

基于瑞利大气偏振模式的太阳自主定位方法及其实现

朱志飞, 杨江涛, 王晨光, 刘文耀, 潘梓文, 申冲, 唐军

中北大学电子测试技术重点实验室, 山西太原 030051

摘要 为了满足偏振光天文导航定位对高精度太阳空间位置信息的需求, 提出一种基于瑞利大气偏振模式的太阳自主定位方法。实验结果表明, 该定位方法能够获取太阳相对可靠的地理位置信息, 且经、纬度误差均值分别为 0.251° 和 0.171° 。虽然该方法的定位精度有待于进一步提高, 但其作为其他定位方式的补充有着重要应用价值。

关键词 散射; 太阳位置; 偏振光定位; 最小二乘法; Rayleigh 散射

中图分类号 P401; O241.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.022901

Solar Autonomous-Positioning Method Based on Rayleigh Atmosphere Polarization Pattern and Its Implementation

Zhu Zhifei, Yang Jiangtao, Wang Chenguang, Liu Wenyao,
Pan Ziwen, Shen Chong, Tang Jun

Key Laboratory of Electronic Test and Measurement, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract In order to satisfy the requirement of the polarized light celestial positioning for the high-precision solar spatial position, one method based on the Rayleigh atmospheric polarization pattern is proposed. The experimental results indicate that, this method is capable of obtaining relatively reliable geographic position information with an average longitude error of 0.251° and latitude error of 0.171° . Although the precision of this method needs to be further improved, this method possesses important application value as a supplement to other positioning methods.

Key words scattering; solar position; polarized light positioning; least square method; Rayleigh scattering

OCIS codes 290.5870; 010.1310; 290.5855

1 引言

惯性导航^[1]误差会随时间积累, 而基于无线电的导航定位方式易受电磁干扰^[2], 研究者在寻求克服这些缺陷的过程中发现, 通过检测大气偏振信息可以进行导航定位^[3-5]。

太阳光穿过大气层时会与大气中的粒子发生散射作用形成偏振态分布, 即大气偏振模式^[6-9]。这种相对稳定的偏振态具有规律性、稳定性和唯一性的特点^[10-12], 且其特征矢量信息与太阳位置之间的关系有极强的规律性, 为导航定位提供了可靠的信息载体^[13]。Wehner^[14]研究了沙蚁的漫游与返回。受沙蚁偏振敏感机制的启发, Lanbrinos 等^[15]基于点源式测量法研制了搭载偏振光检测装置的机器人, 验证了利用偏振光导航的可行性。2015年, Wang 等^[16]提出了一种基于偏振光和地磁场的实时定位方法。

利用偏振光导航定位需要高精度太阳位置信息^[17-19], 因此本文提出了一种基于大气偏振光的自主定位方法, 通过获取载体在 t_1 和 t_2 时刻的偏振角 θ_1 、 θ'_1 和 θ_2 、 θ'_2 , 结合太阳和地球之间的相对位置关系, 计算得到载体的经、纬度信息。利用偏振态测定仪系统^[20-21]进行了自主定位实验, 验证了该定位方法的可行性。

收稿日期: 2016-10-07; 收到修改稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51225504)、国家自然科学基金青年科学基金(61503347)、国家自然科学基金(61603353)

作者简介: 朱志飞(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏振光导航信息处理方面的研究。E-mail: zhuzhifei163@163.com

导师简介: 唐军(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事微纳新器件及偏振光导航方面的研究。

E-mail: tangjun16@126.com(通信联系人)

2 偏振光定位原理

2.1 瑞利散射模型偏振特性

在单次瑞利散射模型下,天空任意一点处偏振光电场强度 \mathbf{E} 垂直于太阳位置矢量 \mathbf{S}_0 ^[22],如图 1 所示,其中 O 表示观测点, S 表示太阳, XY 平面与水平面重合, OZ 指向天顶。坐标系示意图如图 2 所示。选择 \mathbf{E} 不平行(\mathbf{E}_1 、 \mathbf{E}'_1)的两个天空点 O_1 、 O'_1 作采样点, O_1 、 O'_1 关于天顶中心对称,且天顶角均为 i 。 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}'_1 的向量积方向和 \mathbf{S}_0 的方向一致或相反。 \mathbf{S}_0 可以分解为太阳高度角 h_s 方向分量和太阳方位角 A_s 方向分量,其中 h_s 是以当地水平面为基准,需保证偏振测量装置整体水平,并保证观测方向的精度。由偏振测量装置计算输出的太阳方位角基准与偏振观测采样点的方位有关,称为模拟太阳方位角 A'_s 。 \mathbf{E}_1 在坐标系 $O_1X_{1i}Y_{1i}Z_{1i}$ 中的投影 $\mathbf{E}_1(\theta_{1i})$ 和 \mathbf{E}'_1 在坐标系 $O'_1X'_{1i}Y'_{1i}Z'_{1i}$ 中的投影 $\mathbf{E}'_1(\theta'_{1i})$ 分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1(\theta_{1i}) = C_1(-\sin\theta_{1i} & \cos\theta_{1i} & 0) \\ \mathbf{E}'_1(\theta'_{1i}) = C_2(-\sin\theta'_{1i} & \cos\theta'_{1i} & 0) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 θ_{1i} 、 θ'_{1i} 为 O_1 、 O'_1 在瑞利坐标系下的偏振角度(AOP),系数 C_1 和 C_2 可取值为 1 或 -1。

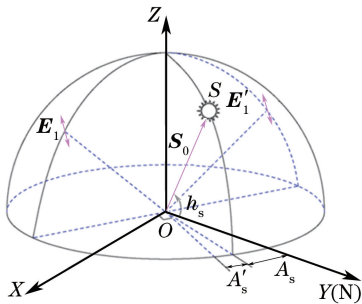


图 1 偏振光电场强度和太阳位置矢量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarized-electric-field strength and solar position vectors

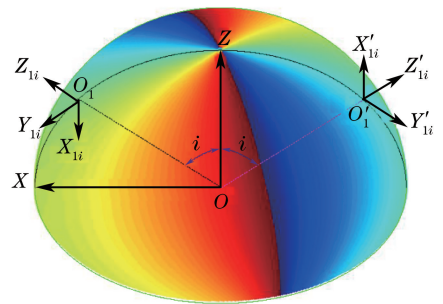


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system

从坐标轴正向看,将 $\mathbf{E}_1(\theta_{1i})$ 先绕 X_{1i} 轴顺时针旋转 i ,再绕 Z'_{1i} 轴顺时针旋转 90° ,将 $\mathbf{E}'_1(\theta'_{1i})$ 先绕 X'_{1i} 轴顺时针旋转 i ,再绕 Z'_{1i} 轴逆时针旋转 90° ,可得偏振光电场强度在同一坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} \mathbf{E}'_1(\theta_{1i}) = C_1(\cos\theta_{1i}\cos i & \sin\theta_{1i} & -\cos\theta_{1i}\sin i) \\ \mathbf{E}''_1(\theta'_{1i}) = C_2(-\cos\theta'_{1i}\cos i & -\sin\theta'_{1i} & -\cos\theta'_{1i}\sin i) \end{cases} \quad (2)$$

太阳位置矢量 \mathbf{S}_0 可以表示为

$$\mathbf{S}_0 = (S_x S_y S_z) = \mathbf{E}'_1(\theta_{1i}) \times \mathbf{E}''_1(\theta'_{1i}) = C \begin{pmatrix} -\cos\theta_{1i}\sin\theta'_{1i}\sin i - \sin\theta_{1i}\cos\theta'_{1i}\sin i \\ 2\cos\theta_{1i}\cos\theta'_{1i}\cos i \sin i \\ \sin\theta_{1i}\cos\theta'_{1i}\cos i - \cos\theta_{1i}\sin\theta'_{1i}\cos i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 $C = C_1 C_2$, C 取值为 1 或 -1。 C 取 1 时,模拟太阳方位角和太阳高度角分别是 A'_s 和 h_s ; C 取 -1 时,模拟太阳方位角和太阳高度角分别是 $A'_s + 180^\circ$ 和 $-h_s$ 。

A'_s 和 h_s 满足

$$\begin{cases} \cos A'_s = S_x / \sqrt{S_x^2 + S_y^2}, & A'_s \in (0^\circ, 360^\circ) \\ \sin A'_s = S_y / \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \\ \tan h_s = S_z / \sqrt{S_x^2 + S_y^2}, & h_s \in (-90^\circ, 90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

2.2 偏振光天文定位方法

由天球面上的导航三角形,可以得到

$$\begin{cases} \cos A_s = \frac{\sin\delta - \sin h_s \sin\varphi}{\cos h_s \cos\varphi} \\ \sin h_s = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos T \end{cases} \quad (5)$$

式中 δ 为太阳赤纬, φ 为观测点的纬度, T 为太阳时角。

为了简化系统,避免引入载体航向角的测量误差,在 t_1 、 t_2 时刻对大气偏振光进行两次观测,这两次观测时的太阳时角 T_1 和 T_2 满足

$$T_2 = T_1 + (t_2 - t_1) \times 15^\circ \times 2\pi/360^\circ, \quad (6)$$

式中 t_1 、 t_2 均为世界时 UTC。

这两次观测时的太阳高度角 h_{s_1} 和 h_{s_2} 满足

$$\begin{cases} \sin h_{s_1} = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos T_1 \\ \sin h_{s_2} = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos T_2 \end{cases} \quad (7)$$

观测点的经度 η 为

$$\eta = \begin{cases} (T_1/15 + 12 - T_0 - t_1) \times 15^\circ, & \text{a.m.} \\ (T_1/15 - T_0 - t_1) \times 15^\circ, & \text{p.m.} \end{cases} \quad (8)$$

式中 T_0 为真太阳时和平太阳时之差。

3 实验及结果

实验地点位于太原市中北大学重点实验室楼顶,全球定位系统(GPS)对实验平台位置的定位结果为北纬 38.016017° 、东经 112.449383° ,实验时间为 2015 年 10 月 27 日。

太阳对偏振观测的影响如图 3 所示,其中 t 为观测时刻。图 3(a)中偏振角实测值变化曲线开始和结尾部分出现水平段,这是外置传感器在启动及结束阶段固定方位的停驻观测值。由图可知,图 3(b)所示观测

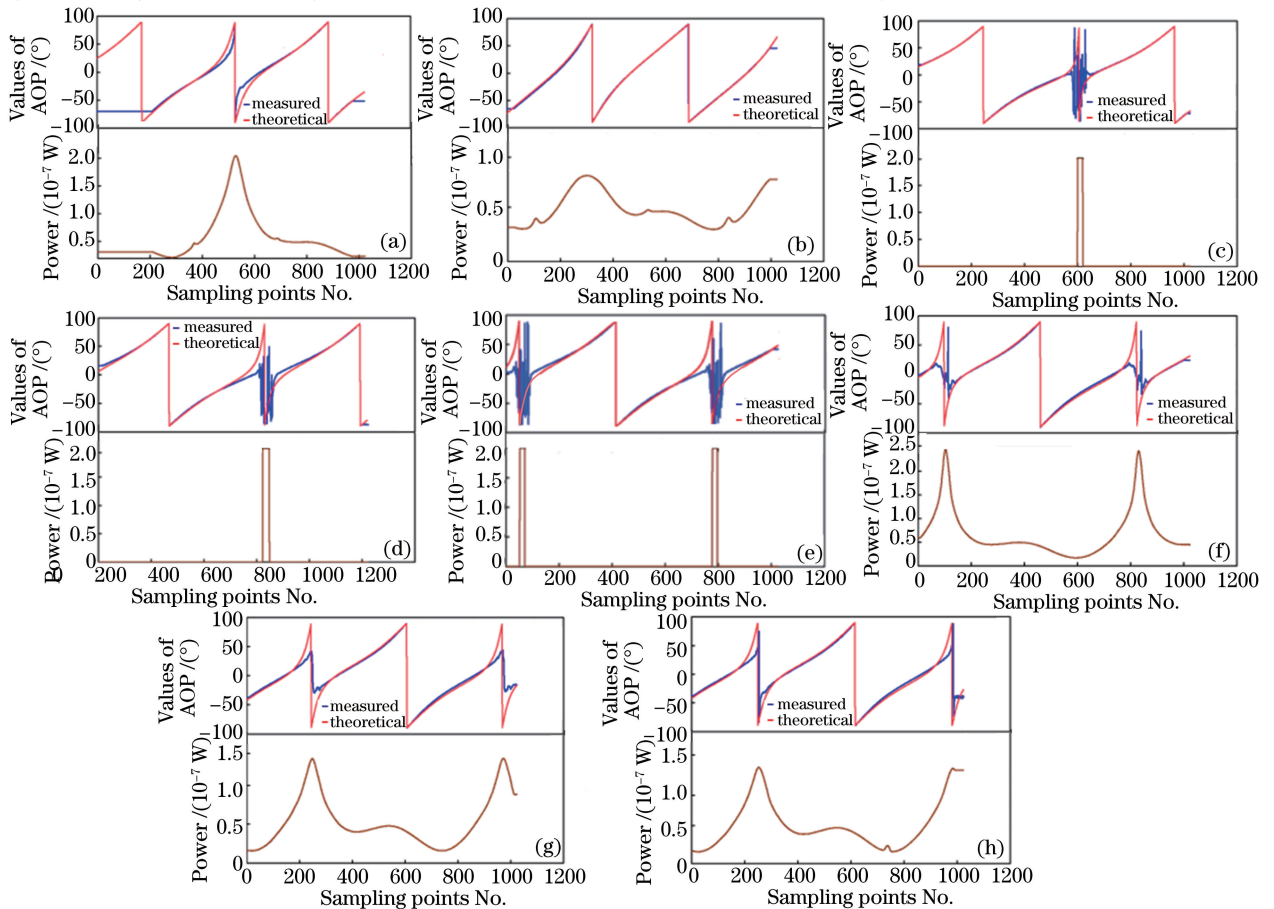


图 3 偏振角度及功率随采样点的变化。(a) $t=09:59:07, i=50^\circ$; (b) $t=10:52:26, i=24^\circ$; (c) $t=11:05:31, i=50^\circ$; (d) $t=11:28:31, i=45^\circ$; (e) $t=13:00:17, i=45^\circ$; (f) $t=14:07:04, i=50^\circ$; (g) $t=14:35:00, i=50^\circ$; (h) $t=14:43:35, i=50^\circ$

Fig. 3 Variations of polarization angle and power with sampling point. (a) $t=09:59:07, i=50^\circ$; (b) $t=10:52:26, i=24^\circ$; (c) $t=11:05:31, i=50^\circ$; (d) $t=11:28:31, i=45^\circ$; (e) $t=13:00:17, i=45^\circ$; (f) $t=14:07:04, i=50^\circ$; (g) $t=14:35:00, i=50^\circ$; (h) $t=14:43:35, i=50^\circ$

天空点的高度角较大,外置传感器不受太阳强光影响,偏振角实测值的变化规律与理论值的变化规律吻合较好。图 3(e)中太阳子午线方位处的偏振角实测值变化杂乱,与理论值的变化规律不符合,这是外置传感器在扫描过程中两次指向太阳造成的,此时太阳光功率达到 10^7 数量级。

排除太阳子午线方位处附近的乱点,按照两点关于天顶点对称的分组方式采样解算,利用每次实验的有效数据得到太阳高度角,并利用最小二乘法优化得到该时刻下太阳高度角的唯一解。

通过偏振信息获得图 3 对应时刻下的太阳高度角,对相邻两次观测结果进行解算,得到经、纬度误差均值分别为 0.251° 和 0.171° ,优化定位结果与 GPS 定位结果比较图如图 4 所示。

按不同观测天空点的方位,从图 3(a)、(b)所示完整周期内的偏振角度信息中均匀抽取 8 组样本解算经、纬度,所得结果与采用最小二乘法优化得到的经、纬度结果及 GPS 定位结果进行比较,如图 5 所示。可以看出,最小二乘法对不同方位偏振信息源的解算结果有一定优化作用。

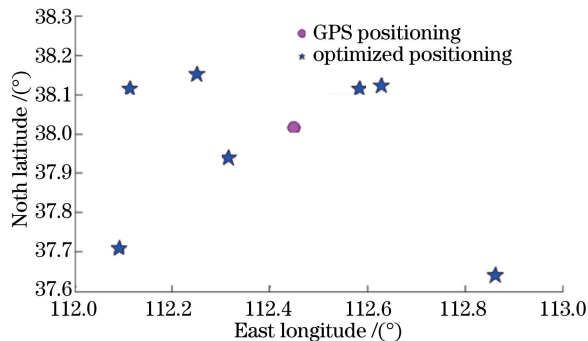


图 4 优化定位结果与 GPS 定位结果比较图

Fig. 4 Comparison chart between optimized positioning and GPS positioning results

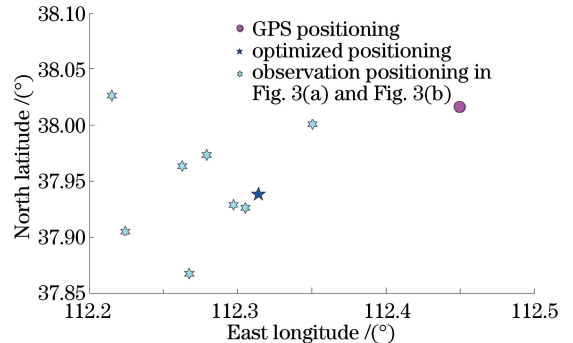


图 5 在不同观测方位下,三种方式定位结果比较图

Fig. 5 Comparison chart among three positioning results under different observation azimuths

4 误差分析

偏振角的误差来源于瑞利模型表征误差和外置传感器观测误差。外置传感器采用等高扫描方式观测,时间对偏振信息误差的影响在 10^{-4}° 以下。尽管偏振分析仪的测角精度非常高,但考虑到实际大气偏振情况的复杂性,以及观测装置的水平基准和装配的精度限制,减小偏振角误差仍是提高定位精度的关键。当天气晴朗时,大气粒子对光的散射满足瑞利散射条件,故本实验均选择在晴朗天气条件下进行。应用最小二乘法可以平衡基准水平误差和测角误差的综合影响,使观测的高度角更精确。

5 结论

提出一种基于大气偏振光的自主定位方法,利用已有的实验平台进行了外场实验,验证了该方法的可行性。外场定位实验目前只在晴朗天气条件下进行,下一步的工作重点是验证该方法在恶劣天气条件下的可行性并提高定位精度。

参 考 文 献

- [1] Ramanandan A, Chen A, Farrell J A. Inertial navigation aiding by stationary updates[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 235-248.
- [2] Caffery J J, Stuber G L. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems[J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(4): 38-45.
- [3] Müller M, Wehner R. Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1988, 85(14): 5287-5290.
- [4] Heinze S, Reppert S M. Sun compass integration of skylight cues in migratory monarch butterflies[J]. Neuron, 2011, 69(2): 345-358.
- [5] Pomozi I, Horváth G, Wehner R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: Full-sky

- measurements and implications for animal orientation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(17): 2933-2942.
- [6] Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.* Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.
王 威, 褚金奎, 崔 岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.
- [7] Tian Liu, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.* The method of the navigation direction angle calculation with the distribution of the atmospheric polarization pattern[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 141-146.
田 柳, 高 隽, 范之国, 等. 基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(1): 141-146.
- [8] Zhang Nan, Wang Fei, Liu Jun, *et al.* Spatial distribution polarization pattern acquisition based on polarization imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091101.
张 楠, 王 飞, 刘 俊, 等. 基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091101.
- [9] Wang Ziqian, Zhang Xudong, Jin Haihong, *et al.* All sky turbid atmospheric polarization pattern modeling based on Monte Carlo method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1013001.
王子谦, 张旭东, 金海红, 等. 基于 Monte Carlo 方法的混浊大气偏振模式全天域建模[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1013001.
- [10] Wang Fei, Tang Jun, Ren Jianbin, *et al.* Optimized calculation of solar spatial position with the Rayleigh atmosphere polarization pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12): 1201002.
王 飞, 唐 军, 任建斌, 等. 基于 Rayleigh 大气偏振模式的太阳空间位置优化计算[J]. *光子学报*, 2014, 43(12): 1201002.
- [11] Sun Xia, Zhao Huijie. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from POLDER data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1772-1777.
孙 夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1772-1777.
- [12] Deutschlander M E, Beason R C. Avian navigation and geographic positioning[J]. *Journal of Field Ornithology*, 2014, 85(2): 111-133.
- [13] Horvath G, Barta A, Gal J, *et al.* Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(3): 543-559.
- [14] Wehner R. Desert ant navigation: How miniature brains solve complex tasks[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189(8): 579-588.
- [15] Lambrinos D, Möller R, Labhart T, *et al.* A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1): 39-64.
- [16] Wang Y, Chu J, Zhang R, *et al.* A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9725.
- [17] Cheng Zhen, Mei Tao, Liang Huawei, *et al.* Analysis and implementation of the skylight polarization autonomous positioning method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(6): 33-38.
程 珍, 梅 涛, 梁华为, 等. 一种偏振光自定位方法的分析及实现[J]. *光电工程*, 2015, 42(6): 33-38.
- [18] Wang Guanghui, Guo Zhengdong, Zhu Hai, *et al.* Capability analysis of polarized light celestial positioning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 11-14.
王光辉, 郭正东, 朱 海, 等. 偏振光天文导航定位能力分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(1): 11-14.
- [19] Reppert S M, Zhu H, White R H. Polarized light helps monarch butterflies navigate[J]. *Current Biology*, 2004, 14(2): 155-158.
- [20] Chu J, Wang Z, Guan L, *et al.* Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(5): 469-472.
- [21] Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.* System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003.
- [22] Suhai B, Horváth G. How well does the Rayleigh model describe the \mathbf{E} -vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(9): 1669-1676.