

新型风成像干涉仪系统响应率的分析与计算

汤超¹, 王金婵¹, 张淳民²

(1. 陕西省宝鸡教育学院, 陕西 宝鸡 721004; 2. 西安交通大学理学院, 西安 710049)

摘要: 简述了新型宽场消色差温度补偿型风成像干涉仪(FATWINDII)的原理,利用等效法和近似法推导出FATWINDII系统响应率的表达式。在增加视场角和增大系统透过率的情况下可以提高系统响应率。根据FATWINDII系统补偿方案和结构参数,计算出迈克耳逊干涉仪的等效空气长度为14.4 cm,推导并计算出系统的透过率约为0.42。根据所用CCD探测器的技术指标和FATWINDII系统的结构参数,计算了系统响应率随视场角和感应像素数目的变化情况,进而分析解释了FATWINDII实验室星载模拟实验中实际CCD感光区域的面积为整个CCD面积的1/16。该研究为星载FATWINDII的设计、研制、定标及数据的后期处理提供了理论依据和实践指导。

关键词: 风成像干涉仪; 系统响应率; 像素; 视场角

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)02-0051-05

Analysis and Calculation of System Responsivity for a Novel Wind Imaging Interferometer

TANG Chao¹, WANG Jin-chan¹, ZHANG Chun-min²

(1. Baoji Education Institute of Shaanxi Province, Baoji 721004, China;

2. School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The basic principle of the field-widened achromatic, temperature-compensated wind imaging interferometer (FATWINDII) is introduced. By using the equivalent and the approximation methods, the expression of the system responsivity in FATWINDII is deduced. The system responsivity can be improved by increasing the Field of View (FOV) and the transmittance of the FATWINDII. According to the structural parameters and compensation scheme of the FATWINDII, the air-equivalent length is 14.4 cm and the system transmittance is about 0.42. According to the specifications of Charge-Coupled Device (CCD) and the structural parameters of the FATWINDII, the variations of the system responsivity with the FOV and the pixel numbers are given analytically and simulated numerically. It is presented that the actual sensitive area is one over sixteen of the CCD in the FATWINDII laboratory space-borne simulation experiments. The study provides a theoretical basis and practical guidance for the design, development, calibration and data post-processing of the space-borne FATWINDII.

Key words: wind imaging interferometer; system responsivity; pixel; field of view

0 引言

近年来,日趋严重的气候和环境问题(如温室效应、沙尘暴和雾霾天气等)已经严重影响了人们的生活,引起了普遍关注。对环境和气候的监测技术研究成为人们亟待解决的热点问题。而在地球大气监测的

研究中,对中高层大气的探测研究是目前国际上地球大气遥感探测的前沿课题。20世纪90年代以来,视场展宽的迈克耳逊干涉仪被成功应用于高层大气风场和温度场的探测^[1-5]。通过探测高层大气中气辉谱线的强度、调制度以及谱线频率的变化来反演目标大气的粒子体辐射率、温度和速度等信息。按照干涉图获取模式的不同,将基于迈克耳逊干涉仪的风成像干涉仪分为动镜扫描型、动态偏振型、静态四分区镀膜型以及静态四分区偏振型等。目前,在卫星遥感应用中得到验证的是动镜扫描型风成像干涉仪。它的代表是由

收稿日期:2015-03-23

修回日期:2015-04-12

基金项目:国家自然科学基金(40875013)

作者简介:汤超(1974—),男,陕西杨凌人,学士,讲师,研究方向为光学和电子信息技术。

加拿大、美国、法国共同研制的风成像干涉仪 (Wind Imaging Interferometer, WINDII)^[1], 并于 1991 年搭载在美国航空航天局高层大气研究卫星 (UARS) 上成功发射升空。多年来, 迈克耳逊干涉仪因其视场展宽的优点在被动风场探测中得到了越来越广泛的应用, 并且陆续成功研制了多种干涉仪^[5-8]。随着航空航天技术的发展^[9-10], 风成像干涉仪探测系统有望作为一种重要的探测方式, 为大气科学、环境保护和航空航天等提供更好的服务。

自 1997 年以来, 我国某研究机构对高层大气风场探测的理论、新型风成像干涉仪的设计和研制、风成像干涉仪的干涉图采集和预处理以及高层大气风场的反演理论进行了全面的研究, 并取得了一系列的成果^[8,11-18]。其中包括自行研制了一种新型宽场消色差温度补偿型风成像干涉仪 (FATWINDII) 实验室验证装置, 并对该装置进行了实验室星载模拟实验。在实验中, 采用的是加拿大 DALSA 的 1M60 CCD 探测器, 其感光面积为 $12.3 \text{ mm} \times 12.3 \text{ mm}$, 像素总数为 1024×1024 。然而, 实际上 CCD 感光区域的像素个数只有大约 256×256 , 它的实际感光面积仅仅为整个面积的 $1/16$ 。基于上述情况, 有必要对 FATWINDII 系统的响应率进行分析和计算, 找到 CCD 感光面积与系统的哪些因数有关。

本文阐述了 FATWINDII 的原理, 推导出 FATWINDII 系统响应率公式。根据 FATWINDII 系统补偿方案和结构参数, 计算出宽场迈克耳逊干涉仪的等效空气长度, 推导并计算出系统的透过率。根据所用 CCD 探测器的技术指标和 FATWINDII 的结构参数分析和计算了系统响应率随视场角和感应像素数目的变化, 进而分析解释了 FATWINDII 实验室星载模拟实验中实际 CCD 感光区域的面积。

1 FATWINDII 系统

1.1 FATWINDII 系统原理

FATWINDII 系统原理的基本光线如图 1 所示。

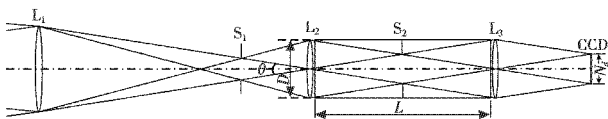


图 1 FATWINDII 系统光学原理图

Fig. 1 Overall optical layout for the FATWINDII

入射光线经过光阑 S_1 的前置望远系统 (由透镜 L_1 和 L_2 组成) 进入宽场消色差温度补偿型迈克耳逊干涉仪内 (详细结构如图 2 所示), 此处将迈克耳逊干涉仪简化为长度为 L 、横截面直径为 D 的黑盒子, 其中, L 为等效空气长度, 因此不用考虑内部光线的折射。从迈

克耳逊干涉仪出来的光线经透镜 L_3 会聚在 CCD 上干涉成像。通过记录在 CCD 上四幅步进光程差的干涉图反演出大气风场的温度、速度和粒子体辐射率等。图中, N 是 CCD 一边上的像素数目, d 是单个像素的边长, θ 是全视场角。 S_1 是视场光阑, 用来控制前面的视场范围, 它成像在 CCD 位置处。 S_2 是孔径光阑, 在长度为 L 的迈克耳逊干涉仪的中间位置, 它成像在 L_1 位置处。这样, 全视场角 θ 的值完全由 FATWINDII 的几何结构决定, 而与迈克耳逊干涉仪的宽场特性无关。因此, 计算 FATWINDII 系统响应率时就不用考虑迈克耳逊干涉仪的内部详细结构了。

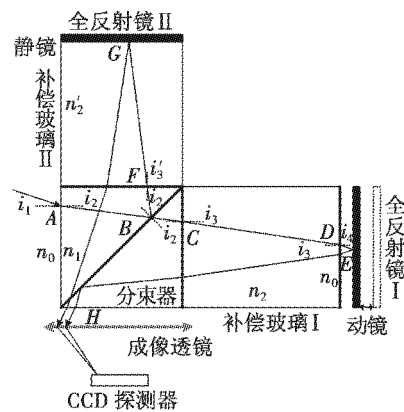


图 2 FATWINDII 的结构和工作原理示意图

Fig. 2 The structure and working principle of the FATWINDII

1.2 FATWINDII 系统响应率

系统的响应率就是输出信号与输入信号的比值。对于大光程差宽场迈克耳逊干涉仪, 系统响应率与迈克耳逊干涉仪的内部角度无关, 而仅仅与通过长度为 L 、横截面直径为 D 的玻璃块体的光线的几何结构有关。在 FATWINDII 的 CCD 上每个像素所获得的光通量为^[1]

$$A\Omega = \theta^2 (D - \theta L/2)^2 / N^2 \quad (1)$$

为了简化, 利用几何关系中的小角近似法。如图 1 所示, 假设入射光束是边长为 D 的正方形, θ 的最大值为 $\theta = D/L$, 代入式 (1) 中得到 CCD 上每个像素所获得的最大光通量为

$$A\Omega_{\max} = D^4 / (4N^2 L^2) \quad (2)$$

如果 FATWINDII 探测光源为气辉谱线, 输出信号可以表示为^[2]

$$S_{\text{out}} = 10^6 B(\lambda) A\Omega T q t / 4\pi \quad (3)$$

式中: T 为系统的透过率; q 为 CCD 的量子效率; t 为曝光时间; $B(\lambda)$ 为气辉辐射强度; λ 为对应的谱线波长。气辉辐射强度通常用瑞利 R 计量, $1R = 10^6 \text{ e/s} \cdot \text{cm}^2$ 。在 CCD 探测系统中, 输出信号经过数字化表示为模数单位 ADU。设量化中 1ADU 等于单位瑞利辐射时每秒

存储在 CCD 的 bin(像素合并)中 73 个电子,由式(2)和式(3)得出 FATWINDII 系统的响应率为^[1-2]

$$R_{\text{sys}} = \frac{S_{\text{out}}}{S_{\text{in}}} = 10^6 D^4 T q / (1168 \pi N^2 L^2) \quad (4)$$

由式(4)可知,系统的响应率与迈克耳逊干涉仪的 D , T , L 及所用的 CCD 的参数 q 和 N 有关。

2 FATWINDII 系统响应率的计算

根据 FATWINDII 等效原理求出等效空气隙 L 和 D 的值。表 1 为 FATWINDII 所用的补偿方案,所得数值是在入射角为 0° 、折射率对应的波长为 632.8 nm 时,选用肖特光学玻璃数据库得到的^[13]。

表 1 FATWINDII 的补偿方案

Table 1 The compensation scheme of the FATWINDII

	材料	折射率	厚度/cm	等效空气厚度/cm
立方体分束器	BK7	$n_1/1.515\ 09$	$t_1/5.080\ 00$	3.352 94
补偿玻璃II	LF5	$n'_2/1.578\ 51$	$t'_2/6.076\ 36$	3.849 43
补偿玻璃I	N-LaF21	$n_2/1.784\ 54$	$t_2/6.528\ 67$	3.658 46
空气隙	Air	$n_0/1.000\ 27$	$t_0/0.191\ 00$	0.190 95
等效空气长度 L /cm			14.404 74	
横截面直径 D /cm			5.080 00	

从表 1 中可以求出等效空气长度 $L = 14.40$ cm,横截面的直径 D 的最大值为立方体分束器的边长 5.08 cm,它的清楚孔径大于尺寸的 85%,因此 D 的取值应为 4.32 cm。

求 FATWINDII 系统透过率 T 。在具体计算 T 时需要详细分析迈克耳逊干涉仪的工作原理。采用表 1 中的补偿方案,FATWINDII 的成像光路如图 2 所示,一束光以角度 i_1 入射干涉仪,在分束器处等分成两束光,需要分别计算它们的透射率。经过动镜臂的光束入射后分别经过界面 $A, B, C, D, E, D, C, B, H$ 出射,而经过静镜臂的光束入射后分别经过界面 A, B, F, G, F, B, H 出射,这两束光经过成像镜在 CCD 探测器上干涉成像。图 2 中 n_0, n_1, n_2, n'_2 为折射率, i_1 为光线的入射角, i_2, i_3, i_4, i'_3 为折射角。根据折射定律得到

$$n_0 \sin i_1 = n_1 \sin i_2 = n_2 \sin i_3 = n'_2 \sin i'_3 = n_0 \sin i_4 \quad (5)$$

因为入射光的 p 分量和 s 分量的透射率不同,根据菲涅耳公式^[19]分别计算它的光强透射率。光线经过动镜臂后的 p 分量和 s 分量的光强透射率为

$$T_p = T_{n_0 n_1} T_{pB} T_{n_1 n_2} T_{n_2 n_0} R_m T_{n_0 n_2} T_{n_2 n_1} R_B T_{n_1 n_0} = \frac{1}{4} R_m R_B \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_0 \cos i_2} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_2 + n_1 \cos i_3} \right)^2 \times \left(\frac{2n_2 \cos i_3}{n_0 \cos i_3 + n_2 \cos i_4} \right)^2 \times \left(\frac{2n_0 \cos i_4}{n_0 \cos i_3 + n_2 \cos i_4} \right)^2 \quad (6)$$

$$T_s = T_{n_0 n_1} T_{sB} T_{n_1 n_2} T_{n_2 n_0} R_m T_{n_0 n_2} T_{n_2 n_1} R_B T_{n_1 n_0} = \frac{1}{4} R_m R_B \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_0 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_3} \right)^2 \times \left(\frac{2n_2 \cos i_3}{n_2 \cos i_3 + n_0 \cos i_4} \right)^2 \times \left(\frac{2n_0 \cos i_4}{n_0 \cos i_4 + n_2 \cos i_3} \right)^2 \times \left(\frac{2n_2 \cos i_3}{n_2 \cos i_3 + n_1 \cos i_2} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_2 + n_0 \cos i_1} \right)^2 \quad (7)$$

式中: $T_{pB} = T_{sB} = \frac{1}{4}$ 为 p 分量和 s 分量第一次经过分束器的透过率; R_m 为全反射镜 I 的反射率; R_B 为光束第二次经过分束器的反射率。

同理,光线经过静镜臂后的总光强透射率为

$$T'_p = T'_{n_0 n_1} R'_{pB} T'_{n_1 n'_2} R'_m T'_{n'_2 n_1} T'_B T'_{n_1 n_0} = \frac{1}{4} R'_m T'_B \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_0 \cos i_2} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n'_2 \cos i_2 + n_1 \cos i'_3} \right)^2 \times \left(\frac{2n'_2 \cos i'_3}{n'_2 \cos i_2 + n_1 \cos i'_3} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_0 \cos i_2} \right)^2 \quad (8)$$

$$T'_s = T'_{n_0 n_1} R'_{sB} T'_{n_1 n'_2} R'_m T'_{n'_2 n_1} T'_B T'_{n_1 n_0} = \frac{1}{4} R'_m T'_B \left(\frac{2n_0 \cos i_1}{n_0 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_2 + n'_2 \cos i'_3} \right)^2 \times \left(\frac{2n'_2 \cos i'_3}{n'_2 \cos i_3 + n_1 \cos i_2} \right)^2 \times \left(\frac{2n_1 \cos i_2}{n_1 \cos i_2 + n_0 \cos i_1} \right)^2 \quad (9)$$

式中: $R'_{pB} = R'_{sB} = \frac{1}{4}$ 为 p 分量 s 和分量第一次经过分束器的反射率; R'_m 为全反射镜 II 的反射率; T'_B 为光束第二次经过分束器的透射率。

因此,FATWINDII 系统透过率为

$$T = T_p + T_s + T'_p + T'_s \quad (10)$$

假设入射光在第一次经过分束器时均等分成两束光,光束在第二次经过分束器时的透射率和反射率均为 50%, $R_B = T'_B = 0.5$,两个臂的全反射镜的反射率均为 99.8%,即 $R_m = R'_m = 0.998$,系统中各个镜子的镀膜透过率均为 1。将式(5)~式(9)代入式(10),可以求出 FATWINDII 系统透过率 T 随着入射角的变化关系,如图 3 所示。从图中可以看出,系统透过率随着入射角的增大而减小。当入射角在 $[-12^\circ, 12^\circ]$ 时,系统透过率 T 的值始终为 0.420 4,不随入射角的变化而变化。再一次证明了迈克耳逊干涉仪视场展宽的效果。当入射角在 $[-30^\circ, -12^\circ]$ 和 $[12^\circ, 30^\circ]$ 之间时,透过率 T 的值在 $[0.419, 0.420 4]$ 变化,虽然 T 的值有变化但是变化很小,几乎是定值 0.42。因此,FATWINDII 系统透过率 T 约为 0.42。

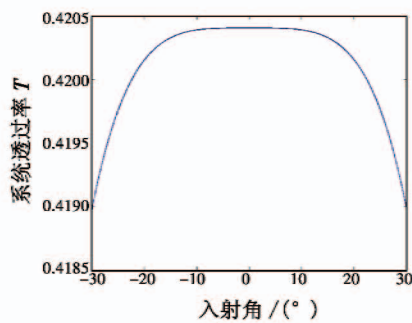


图3 FATWINDII 系统透过率和入射角的关系曲线

Fig.3 The transmittance vs incident angle in FATWINDII

FATWINDII 系统的 CCD 探测器采用加拿大 DALSA 的 1M60。根据式(4)计算 FATWINDII 系统响应率时,对于视场展宽迈克耳逊干涉仪来说, D 和 N 的值是可变的。假设系统的透过率为 0.42, CCD 的量子效率为 0.8, 等效空气长度 L 为 14.4 cm, 系统响应率与全视场角 θ 和 CCD 单边像素个数 N 的关系曲线如图 4 所示。从图中可以看出,当全视场角 θ 在 $[10^\circ, 20^\circ]$ 之间和 CCD 单边像素个数 N 在 $[0, 250]$ 区间时,系统响应率可以达到 0.35。随着 CCD 单边像素个数 N 值的增大,系统响应率明显减小,也就是 CCD 感应区域的 N 有最大值。

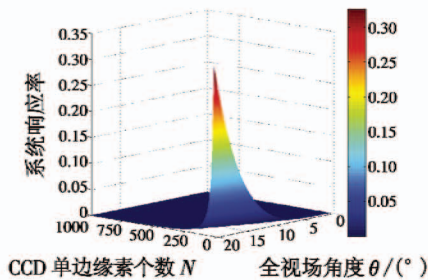


图4 FATWINDII 系统响应率与全视场角 θ 和 CCD 单边像素 N 的关系曲线

Fig.4 The relation between responsivity with θ and N in FATWINDII

在高层大气探测各类目标谱线中,寿命最长的为 $O(^1D)$ 红线,对应波长为 630 nm,辐射强度为 0.01 ~ 20 kR。假定入射光束的边长 D 为 5 cm,选取 CCD 的单边像素 N 为 256,对于一个 1 kR 的气辉谱线,由式(2)和式(3)可以得出每个 CCD 像素在 1 s 的曝光时间内可以获得大约 307 个光电子,输出信号经过数字化转换由 CCD 探测读出。另外,由式(1)~式(3)可知,在全视场角 θ 值一定的情况下,等效空气长度 L 越大,通光孔径 D 越大,在 1 s 的曝光时间内可以获得的光电子数目越多。于 1991 年发射升空的风成像干涉仪采用的是六面体结构^[1]。由于在视场展宽相同的条件下,六面体结构的等效空气长度比四面体结构要长,进而每个 CCD 像素的响应增大,系统响应率就大。但

是,在 FATWINDII 实验室星载模拟实验装置中,计算系统响应率时没有考虑大气的吸收和散射,系统直接选用的是边长 5.08 cm 的立方体分束器,等效空气长度为定值。如图 4 所示,可以分析得出在 FATWINDII 实验室星载模拟实验中,实际 CCD 感光区域的像素个数只有大约 256×256 。

根据图 1 所示,可以求出全视场角 θ 的最大值为 19.43° , CCD 感光区域应该为整个面积。但是,实验时全视场角为 12° ,成像镜 L_3 的焦距为 4 cm,等效空气长度 L 为定值 14.4 cm,这时 D 的取值应该为 3.06 cm,这样求出感光区域的像素个数大约为 707×707 。另外,CCD 感光区域的像素个数还与每个像素上的光通量和曝光时间有关。由式(2)可得,每个像素上的光通量与 CCD 单边像素 N 的平方成反比,与横截面直径 D 的四次方成正比。当 D 的值为 3.06 cm 时,可以求出 CCD 感光区域的像素个数 N 的最大值约为 325。由于在实验中 FATWINDII 系统中 CCD 的尺寸很小,二维动镜直接连接在纳米步进装置上,按照四步法调整量步进控制 CCD 采集数据,操作过程中可能会引入一些误差。因此,在 FATWINDII 实验室星载模拟实验中,出现 CCD 感光区域的像素个数大约为 256×256 ,仅为整个面积的 $1/16$ 。

3 结论

本文采用等效法和近似法推导出新型宽场消色差温度补偿型风成像干涉仪(FATWINDII)系统响应率的表达式,分析得出在增加视场角和增大系统透过率的情况下可以提高系统响应率。在相同的条件下,风成像干涉仪中采用六面体结构可以使等效空气长度增长,进而 CCD 上每个像素的光学响应增大,系统响应率增大。

根据 FATWINDII 系统补偿方案和结构参数,计算出迈克耳逊干涉仪的等效空气长度为 14.4 cm,推导并计算出系统的透过率约为 0.42。当入射角在 $[-12^\circ, 12^\circ]$ 时,系统透过率 T 的值始终为 0.4204,不随入射角的变化而变化,再一次证明了迈克耳逊干涉仪视场展宽的效果。

根据所用 CCD 探测器的技术指标和 FATWINDII 系统的结构参数,模拟出系统响应率随视场角和感应像素数目的变化情况,进而分析解释了 FATWINDII 实验室星载模拟实验中 CCD 感光区域的像素个数约 256×256 。该研究为星载 FATWINDII 的设计、研制、定标及数据的后期处理提供了理论依据和实践指导。需要强调的是,在计算星载 FATWINDII 系统响应率时,还需要考虑所对应高层大气探测目标谱线的吸收和散射,

这样可以进一步提高数据的准确度。

参考文献

- [1] SHEPHERD G G, GAULT W A, MILLER D, et al. WAM-DII-wide-angle Michelson Doppler imaging interferometer for spacelab[J]. Applied Optics, 1985, 24(11):1571-1584.
- [2] SHEPHERD G G, THUILLIER G, GAULT W A, et al. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D6):10725-10750.
- [3] HERSOM C H, SHEPHERD G G. Characterization of the wind imaging interferometer[J]. Applied Optics, 1995, 34(16):2871-2879.
- [4] WANG D Y, WARD W E, SOLHEIM B H, et al. Wave-number spectra of horizontal wind and temperature measured with WINDII, Part I; observational results [J]. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 2000, 62(11):967-979.
- [5] SHEPHERD G G. Application of Doppler Michelson imaging to upper atmospheric wind measurement: WINDII and beyond [J]. Applied Optics, 1996, 35(16):2764-2773.
- [6] SHEPHERD G G, MCDADE I, GAULT W A, et al. The strato-spheric wind interferometer for transport studies (SWIFT) [J]. Advances in Space Research, 2001, 27(6/7):1071-1079.
- [7] WARD W E, GAULT W A, SHEPHERD G G, et al. The waves Michelson interferometer; a visible/near-IR interferometer for observing middle atmosphere dynamics and constituents [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4540: 100-111.
- [8] ZHANG C M, ZHU H C, ZHAO B C. The tempo-spatially modulated polarization atmosphere Michelson interferometer[J]. Optics Express, 2011, 19(10):9626-9635.
- [9] 肖鸣超, 陈欣, 李春涛, 等. 一种平流层飞艇高度控制方法[J]. 电光与控制, 2014, 21(6):86-89. (XIAO M C, CHEN X, LI C T, et al. A method for altitude control of stratospheric airships [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6):86-89.)
- [10] 潘枝峰, 刘莎, 张鹏. 红外双波段/双视场望远系统设计[J]. 电光与控制, 2014, 21(9):71-75. (PAN Z F, LIU S, ZHANG P. Design of a dual band/dual FOV infrared telescope [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(9):71-75.)
- [11] ZHANG C M, WU Q M, MU T K. Influences of pyramid prism deflection on inversion of wind velocity and temperature in a novel static polarization wind imaging interferometer [J]. Applied Optics, 2011, 50(32):6134-6139.
- [12] 王金婵, 张淳民, 赵葆常, 等. 静态偏振风成像干涉仪中光在四面角锥棱镜中的传播规律研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(3):1625-1631. (WANG J C, ZHANG C M, ZHAO B C, et al. Study on the rule of light transmission through the four-sided pyramid prism in the static polarization wind imaging interferometer [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3):1625-1631.)
- [13] 朱化春, 张淳民. 偏振风成像干涉仪多波长探测理论研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(7):074211-1-074211-7. (ZHU H C, ZHANG C M. Theoretical study of polarization atmosphere Michelson interferometer using multi-wavelength [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7):074211-1-074211-7.)
- [14] 朱化春, 张淳民, 简小华. 新型风成像干涉仪温度补偿理论研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(2):893-898. (ZHU H C, ZHANG C M, JIAN X H. A wide field wind image interferometer with chromatic and thermal compensation [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2):893-898.)
- [15] WANG J C, ZHANG C M, ZHANG L, et al. Complete optical throughput analysis of the static polarization wind imaging interferometer [J]. Applied Optics, 2013, 52(11):2248-2256.
- [16] ZHANG C M, LI Y. Influence of the tilting reflection mirror on the temperature and wind velocity retrieved by a polarizing atmospheric Michelson interferometer [J]. Applied Optics, 2012, 51(27):6508-6517.
- [17] WANG J C, ZHANG C M, REN W Y, et al. The influences of the wavelength bandwidth on the measured wind velocity and temperature in the static polarization wind imaging interferometer [J]. Optik, 2013, 124(24):6932-6935.
- [18] ZHANG C M, AI J J, GAO P. Optical throughput of the Sagnac interferometer with a modified large optical path difference [J]. Applied Optics, 2012, 51(14):2693-2700.
- [19] 赵凯华, 钟锡华. 光学(上册) [M]. 北京: 北京大学出版社, 1982: 245. (ZHAO K H, ZHONG X H. Optics (Vol. 1) [M]. Beijing: Peking University Press, 1982: 245.)

欢迎订阅期刊 欢迎刊登广告