论风速并与仿真结果进行了对比, 结果表明反演仿真风速与理论风速值基本吻合, 标准差为 0.46 m/s. 此新型双通道 M-Z 干涉仪可以作为鉴频器件应用于多普勒测风激光雷达系统中, 在光路的调节及提高系统稳定性上具有优势.

关键词: 大气探测; 激光雷达; 多普勒测风; 鉴频系统; 双通道 M-Z 干涉仪; 仿真分析; 数据反演

中图分类号: TN958.98; O436.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2014)01-0101002-5

System Research and Simulation of New Type Dual-channel Mach-Zehnder Frequency Discriminator for Doppler Lidar Wind Measurement

WANG Li, TAN Lin-qiu, XING Mei-li, DI Hui-ge, WANG Yu-feng, HUA Deng-xin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Mach-Zehnder (M-Z) interferometer can be used in Doppler lidar for wind measurement as frequency discriminator. The common M-Z interferometer's stability is poor and not easy to adjust. A new type dual-channel M-Z interferometer was proposed as frequency discriminator based on dual prism. Through analyzing the wind measurement theory, the system was optimized and designed with optical design software. The wind velocity was retrieved from simulation result through setting experiment parameter. Compared with the theoretical wind velocity calculated from Doppler frequency shift formula, the result indicates that the retrieval simulation wind velocity agrees with theoretical wind velocity; the standard deviation is 0.46 m/s. So the new type structure can be applied in Doppler wind lidar as frequency discriminator. The optical path is easy to adjust and the system stability is improved.

Key words: Atmosphere measurement; Lidar; Doppler wind measurement; Frequency discriminator system; Dual channel M-Z interferometer; Simulation analysis; Data retrieval

OCIS Codes: 010.3640; 030.1640; 060.2310

0 引言

多普勒测风激光雷达是大气风场探测的重要手段, 可以实现准确快速地探测大气三维风场信息, 且其时空分辨率高, 机动灵活, 可实现风场的精细探测. 多

普勒测风激光雷达分为相干探测和非相干探测(直接探测). 直接探测是采用鉴频器件鉴别由于风速产生的大气回波激光的多普勒频移量的变化从而反演风速的方法, 包括单边缘探测、双边缘探测及条纹成像等方法. 鉴频器是实现直接探测的关键部件. 国内外广泛采

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205189)、教育部博士点基金新教师类(No. 20106118120009)资助

第一作者: 汪丽(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达大气风场探测技术. Email: wlfuyun@xaut.edu.cn

收稿日期: 2013-05-24; 录用日期: 2013-07-26

<http://www.photon.ac.cn>

用 Fabry-Perot(F-P)干涉仪^[1-8]、斐索干涉仪^[9]作为鉴频器件. 日本、法国等科研人员提出将 Mach-Zehnder (M-Z)干涉仪^[10-11]作为鉴频器用于多普勒激光雷达风场探测系统并进行了深入研究. 研究表明,双通道 M-Z干涉仪(Double MZ, DMZ)的风速测量误差比 F-P干涉仪低 1.4 倍,四通道 M-Z干涉仪(Quad MZ, QMZ)对瑞利-米后向散射比不敏感,但其探测误差是 DMZ的 1.4 倍^[11]. 通过旋转平面反射镜的倾斜角度,可以成直干涉条纹在探测器上,实现条纹成像方法的探测. 相比于 F-P干涉仪, M-Z干涉仪作为鉴频器具有光通量大、能实现视场展宽并能成直条纹的优点,但稳定性需要严格保证^[12-16].

本文提出了一种基于双棱镜结构的新型双通道 M-Z干涉仪. 此结构有利于光路的调节,只需调节一个直角棱镜的位置便可实现光程差的变化,提高系统稳定性. 在分析多普勒测风激光雷达原理的基础上,对新型双通道 M-Z干涉仪的系统结构参量进行了优化设计,用光学设计软件对系统进行了仿真分析,设定实验参量,通过波长的位移模拟风速,获得探测结果,最后进行了风速数据反演,得到了与理论风速相吻合的结果.

1 多普勒测风激光雷达系统

基于 M-Z干涉仪的测风激光雷达系统主要包括激光发射系统、接收系统、鉴频系统及数据采集处理系统,图 1 为 M-Z干涉仪的测风激光雷达系统结构. 激光发射系统采用频率稳定的种子注入 Nd:YAG 激光器,经二倍频、三倍频晶体和频出射波长为 355 nm 的激光,光束经过准直系统扩束射向大气;发射激光经准直扩束一小部分光束被部分反射镜直接反射到望远镜中,然后这部分光束经接收系统、鉴频系统,这样此信号不仅可以作为测风的基准信号,而且经过数据处理与算法还可以控制种子激光器锁频和调节干涉仪的光

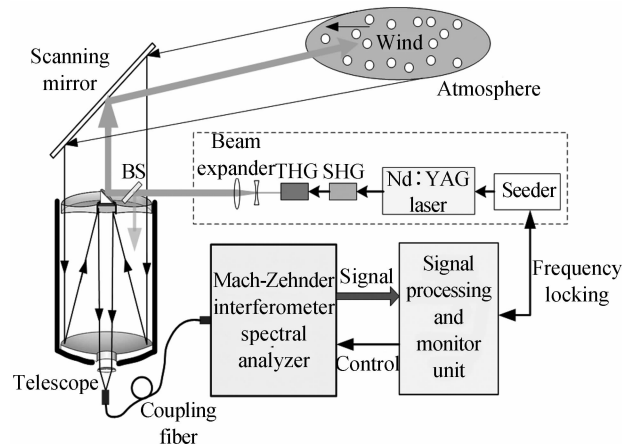


图 1 基于 MZ 干涉仪的测风激光雷达系统
Fig. 1 The configuration of wind lidar based on MZ interferometer

程差. 回波信号采用口径为 250 mm 的卡塞格林望远镜接收;望远镜接收的散射回波耦合到多模光纤中,信号通过光纤的传输经透镜准直进入 M-Z干涉仪鉴频器,鉴频器输出信号经光电转换、数据采集,数据最终送工控机反演处理.

2 鉴频器 DMZ 干涉仪的系统设计及探测原理分析

DMZ干涉仪的通常结构如图 2. 为了便于光路的调节,重新设计了 DMZ干涉仪的光路结构,如图 3. 图中 L 表示透镜(Lens),F 为滤光片(Filter),M 表示反射镜(Mirror),BS 表示分光棱镜(Beam-splitter),Glass 是光程差补偿的光学玻璃,P 表示棱镜(Prism),PZT 为压电陶瓷,PMT 为光电倍增管. 光路采用的转向棱镜将原本在同一直线上的反射镜分离,从而更加方便光程差的调节,上述结构的关键是两个 BS 和两个反射镜分别在平行四边形四个顶点上,一路光路固定,调节另一光路的转向棱镜实现光程差的调整.

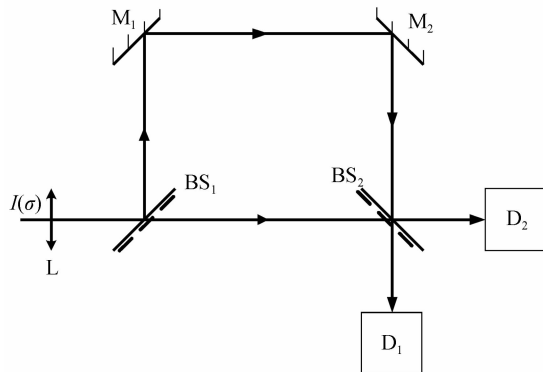


图 2 DMZ 干涉仪
Fig. 2 The optical arrangement of DMZ interferometer

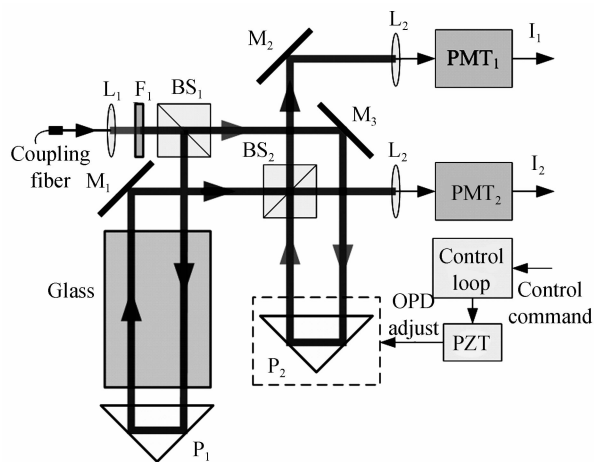


图 3 DMZ 干涉仪的鉴频光路
Fig. 3 The configuration of wind lidar DMZ

DMZ干涉仪的鉴频光路中,光信号经耦合光纤输出,经透镜 L₁ 准直成平行光束,再经过窄带滤光片 F₁ 滤去部分背景光,然后光束被 BS₁ 分束成强度相等的

两路(分光比为 50:50),其中透过光定义为主光路 l_1 ,反射光为 l_2 ,光路 l_1 经 M_1 、 P_2 转向,再经过 BS_2 分光(分光比为 50:50)为两路光强相等的光信号,最后经透镜聚焦入射到 PMT 探测器上;同样光路 l_2 也经过转向经 BS_2 分光,并与光路 l_1 分出的两路光产生干涉,不过光路 l_2 经过了一块光学玻璃,补偿了光程差,两个 PMT 输出信号送入数据采集卡,经工控机控制数据的采集、处理与保存,而且工控机通过信号的处理还可以反馈调节干涉仪光程差,这个过程是通过工控机发送控制命令,控制硬件电路从而驱动压电陶瓷,实现光程差的微调。

由 DMZ 干涉仪测风激光雷达原理^[5]可得响应函数 Q 与大气风速 v 的关系为

$$Q(v) = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \exp[-\pi^2 \gamma^2 l^2] \cdot \cos \left[2\pi l \sigma_0 \left(1 + \frac{2v}{c} \right) \right] \quad (1)$$

式中 S_1, S_2 为两探测器接收到的信号强度, l 为两光路的光程差, σ_0 表示入射光波数, γ 表示光谱最大值 $1/e$ 处的半宽(Full Width at Half Maximum, FWHM), 表示为

$$\gamma = \frac{2\sigma_0}{c} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中 k 为 Boltzmann 常量, T 是温度, m 是大气平均分子质量, c 表示光速。

由 DMZ 测风误差最小条件,可得光程差的最优化条件为

$$l_{OPT} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\gamma} \quad (3)$$

同时满足

$$l = \frac{2k+1}{4\sigma_0} \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (4)$$

设置了最优光程差,可由式(1)反演风速值。

3 DMZ 结构系统设计、仿真及数据反演

利用 Zemax 的非序列模式(Non-Sequential)模拟 DMZ 干涉仪鉴频系统部分,仿真系统结构如图 4,仿真原理是通过波长的微小变化经过系统后,得到探测器总能量的变化,从而反演得风速的变化。通过反演风速的仿真值与理论值的对比,验证 DMZ 干涉仪鉴频测风的可行性。

仿真系统中,光源采用点光源,光源发射角为 10° ,分析光线数为 500 000 条,功率 1 000 W。所以,每条光线功率为 $1/500$ W,准确度可以满足要求。发射的光经透镜准直后射入干涉仪,BS 分光棱镜采用分光片实现;由于仿真采用理想点光源,因此光程差补偿玻璃平板不再考虑;探测器大小为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$,像元个数为

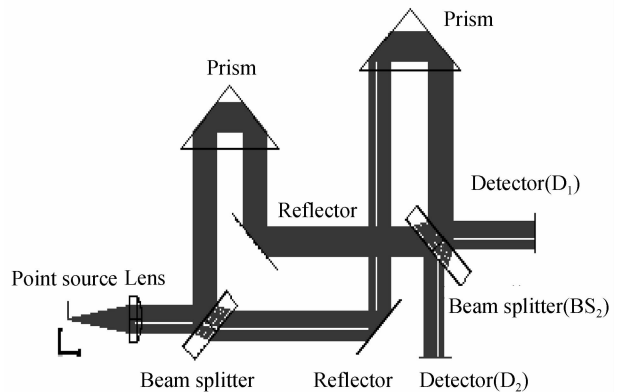


图 4 DMZ 干涉仪 Zemax 仿真

Fig. 4 The Zemax simulation of DMZ interferometer 500×500 ;通过光路追迹可以直接在探测器看到光斑情况并准确读出两个探测器的输出功率大小,图 5 为两探测器接收到的光斑图。

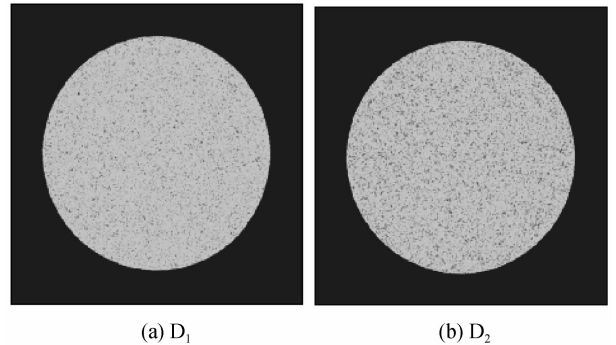


图 5 DMZ 干涉仪两通道光斑

Fig. 5 Light spot of DMZ interferometer

建立仿真系统以后,设定入射激光波长 $\lambda_0 = 355 \text{ nm}$,参考温度 $T_0 = 250 \text{ K}$,计算最优光程差 $l_{OPT} = 3.17 \text{ cm}$,因此可以通过调节三角转向棱镜实现光程差 3.17 cm ,但是光程差同时还要满足式(4),因此在满足最优光程差 $l_{OPT} = 3.17 \text{ cm}$ 后,微调转向棱镜,使其满足式(4),微调范围在一个入射波长 λ 以内。探测器的能量计算采用相干照度的形式计算模拟,微调入射波长 λ ,记录每一步仿真数据,表 1 为仿真结果。

分析表 1 中仿真数据易知,软件仿真两探测器的输出总功率并不是恒定的,所以,输出总功率需归一化校正,然后才进一步利用式(1)反演仿真风速 v_s ;又由多普勒频移公式 $\sigma = \sigma_0(1 + 2v/c)$ 可以直接计算得理论风速 v_t ,从而可以分析计算仿真误差。图 6 显示了波长变化对应的仿真风速和理论风速的变化,由图可知仿真与理论计算的风速很吻合,误差较小,都在可允许范围内。

反演计算可得风速误差最大值为 $\delta v_{\max} = 1.16 \text{ m/s}$, δv 的标准差为 $D(\delta v) = 0.46 \text{ m/s}$ 。误差是由光线追迹的有限光线数、探测器的有限分辨率以及数据处理过程中算法误差引起的,风速误差在允许的范围,从而验证了测风激光雷达 DMZ 干涉仪鉴频的可行性。

表 1 仿真数据
Table 1 Simulation data

$\lambda - \lambda_0 / \text{m}$	P_1 / W	P_2 / W	Simulation wind velocity $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Theoretical wind velocity $v_t / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Error $\delta v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
-3e-13	127.287	99.903	168.322	169.173	-0.85
-2.7e-13	130.460	104.967	153.417	152.256	1.16
-2.5e-13	132.707	108.907	141.565	140.978	0.59
-2.3e-13	134.813	112.887	129.387	129.699	-0.31
-2e-13	138.207	118.947	112.445	112.782	-0.34
-1.7e-13	141.607	125.117	95.590	95.865	-0.28
-1.5e-13	143.843	129.287	84.155	84.586	-0.43
-1.3e-13	146.203	133.490	73.274	73.308	-0.03
-1e-13	149.717	139.917	56.379	56.391	-0.01
-7e-14	153.127	146.360	39.011	39.474	-0.46
-5e-14	155.627	150.710	28.374	28.195	0.18
-3e-14	158.110	155.110	17.434	16.917	0.52
0	161.750	161.725	0.562	0	0.56
2e-14	164.220	166.223	-10.896	-11.278	0.38
5e-14	167.853	172.967	-28.432	-28.196	-0.24
7e-14	170.437	177.493	-39.273	-39.474	0.20
1e-13	174.210	184.325	-56.316	-56.391	0.075
1.2e-13	176.733	188.920	-67.806	-67.669	-0.14
1.5e-13	180.513	195.813	-84.970	-84.586	-0.38
1.7e-13	183.097	200.427	-96.020	-95.865	-0.16
2e-13	186.900	207.370	-113.090	-112.782	-0.31
2.5e-13	193.293	219.010	-141.210	-140.977	-0.24
3e-13	199.703	230.647	-168.660	-169.173	0.51

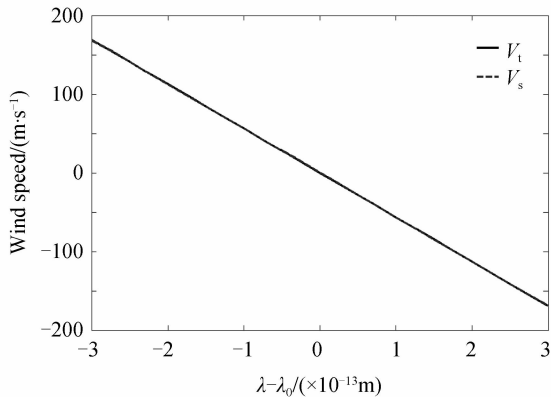


图 6 理论与仿真风速的对比

Fig. 6 The comparison of theory and simulation wind speed

4 结论

为了便于光程差的调节,本文提出了新型结构的双通道 DMZ 干涉仪系统作为多普勒测风激光雷达鉴频器。在此基础上分析了探测原理,并对系统进行了模拟仿真及数据反演计算,结果表明误差在允许范围内,此结构 DMZ 干涉仪系统可作为多普勒激光雷达鉴频器进行风场探测。

参考文献

[1] KORB C L, GENTRY B M, WENG C Y. Edge technique:

theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(21): 4202-4213.

[2] FLESIA C, KORB C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(3): 432-440.

[3] MCKAY J A, REES D. Space-based Doppler wind lidar: modeling of edge detection and fringe imaging Doppler analyzers [J]. *Advance in Space Research*, 2000, **26**(6): 883-891.

[4] WANG Jin-xue, DEHRING M, NARDELL C, *et al.* Direct detection Doppler wind lidar: ground-based operation to space [C]. SPIE, 2003, **5154**: 93-104.

[5] BU Ling-bing, CHEN Wei-biao, ZHOU Jun, *et al.* Studies of fringe-technique wind lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 175-178.

卜令兵,陈卫标,周军,等. 条纹技术测风激光雷达研究 [J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 175-178.

[6] SUN Dong-song, ZHONG Zhi-qing, ZHOU Jun, *et al.* Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. *Optical Review*, 2005, **12**(5): 409-414.

[7] XIA Hai-yun, SUN Dong-song, YANG Yuan-hong, *et al.* Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(29): 7120-7131.

[8] SHU Zhi-feng, TANG Lei, WANG Guo-cheng, *et al.* Application of triple Fabry-Perot etalon for Rayleigh wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(8): 1474-1480.

舒志峰,唐磊,王国成,等. 三通道 Fabry-Perot 标准具在瑞利测

- 风激光雷达中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(8): 1474-1480.
- [9] MCKAY J A. Assessment of a multibeam Fizeau wedge interferometer for Doppler wind lidar[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(9): 1760-1767.
- [10] LIU Zhao-yan, KOBAYASHI T. Differential discrimination technique for incoherent Doppler lidar to measure atmospheric wind and backscatter ratio[J]. *Optical Review*, 1996, **3**(1): 47-52.
- [11] DIDIER B. Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(3): 391-399.
- [12] DIDIER B. Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular Doppler wind lidar [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(3): 503-509.
- [13] DIDIER B, ANNE G, ALBERT H, *et al.* Wind-velocity lidar measurements by use of a Mach-Zehnder interferometer, comparison with a Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(1): 173-182.
- [14] DIDIER B. Fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer as a spectral analyzer for molecular doppler wind lidar [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(3): 503-510 .
- [15] DIDIER B, JACQUES P. Simultaneous measurements of particle backscattering and extinction coefficients and wind velocity by lidar with a Mach-Zehnder interferometer: principle of operation and performance assessment [J]. *Applied Optics*, 2003, **42** (6): 1101-1114.
- [16] CAO Zhen-zhou, LIU Wei. Experimental study on the hydrophone characteristics based on all optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39** (S1): 64-66.
- 曹振洲,刘维. 基于光纤马赫-曾德尔干涉仪光纤水听器的实验研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(S1): 64-66.