

引用格式: TAO Zhiwei, DAI Congming, WU Pengfei, et al. Atmospheric Effects of Star Imaging (I): Sky Polarization[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552209

陶志炜,戴聪明,武鹏飞,等.星光成像的大气影响研究(I):天空偏振[J].光子学报,2023,52(5):0552209

## 星光成像的大气影响研究(I):天空偏振

陶志炜<sup>1,2,3</sup>,戴聪明<sup>1,3</sup>,武鹏飞<sup>1,3</sup>,任益充<sup>4</sup>,梅海平<sup>1,3</sup>,徐文清<sup>1,3</sup>,徐刚<sup>1,3</sup>,  
童杰<sup>1,3,5</sup>,冯云松<sup>2</sup>,饶瑞中<sup>1,3</sup>,魏合理<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

(2 国防科学技术大学 电子对抗学院 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 合肥 230037)

(3 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

(4 合肥工业大学 物理学院, 合肥 230601)

(5 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

**摘要:**工作于近地空间的星敏感器,其观测过程将不可避免受到天空背景辐射、大气湍流以及大气折射的影响。本文是星光成像的大气影响系列文章之一,研究了如何利用偏振滤波技术降低天空背景辐射对恒星成像的影响。基于激光雷达实测数据,计算得到了典型地区整层大气粒子的分布特性及散射特性,结合大气矢量辐射传输模型,研究了天空背景在近红外波段的偏振特性,获得了不同大气条件及观测条件下的天空偏振特性,分析了观测与太阳位置对不同波长天空背景偏振分布的影响。研究表明:使用波长较长且位于吸收带的近红外光进行观测或提升星敏感器的观测高度,可采用偏振滤波技术一定程度上抑制天空背景光。当观测方位角一定时,选取合适的观测角度可以保证在较低太阳高度时能使用偏振滤波技术降低天空背景辐射对星光成像的影响。

**关键词:**星敏感器;恒星成像;背景辐射;偏振分布;偏振滤波技术

中图分类号:O439;O436.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235205.0552209

### 0 引言

人类利用恒星来进行导航,最早可追溯到古代人们通过北极星来确定方位。直到20世纪50年代,星敏感器的横空出世,大大提升了恒星导航的精度。星敏感器是一种高精度的姿态敏感测量仪器,它通过成像系统对星空成像,测量恒星矢量在星敏感器坐标系中的分量,利用已知的恒星精确位置来确定载体相对于惯性坐标系的三轴姿态<sup>[1]</sup>。星敏感器导航技术的高精度、抗干扰性强、可不依赖其它系统进行独立导航等优点在近地空间各类机载、舰载、车载平台上有着广泛的应用<sup>[2]</sup>。

早期,星敏感器应用于卫星平台,承担了卫星姿态测量的任务,是卫星平台不可或缺的测量设备。由于大气层外可近似看成是真空环境,因此,星载星敏感器在工作时几乎不受大气的影 响,其测姿精度通常可达到角秒级甚至亚角秒量级。随着空天观测平台的发展以及大气层内星敏感器观测高度的降低,大气对恒星探测的影响愈发显著,星敏感器在成像时不可避免的会受到地球大气背景辐射、湍流、折射等因素的影响。白天大气分子与气溶胶粒子会对太阳光产生散射,使得天空产生复杂的背景光,对星敏感器在白天观星时产生极大的干扰,严重降低成像的信噪比,使得恒星目标湮没在背景中,无法识别<sup>[3]</sup>。另一方面,大气分子与气溶胶粒子的存在会使得星光传输产生衰减,再加上大气本身存在折射率起伏,还会影响光波的相位,并对振幅产生调制,引发星光的闪烁和抖动<sup>[4-10]</sup>。由于大气折射率随高度存在一定变化,因此当星光经过大气传

**基金项目:**国家重点研发计划(No. 2019YFA0706004),中科院合肥物质科学研究院院长基金青年项目(No. YZJJ2023QN05),红外与低温等离子体安徽省重点实验室开放课题资助课题(No. IRKL2023KF05),基础加强计划(No. 2020-JCJQ-ZD-136-11)

**第一作者:**陶志炜, zwtao@aiofm.ac.cn

**通讯作者:**戴聪明, cmdai@aiofm.ac.cn

**收稿日期:**2023-03-01; **录用日期:**2023-04-19

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

输时,大气折射会延长星光的传输路径,改变星光的传输方向,严重影响星光导航的精度。

为了定量评估大气对星光成像的影响,需着重研究大气背景辐射对星光成像影响,解决恒星“看得见”的首要问题,即如何有效从复杂背景中提取微弱的目标信息,降低天空背景辐射的影响。针对该问题,国内外学者提出了光谱滤波的手段<sup>[11-12]</sup>,通过背景与恒星光谱的差别适当选择光谱波段和带宽进行滤波,最大程度的抑制了太阳散射的背景光。除此之外,调制测量技术的发展也为使用光的偏振自由度在复杂环境下进行目标探测以及目标提取成为了可能<sup>[13-15]</sup>,根据恒星目标直射光与太阳散射光偏振特性上的显著差异以及天空背景的偏振度分布预测结果,利用可调偏振器件对透振方向进行实时调节,便可实现对天光背景的有效抑制,增强星敏感器在白天情况下的恒星探测能力。

本文是星光成像大气影响三部分研究(背景辐射、湍流及折射)的第一部分,目标在于构建天空背景偏振分布的数理模型,并针对我国幅员辽阔特点,选取典型地区,不断获取测试数据,优化完善我国典型区域天空背景偏振分布的数据模型。首先,通过结合激光雷达的实测数据,获得典型地区整层大气粒子的分布特性及散射特性。其次,通过结合大气矢量辐射传输方程,研究大气的偏振特性,掌握其全天空的偏振分布,为克服全天时恒星探测的背景辐射影响,指导星光成像偏振滤波方案的制定,提供理论和数据支撑。

## 1 理论模型

### 1.1 大气温度分布特性

求解天空背景辐射及偏振分布,通常需要知道不同高度层的大气温度分布情况。一般而言,大气温度的分布具有一定的垂直结构,例如在美国标准大气模型中,温度随高度的分布情况可近似表示为线性关系形式<sup>[16]</sup>。另一方面,温度的分布还具有一定的地域和季节等特征,因此针对不同区域研究时,需选取对应区域的温度分布廓线进行计算。需要说明的是,本文的计算和分析采用2015年11月27日马兰地区的平均温度廓线进行展开(2015年11月27日,本课题组于马兰地区共开展实验测量157次。马兰地区的海拔高度为1.1 km,这里温度随高度的变化趋势是相对于海平面而言的),其温度垂直分布廓线如图1所示,其中虚线代表美国标准大气的垂直温度廓线,实线代表马兰地区实测的温度廓线分布。可以看出:美国标准大气下的温度分布基本与马兰地区的温度变化趋势相同,但在对流层顶处两者温度变化趋势存在一定的差异,即15~35 km处马兰地区温度随高度的变化出现明显振荡趋势。

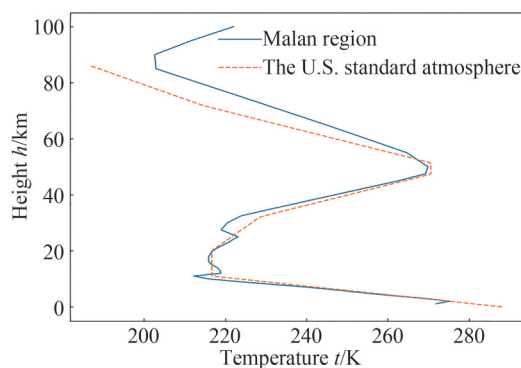


图1 马兰地区温度廓线图和美国标准大气温度廓线图  
Fig.1 Temperature profile of Malan region and the U.S. standard atmosphere

### 1.2 气溶胶分布特性

研究天空背景辐射及其偏振分布特性,需对矢量辐射传输方程进行求解。第一步需要设置较为合理的大气模式和气溶胶模型。根据美国标准大气模式,按照大气气溶胶的分布、种类和散射吸收特性,可以把大气分为对流层、平流层、中间层、热层与外层等。对流层占大气82.2%~92.5%,是辐射发生散射、产生偏振的主要层<sup>[16]</sup>。一般而言,大多数文献进行大气分层时通常认为0~5 km是发生Mie散射的主要层,5~15 km大气中主要散射类型为Rayleigh散射<sup>[17-18]</sup>。然而,由于大气不同高度层粒子的分布特性和散射特性与大气洁净度、温湿度、气压以及云层分布等因素相关,因此,若要研究不同高度层的辐射分布及偏振分布,需对整

层大气进行更加精细的分层。为此,本文根据具体计算需求、马兰地区平均气溶胶消光廓线(157次平均)、该地区此刻的大气密度数据以及天气情况对整层大气进行分层(2015年11月27日马兰地区全天为晴天。本文将整层大气划分为0 km, 1.5 km, 3 km, 4.5 km, 6 km, 7.5 km, 9 km, 10 km和30 km共9层,认为10~30 km主要是大气分子的Rayleigh散射,10 km以下为气溶胶粒子的Mie散射为主,不同高度层气溶胶具有不同的分布特性)。图2给出了2015年11月27日马兰地区测得550 nm气溶胶消光廓线随高度的分布。

下一步需计算每层大气中气溶胶粒子的分布特性,首先计算近地面气溶胶粒子数密度 $N_0$ 。通常

$N_0$ 的计算需知道近地面气溶胶粒子的复折射率、气溶胶分布类型以及能见度等信息。本文假设近地面气溶胶类型为湿沙尘气溶胶(激光雷达实测地面气溶胶类型为沙尘气溶胶,由于马兰地区深处沙漠地带且此时近地面相对湿度为78.89%,因此假设近地面气溶胶类型为湿沙尘气溶胶,其他地区应针对激光雷达实测数据具体分析本地区的气溶胶类型)。一般而言,湿气溶胶粒子的折射指数 $m_e = m_{r,e} - im_{i,e}$ 是由于干粒子和凝结的液态水共同决定,其实部和虚部的计算公式为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} m_{r,e} = m_{r,w} + (m_{r,0} - m_{r,w}) \left( \frac{r(H)}{r_0} \right)^{-3} \\ \frac{m_{i,e}}{m_{r,e}^2 + 2} = \frac{m_{i,w}}{m_{r,w}^2 + 2} + \left( \frac{m_{i,0}}{m_{r,0}^2 + 2} - \frac{m_{i,w}}{m_{r,w}^2 + 2} \right) \left( \frac{r(H)}{r_0} \right)^{-3} \end{cases} \quad (1)$$

式中,下标e代表消光,w和0分别表示水和干气溶胶粒子; $r(H)/r_0$ 表示湿气溶胶粒子半径与干气溶胶粒子半径之比,计算公式为<sup>[19]</sup>

$$\frac{r(H)}{r_0} = (1-H)^{-\left(\frac{1}{d}\right)} - (1-60\%)^{-\left(\frac{1}{d}\right)} + 1 \quad (2)$$

式中, $H$ 代表相对湿度, $d=3.5$ ,适用范围为 $60\% \leq H \leq 95\%$ 。由式(1)和(2)可知,根据近地面激光雷达测得的相对湿度,便可计算近地面湿沙尘气溶胶的复折射率。另一方面,根据粒子计数器马兰地区实测的近地面气溶胶分布特性(粒子计数器统计得到马兰地区近地面气溶胶满足Junge分布<sup>[20]</sup>),结合近地面气溶胶复折射率、激光雷达测得能见度以及粒子计数器测得的Junge指数,便可计算得到近地面的粒子数密度 $N_0$ ,具体计算公式为<sup>[21]</sup>

$$N_0 = \frac{3.912/V_{is} - \beta_m}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(550, m_e, r) n(r) dr} \quad (3)$$

式中, $V_{is}$ 为近地面能见度, $\beta_m$ 表示近地面分子衰减,一般近似取 $0.001159 \text{ km}^{-1}$ , $n(r) = r^{-(v-1)}$ , $v$ 则代表近地面的Junge指数。本文计算中相关参数取值为 $V_{is} = 5.04 \text{ km}$ , $v = 2.72$ , $H = 78.89\%$ 。

其次需根据气溶胶粒子数密度的高度分布,结合激光雷达测得的气溶胶粒子消光廓线各层平均后的消光系数,根据式(4)反解出每一层气溶胶粒子的Junge指数<sup>[22]</sup>。

$$\sigma_e(\lambda, h) = N(h) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(\lambda, m_e, r) n(r, h) dr \quad (4)$$

式中, $Q_{\text{ext}}(\lambda, m_e, r)$ 为单个气溶胶粒子的消光衰减效率因子, $\sigma_e(\lambda, h)$ 、 $N(h)$ 和 $n(r, h)$ 分别代表高度为 $h$ 时的消光系数、粒子数密度和Junge谱分布, $n(r, h)$ 与高度 $h$ 有关是因为Junge指数 $v$ 也是 $h$ 的函数。需要说明的是,在美国标准大气模型中,气溶胶粒子数密度随高度的变化可由指数衰减给出<sup>[23]</sup>,这一般与马兰地区的实际情况存在一定的差异。另一方面,由于粒子数密度与消光系数成正比,因此在本文的计算中,粒子数密度

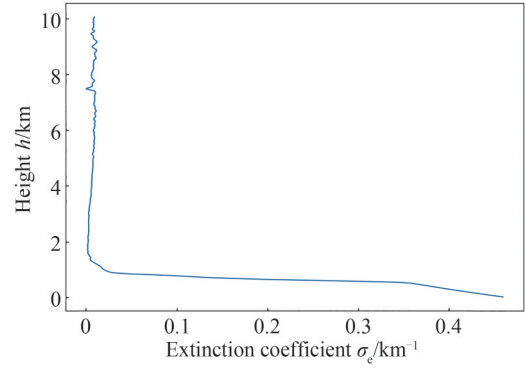


图2 2015年11月27日马兰地区气溶胶消光廓线(激光雷达测得)

Fig.2 Aerosol extinction profile in Malan region on November 27, 2015 (measured by lidar)

随高度的分布廓线可由消光廓线和近地面的粒子数密度  $N_0$  计算得到。至此,便可得到不同高度气溶胶粒子的分布特性。

### 1.3 气溶胶散射特性

上一节给出了大气中不同高度层的气溶胶分布特性,为了获取该层气溶胶粒子的散射特性,本文采用 Mie 散射过程进行计算求解。Mie 散射中最为核心的是粒子的散射相矩阵,它决定了散射辐射与入射辐射之间的关系。

一般而言,散射相矩阵通常具有 16 个相互独立元素<sup>[22]</sup>。对于球形对称的随机取向散射粒子而言,散射相矩阵  $P$  可以写为<sup>[24]</sup>

$$P(\cos\theta) = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & P_{34} & P_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\theta$  表示散射角。对于单个气溶胶粒子而言,散射相矩阵的各个元素可表示为<sup>[25]</sup>

$$\begin{cases} P_{11} = 1/2(|S_1|^2 + |S_2|^2) \\ P_{12} = 1/2(|S_2|^2 - |S_1|^2) \\ P_{33} = 1/2(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) \\ P_{34} = 1/2(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) \end{cases} \quad (6)$$

式中,

$$\begin{cases} S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)) \\ S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $a_n, b_n$  表述 Lorentz-Mie 系数,  $\pi_n$  和  $\tau_n$  则可以使用连带 Legendre 多项式定义

$$\begin{cases} \pi_n(\cos\theta) = \frac{P_n^{(1)}(\cos\theta)}{\sin\theta} \\ \tau_n(\cos\theta) = \cos\theta \pi_n(\cos\theta) + \sin\theta \frac{d}{d\theta} [\pi_n(\cos\theta)] \end{cases} \quad (8)$$

根据单个气溶胶粒子的散射相元素,并结合每一层的气溶胶的分布特性,便可计算该层的气溶胶粒子的平均散射相元素,具体计算公式为<sup>[26]</sup>

$$\langle P_{ij} \rangle = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{sca}}(\lambda, m_e, r) n(r) P_{ij} dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 Q_{\text{sca}}(\lambda, m_e, r) n(r) dr} \quad (9)$$

图 3 是最低层不同波长情况下散射相矩阵各元素随散射角度的变化情况。由于本文计算中粒子数密度随高度的分布廓线可由消光廓线和近地面的粒子数密度  $N_0$  计算得到,因此大气各层气溶胶分布的 Junge 指数相同,不同层的散射相函数也相同,但散射特性不同。

最后,将式(9)代入式(6)得到该层气溶胶粒子的散射相矩阵,当采用倍加累加法进行天空偏振建模时,需将上述求得的散射相位矩阵中各元素全部展开为 Legendre 多项式,得到

$$\langle P_{ij} \rangle = \sum_{l=0}^{N_l} \chi_l^{(ij)} \mathcal{P}_l(\cos\theta) \quad (10)$$

式中,系数  $\chi_l^{(ij)}$  表征了该层散射相矩阵的所有信息。

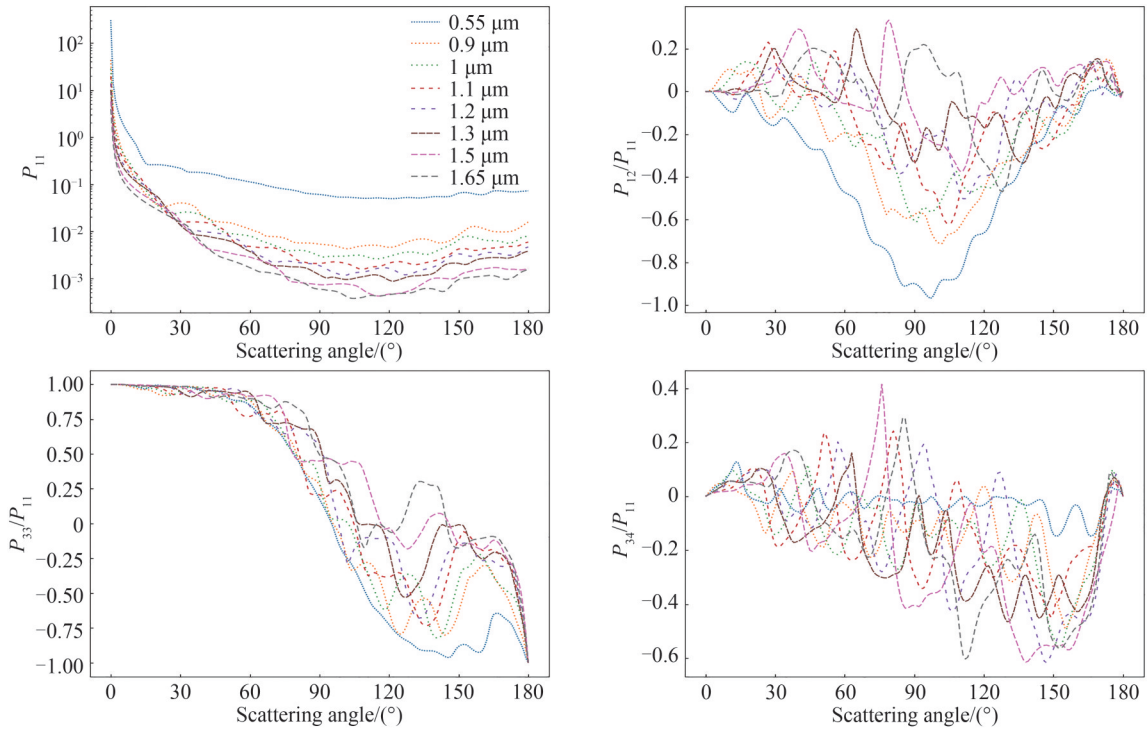


图3 大气最低层不同波长情况下散射相矩阵各元素随散射角度的变化

Fig.3 Variation of the elements of the scattering phase matrix with scattering angle under different wavelengths in the lowest atmospheric layer

#### 1.4 基于倍加-累加法的矢量辐射传输模式

前几小节分别介绍了如何计算整层大气的温度分布,气溶胶分布以及气溶胶散射特性。本节将基于前几小节的计算结果作为输入参数代入矢量辐射传输方程计算描述天空偏振状态的 Stokes 参数,具体计算流程图见图 4<sup>[17-18]</sup>。

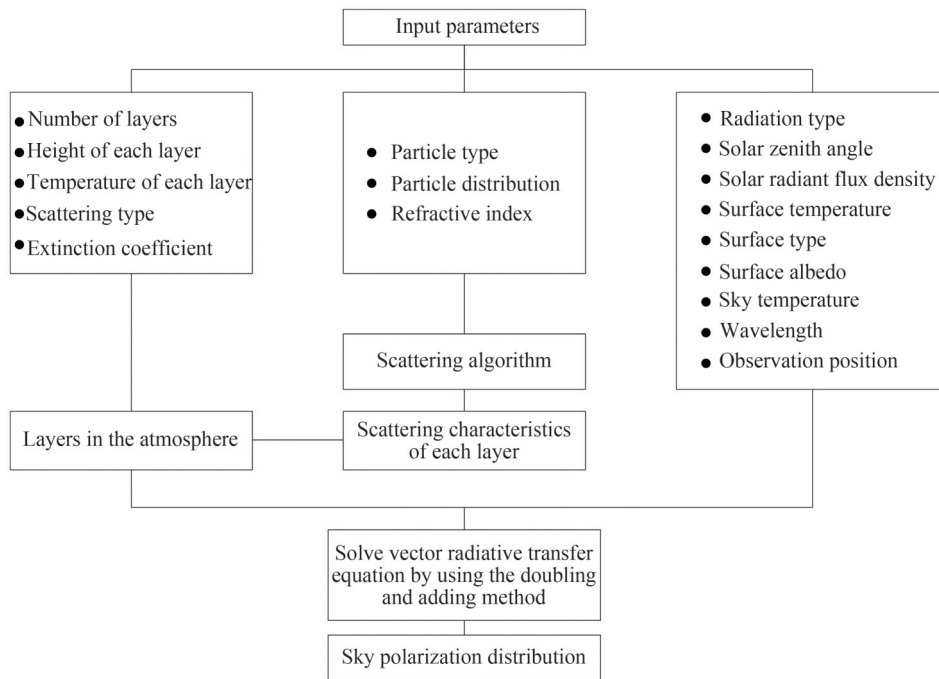


图4 基于倍加累加法的天空偏振分布特性求解流程

Fig.4 Flow chart for solving sky polarization distribution characteristics based on the doubling and adding method

一般而言,电磁波在平面平行大气中传播时的矢量辐射传输方程可以表示为<sup>[24]</sup>

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = -I(\tau, \mu, \phi) + J(\tau, \mu, \phi) \quad (11)$$

式中,  $I = [I, Q, U, V]^T$  代表描述辐射及其偏振状态的 Stokes 参数,  $I$  为总光强,  $Q, U$  分别代表两个正交方向上的线偏振光,  $V$  代表圆偏振光。函数  $J(\tau, \mu, \phi)$  可表示为

$$J(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 M(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' + \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) M(\tau, \mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) \quad (12)$$

式中, 第一项为多次散射的贡献项, 第二项为来自上一层边界的入射辐射造成的单次散射的贡献项。其中  $\mu$  为天顶角余弦, 一般规定向下为正, 向上为负,  $\phi$  为相对于太阳出射光线的方位角,  $\tau$  为光学厚度,  $\omega$  为单次散射反照率,  $F_0 = [F_0, 0, 0, 0]^T$  为大气层顶太阳入射辐射通量,  $\mu_0, \phi_0$  分别为太阳天顶角的余弦和方位角,  $M$  为散射 Muller 矩阵, 它是由散射相矩阵  $P$  经参考平面旋转变换得到<sup>[24]</sup>

$$M(\mu, \phi; \mu', \phi') = L(\pi - i_2) P(\cos\Theta) L(-i_1) \quad (13)$$

其中

$$L(i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2i & -\sin 2i & 0 \\ 0 & \sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

一般而言, 矢量辐射传输方程(11)不存在解析解, 通常采用数值法进行求解, 倍加-累加法便是其中一种求解矢量辐射传输的数值方法, 它的思想是首先采用傅里叶级数对方位角进行展开、对天顶角进行离散化, 然后根据事先划分好的大气均匀层、计算每层粒子的散射特性、并采用倍加法计算每个均匀层间的反射和透射性质, 最后由已知的介质层反射和透射矩阵, 采用累加法得到整个非均匀组合层的反射和透射性质, 进而求得整层大气的辐射性质<sup>[24]</sup>。

## 2 结果分析

在进行结果分析之前, 有三点注意事项需特别说明:

1) 从图 4 给出计算流程图可以看出, 求解矢量辐射传输方程需输入太阳辐射通量密度, 其中不同波长下的辐射通量密度可由太阳光谱得到。图 5 给出了 AM1.5 标准下光谱辐射通量密度随波长的变化情况<sup>[27]</sup>。AM (Air Mass) 代表大气质量, 由于太阳入射到地球不同纬度的天顶角不同, 也即光程不同, 因此相对的等效大气质量也不同, 由公式  $AM \approx 1/\cos(z)$ , 其中  $z$  代表天顶角, 可知, AM1.5 对于与天顶角  $48.2^\circ$ , 包括中国, 欧洲, 美国在内的大部分国家都处在这个中纬度区域。因此一般地表上的太阳光谱都用 AM1.5 表示, 能量取  $1000 \text{ W/m}^2$ 。

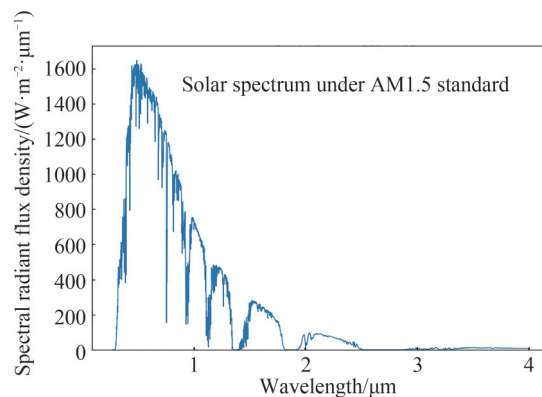


图 5 AM1.5 标准下光谱辐射通量密度随波长的变化

Fig.5 Variation of spectral radiant flux density with wavelength under AM1.5 standard

本文计算中使用的波长与光谱辐射通量密度如表1所示。

表1 本文计算中使用的波长与光谱辐射通量密度的关系

Table 1 The relationship between the wavelength and the spectral radiant flux density used in this calculation

Wavelength/ $\mu\text{m}$	Solar radiant flux density/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
0.55	1561.5
0.9	748.5
1	746.5
1.1	412.6
1.2	423.6
1.3	413.1
1.5	182.1
1.65	234.8

2)基于倍加累加法的矢量辐射传输方程在进行天顶角定义的时候规定向下为正、向上为负,这与传统规定的以上为正,以下为负有所不同。图6给出了不同观测高度下星敏感器的观测几何图。

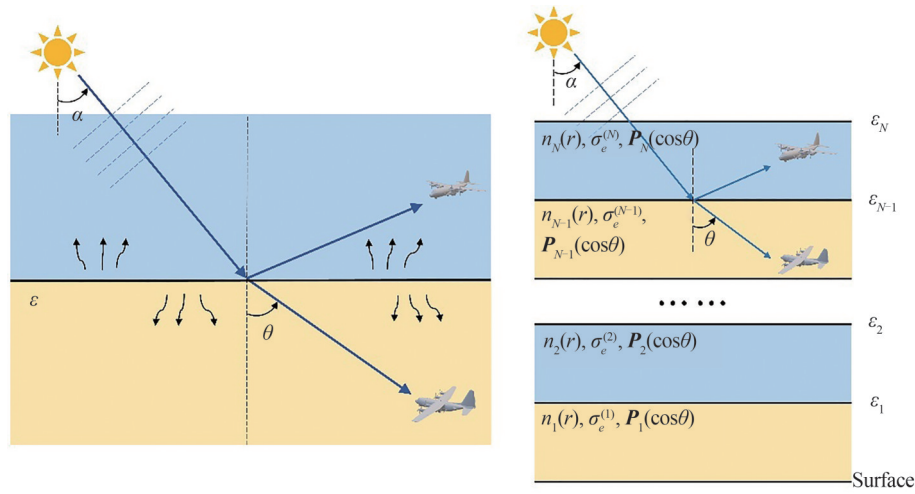


图6 星敏感器的观测几何图

Fig.6 Observation geometry of star sensor

从图6中可以看出,整层大气被划分为若干层,求解每一层的气溶胶分布特性以及散射特性,并结合矢量辐射传输模型便可得到每一层的辐射及偏振分布情况(本次计算中将大气层分为9层,分别为30 km, 10 km, 9 km等等)。如图6左图所示,大气中的某一层将该区域的大气划分为蓝色区域和黄色区域,以9 km这一层为例,若星敏感器位于蓝色区域,则代表此时观测到9 km处的上行辐射,若位于黄色区域,则代表此时观测到9 km处的下行辐射(当 $0 \leq \theta < \pi/2$ 时,代表下行辐射;当 $\pi/2 < \theta \leq \pi$ 时,代表上行辐射), $\alpha$ 代表太阳天顶角。

3)本文计算固定参数选取如表2所示。

表2 本文计算中所使用的固定参数

Table 2 Fixed parameters used in this calculation

Parameter type	Input value
Number of quadrature directions	8
Order of azimuth expansion	8
Type of quadrature	Gaussian type
Delta-M scaling	No
Radiation type	Solar radiation
Surface temperature	273.9 K

Parameter type	Input value
Surface type	Lambertian surface
Surface albedo	0.25
Sky temperature	0 K
Number of output azimuths	37

## 2.1 天空 Stokes 分量及偏振分布情况

根据上节提供的天空偏振计算的具体方法,可得到不同情况下天空偏振分布的情况。需要说明的是,本小节考虑的天空 Stokes 分量以及偏振分布情况仅代表不同高度所观测到的下行辐射情况。下文将给出不同太阳天顶角、不同波长以及不同观测高度情况下的天空偏振分布。首先以太阳天顶角  $45^\circ$  为例,图 7 至图 9 给出了不同观测高度以及不同波长情况下 Stokes 分量的分布情况,其中图 7~9 中每幅子图中角向变化(逆时针)代表不同观测方位角,径向变化代表不同观测角度。

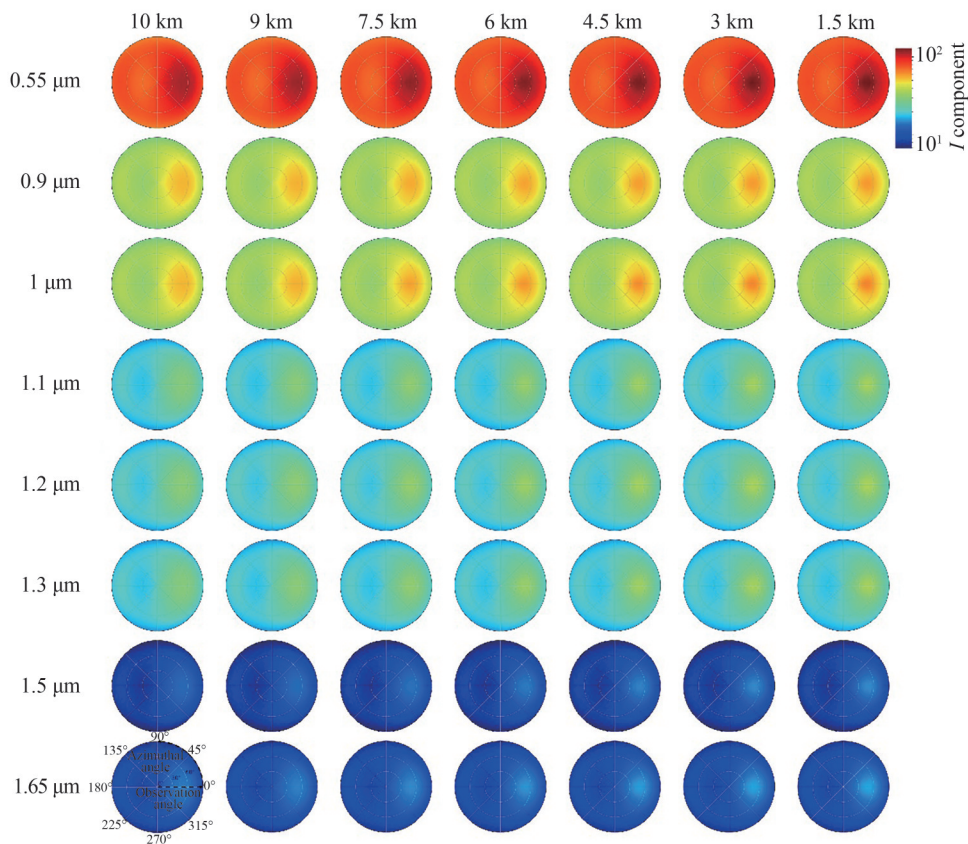


图 7 太阳天顶角为  $45^\circ$  时的天空辐亮度( $I$ 分量)分布

Fig.7 Distribution of sky irradiance ( $I$  component) at a solar zenith angle of  $45^\circ$

从图中可以看出:随着波长的增加,天空背景的辐亮度值( $I$ 分量,单位:  $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ )逐渐减小,说明短波近红外波段能有效抑制背景噪声;另外,不同波长天空背景噪声的变化是阶段性的,例如:  $0.55 \mu m$  比  $0.9 \mu m$  和  $1 \mu m$  背景噪声要强很多,而  $0.9 \mu m$  和  $1 \mu m$  之间的背景噪声则变化不大,这可能是由不同波长下太阳直接辐射通量密度的大小决定的。随着观测高度的降低,天空背景的辐亮度值逐渐增大,尤其是观测角度等于太阳天顶角的位置,会出现背景噪声的最高峰,这说明星敏传感器对同一天空区域进行观测时,背景噪声会相差很多,提高星敏传感器的观测高度,能够一定程度的降低天空背景噪声的影响,提升观测到恒星的概率和数目。最后,从图中还可看出不同观测高度以及不同波长情况下,天空背景辐亮度值的最小值均出现在与太阳天顶角正交的观测位置上。



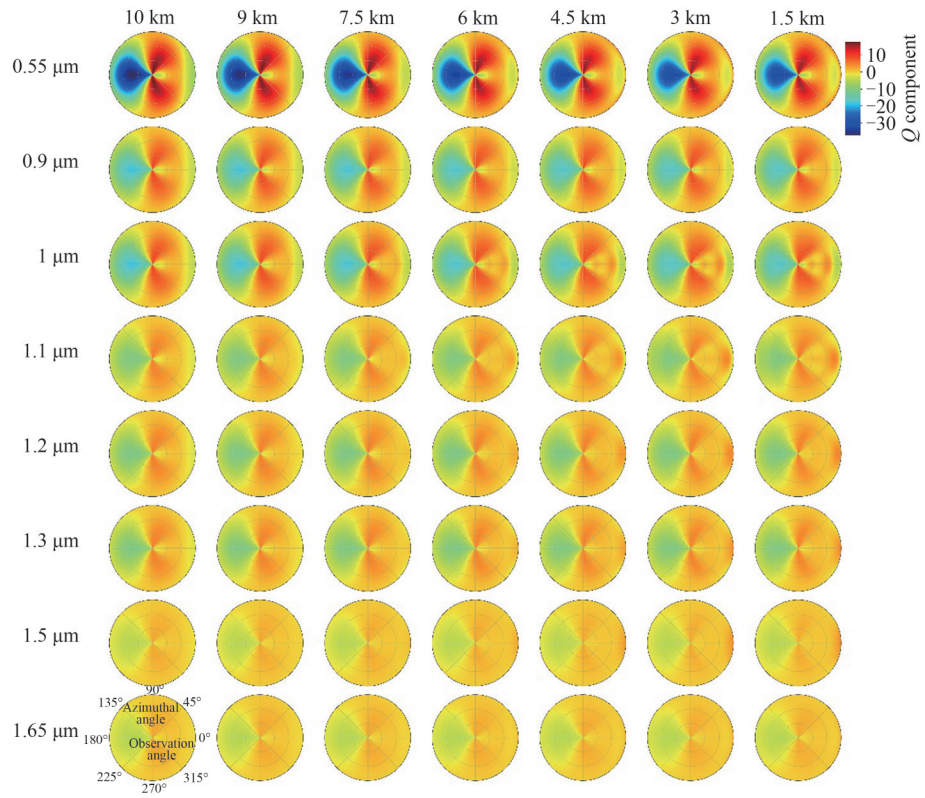


图8 太阳天顶角为45°时的天空Q分量分布

Fig.8 Distribution of sky Q component at a solar zenith angle of 45°

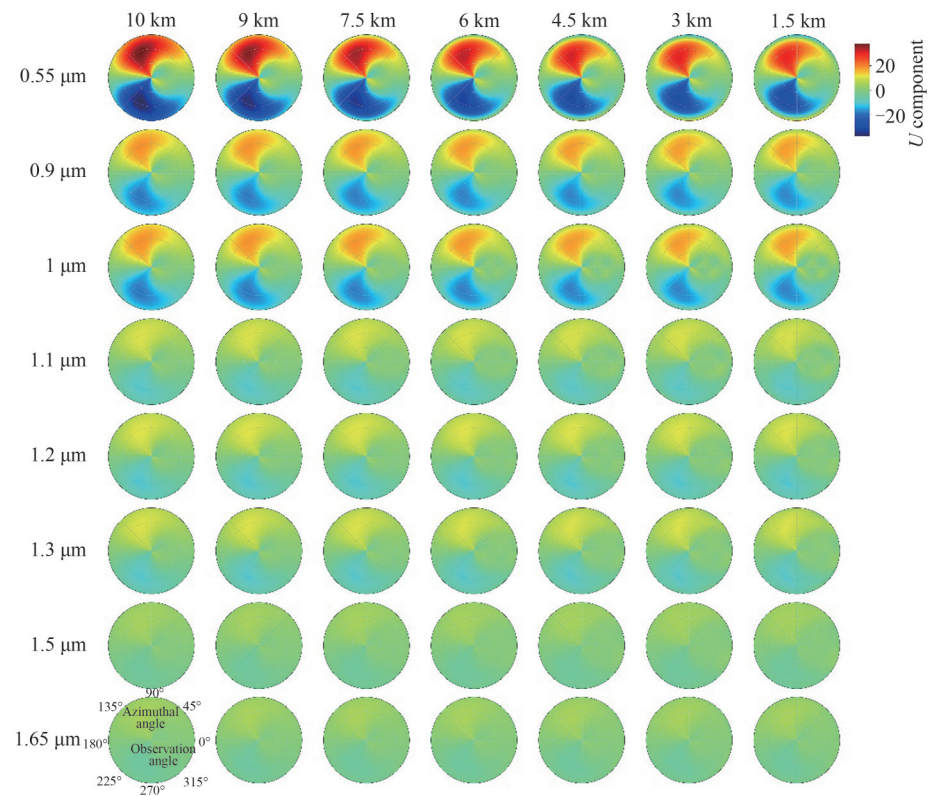


图9 太阳天顶角为45°时的天空U分量分布

Fig.9 Distribution of sky U component at a solar zenith angle of 45°

观察计算得到的天空  $Q, U$  分量(分别代表垂直基和斜角基每组基矢中两个线偏振方向的强度差)分布情况,可以看出:短波相比长波而言,不同观测区域具有更加明显的偏振行为差异( $Q, U$ 分量变化范围更大),这可能是因为短波较长波而言,其散射相矩阵元素  $P_{12}/P_{11}$  更大的原因导致的,如图 3 所示。另一方面,当观测高度越高时,不同观测区域的偏振行为差异更为明显。

图 10~15 给出了不同太阳天顶角情况下各观测高度以及各波长的天空偏振分布情况,其中图 10~15 中每幅子图中角向变化(逆时针)代表不同观测方位角,径向变化则代表不同观测角度。从图中可以看出天空偏振分布以太阳子午线为对称轴对称。当观测高度以及波长不同时,若观测角度等于太阳天顶角,此时天空偏振度将取得最小值。另一方面,可以看出偏振度的最大值均出现在与太阳天顶角正交的观测位置上,且随着观测高度逐渐降低,天空背景逐渐变强,此时偏振度也相应越小。因此,提升星敏感器的观测高度,有利于提升全天空的偏振差异分布,这时可采用偏振滤波技术一定程度上抑制天空背景光。除此之外,从图中还可看出随着波长的增大,偏振度逐渐增大,例如:  $0.55 \mu\text{m}$  是太阳辐射通量密度最大,此时天空偏振度值最小;反之由于  $1.5 \mu\text{m}$  附近有吸收带,这时太阳辐射通量密度最小,这时偏振度最大。因此,理论上使用波长较长且位于吸收带的近红外光可一定程度上抑制天空背景光。

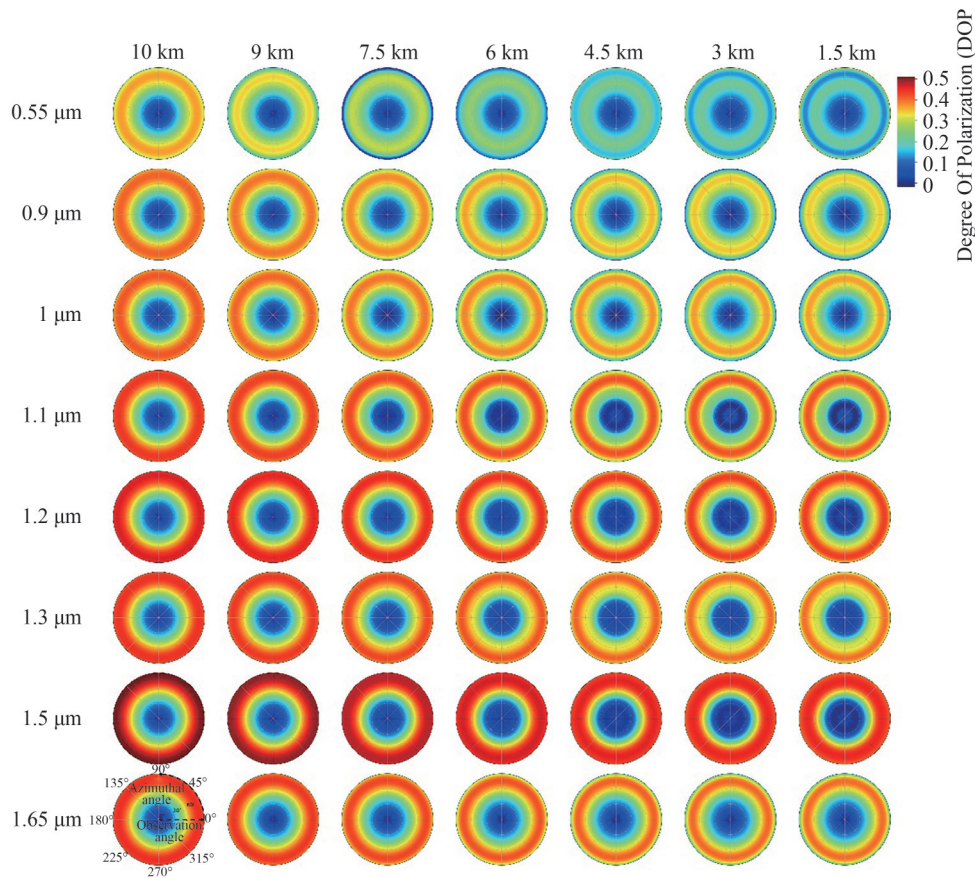


图 10 太阳天顶角为  $0^\circ$  时的天空偏振分布

Fig. 10 Distribution of sky polarization at solar zenith angle of  $0^\circ$

最后,从图 10~15 中还可以观察到当太阳天顶角越大时,此时天空偏振度最大值也越大,两者呈现正相关关系,这可能是因为太阳的位置随太阳天顶角的减小逐渐增高,此时天空背景光逐渐增强导致的。另一方面,可以看到:当太阳天顶角为  $0^\circ$  时,此时偏振度取得最小值,这时天空偏振分布在不同的观测方位呈各向同性特性。当太阳天顶角增大到一定程度时,这时天空偏振度随波长和观测高度的变化并不显著,且观测高度对偏振度的影响明显小于波段的影响,这是因为此时的太阳高度角较低,背景辐射较弱,偏振度基本处于饱和状态。值得注意的是,图 10~15 中的偏振度的最大值均处于 0.6 附近,这说明存在其他因素可能影响偏振,需深入分析原因。

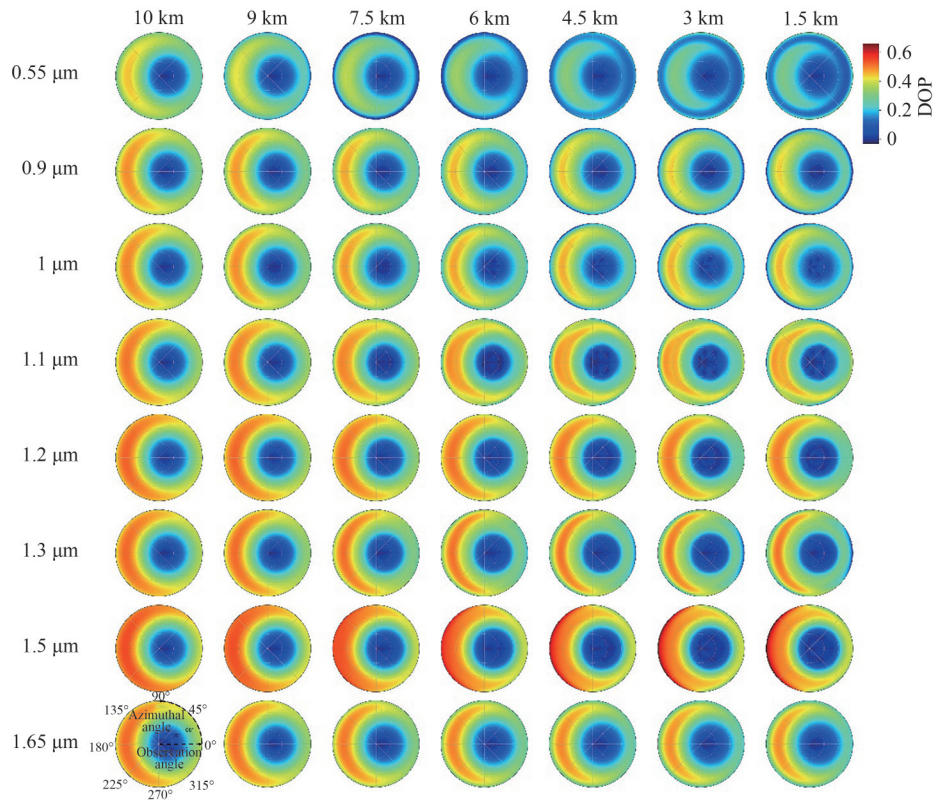


图 11 太阳天顶角为 15° 时的天空偏振分布

Fig. 11 Distribution of sky polarization at solar zenith angle of 15°

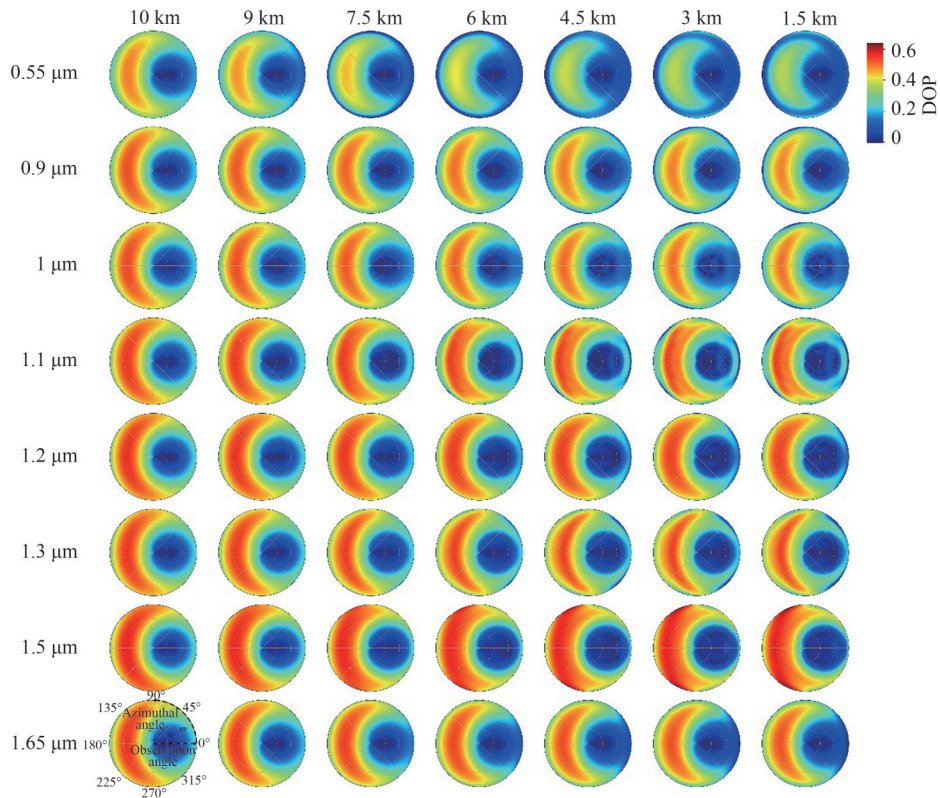


图 12 太阳天顶角为 30° 时的天空偏振分布

Fig. 12 Distribution of sky polarization at solar zenith angle of 30°

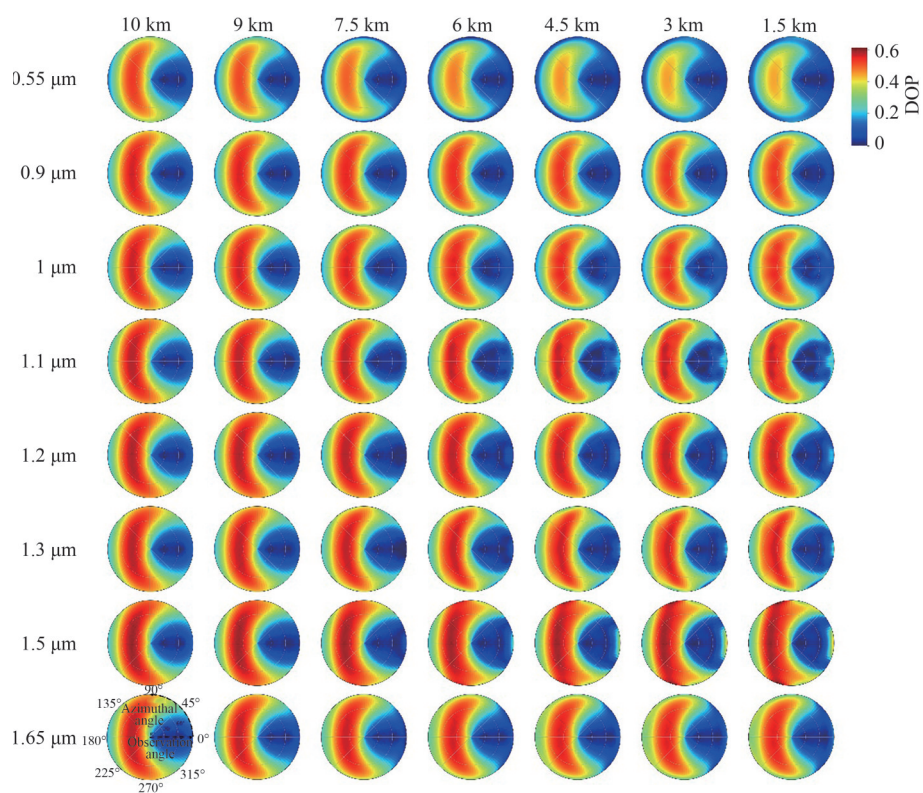


图 13 太阳天顶角为 45° 时的天空偏振分布  
 Fig. 13 Distribution of sky polarization at solar zenith angle of 45°

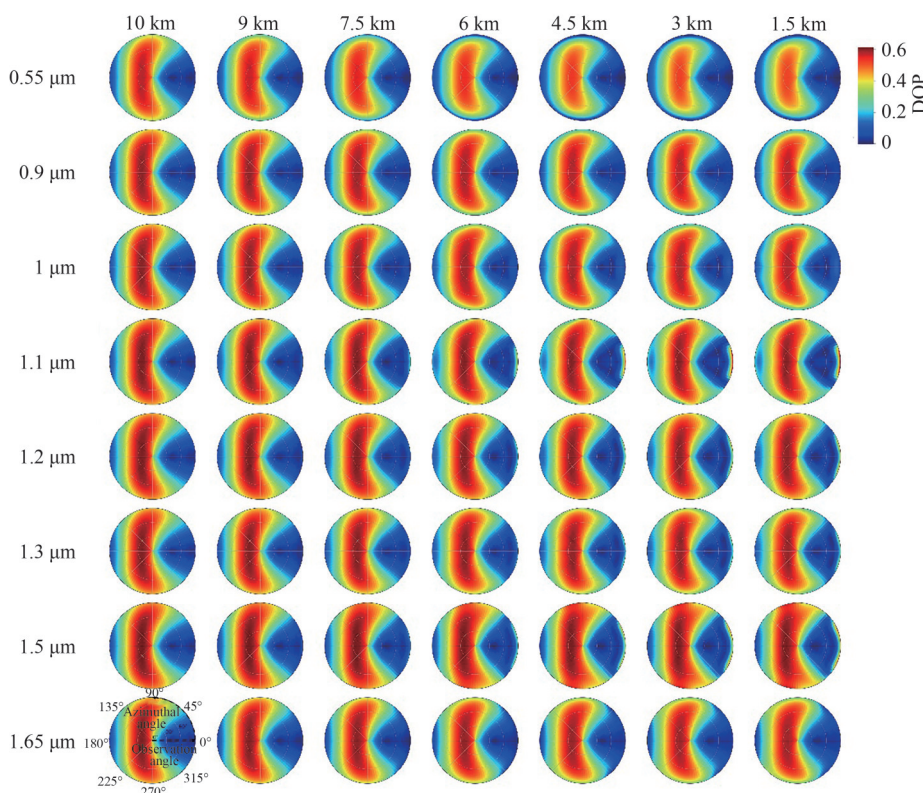
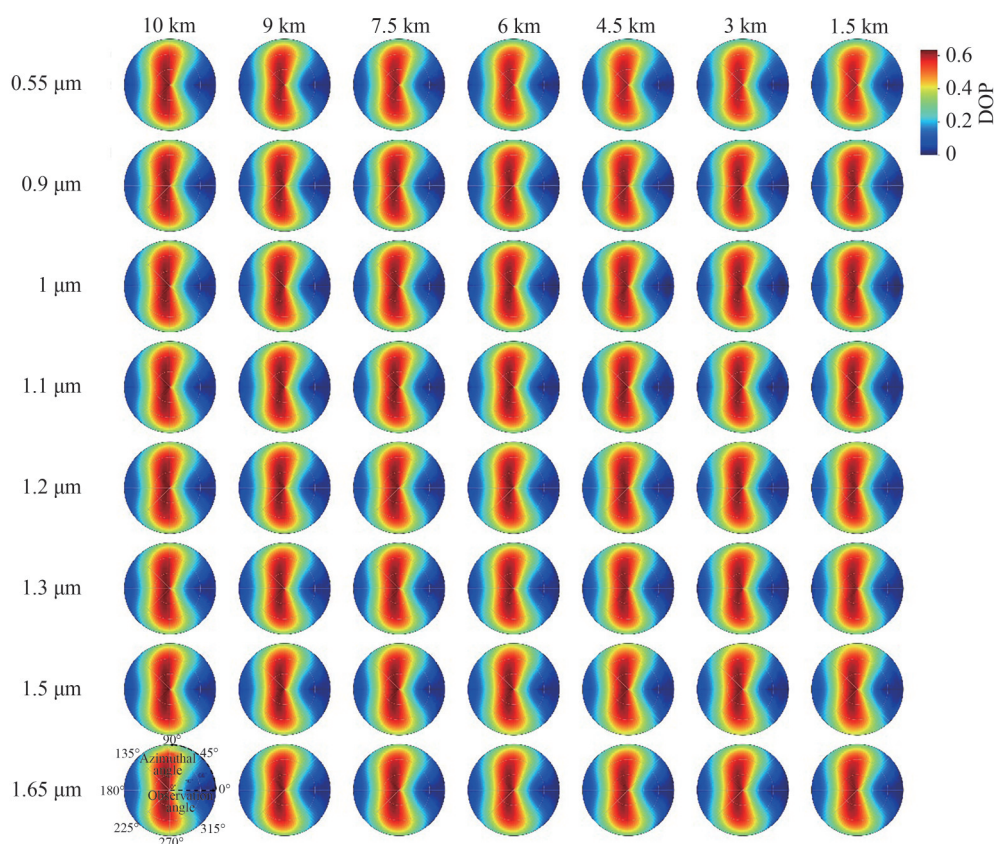


图 14 太阳天顶角为 60° 时的天空偏振分布  
 Fig. 14 Distribution of sky polarization at solar zenith angle of 60°

图 15 太阳天顶角为  $75^\circ$  时的天空偏振分布Fig. 15 Distribution of sky polarization at solar zenith angle of  $75^\circ$ 

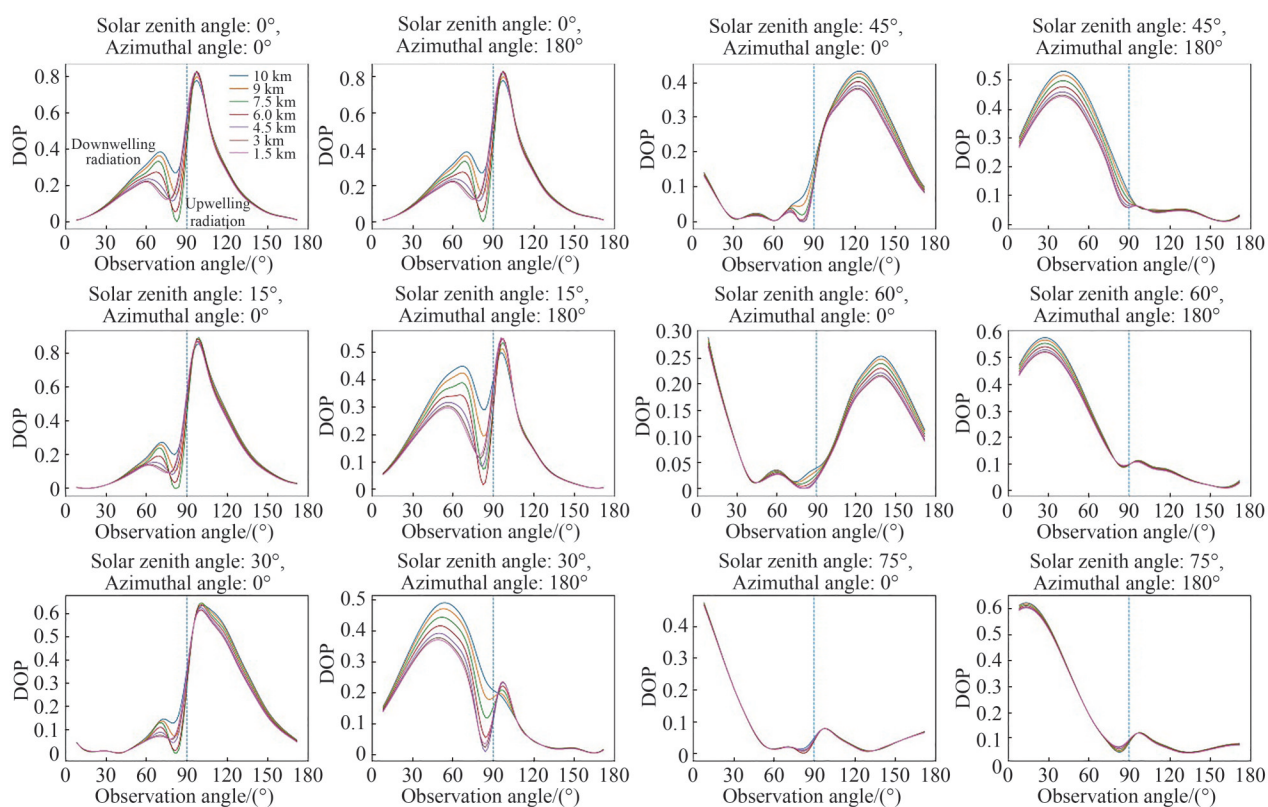
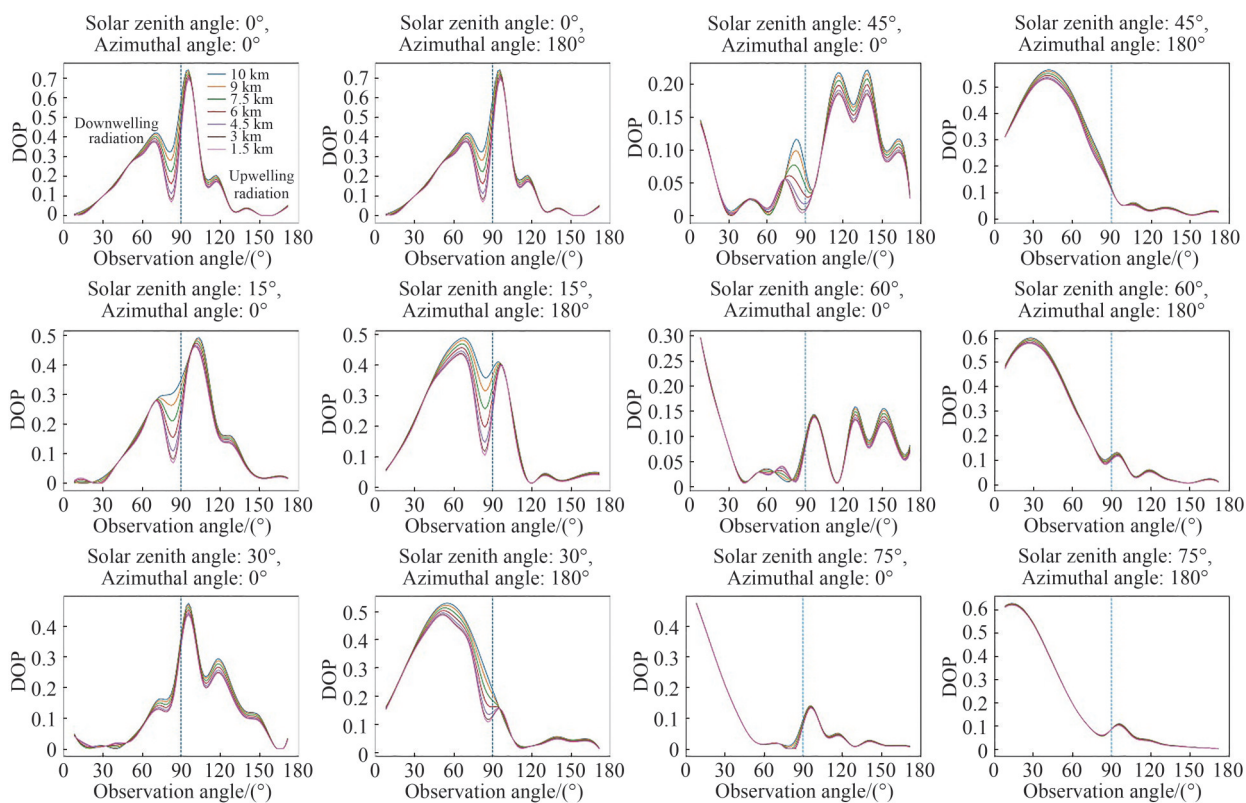
## 2.2 典型波长不同观测高度情况

图 16~18 给出了典型波长下太阳天顶角及观测高度不同时偏振度随观测角度的变化情况,其中子图第一列代表观测方位角为  $0^\circ$  时的情况,第二列代表观测方位角为  $180^\circ$  时的情况。需要说明的是,观测角度从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  变化时,代表星敏感器在不同观测高度所观测到的对应层的下行辐射情况,当观测角度从  $90^\circ$  到  $180^\circ$  变化时,表示在对应层观测到的上行辐射的偏振度。

从图中可以看到:与图 10~15 得到的结论类似,对于下行辐射而言,无论观测方位角如何变化,较高的观测高度及波长,会对应较大的天空偏振度。当观测下行辐射且观测方位角为  $180^\circ$  时,太阳天顶角与偏振度变化呈现正相关关系,这时下行辐射偏振度最大值也随太阳天顶角增大呈递增趋势,且偏振度最大值在较小的观测角度获得;当观测方位角为  $0^\circ$  时,偏振度最小值会随太阳位置移动而变化,且最小值在太阳位置处获得。

对于上行辐射而言,可以看到:当观测高度越低时,天空偏振度越大,这可能是由于此时低层大气的天空背景辐射较强,则每一层所对应的上行辐射便相对较弱,因此观测到的上行辐射的偏振度也就较大导致的。除此之外,当观测方位角为  $0^\circ$  时,上行辐射偏振度最大值随太阳天顶角增大呈现递减趋势,此时较小的太阳天顶角会对应较大的天空偏振度。

最后,分析典型波长下太阳天顶角及观测高度不同时偏振度随观测角度的变化情况,可以看到当观测方位角为  $0^\circ$  时,随着太阳天顶角增大,下行辐射偏振度曲线左边逐渐抬起,谷峰逐渐消失;当观测方位角  $180^\circ$  时,随着太阳天顶角增大,下行辐射谷峰逐渐抬起,上行辐射谷峰逐渐变小,呈递减趋势。相比于短波而言,短波红外波段上行辐射偏振度随观测角度的变化振荡相对剧烈,这可能是由于短波红外波段相矩阵元素随散射角度(后向散射)变化剧烈引起的。

图 16 0.55  $\mu\text{m}$  时不同观测高度下偏振度随观测角度的变化Fig. 16 Variation of polarization with observation angle for different observation altitudes at 0.55  $\mu\text{m}$ 图 17 0.9  $\mu\text{m}$  时不同观测高度下偏振度随观测角度的变化Fig. 17 Variation of polarization with observation angle for different observation altitudes at 0.9  $\mu\text{m}$

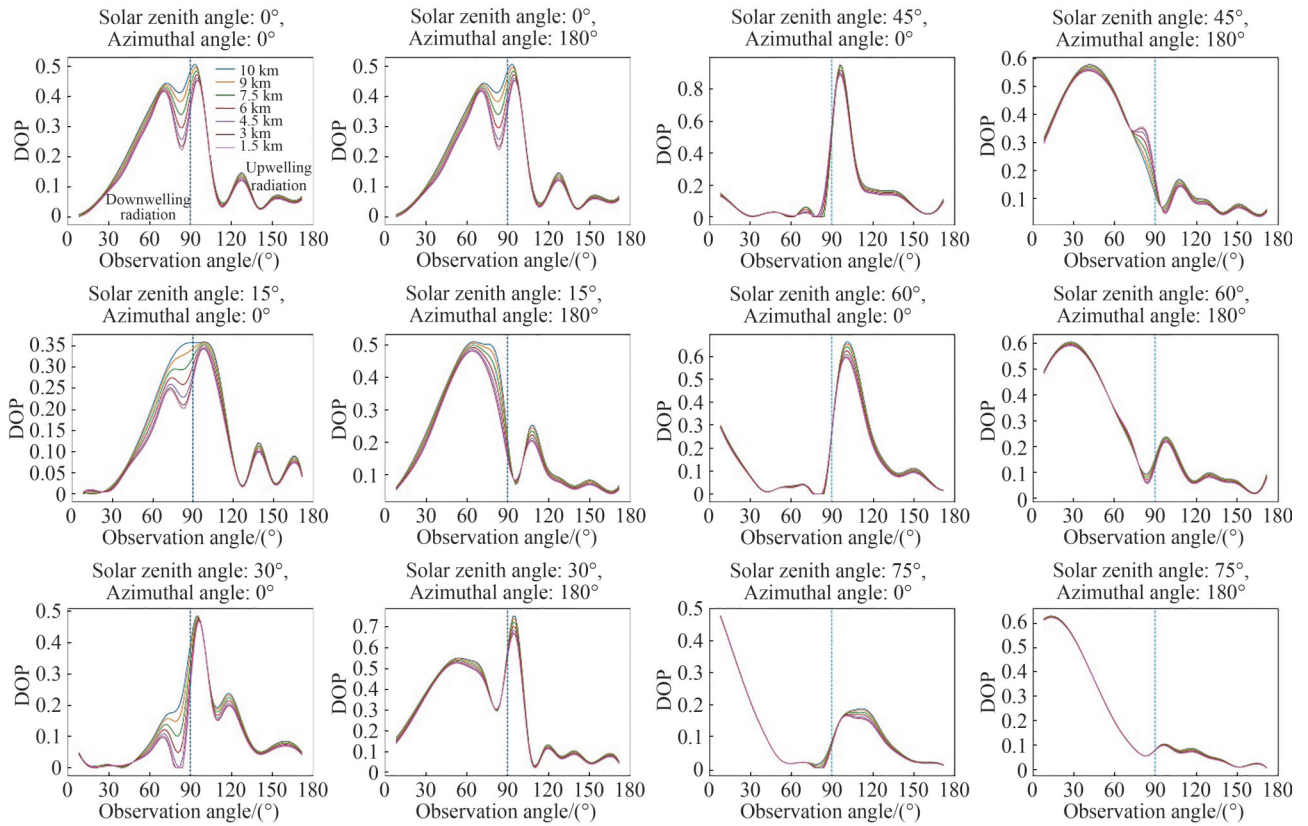


图 18 1.65 μm 时不同观测高度下偏振度随观测角度的变化

Fig. 18 Variation of polarization with observation angle for different observation altitudes at 1.65 μm

### 2.3 典型观测高度不同太阳天顶角情况

图 19~20 给出了波长为 1.65 μm, 观测方位角为 0° 及 180° 时, 典型观测高度, 不同太阳天顶角情况下偏

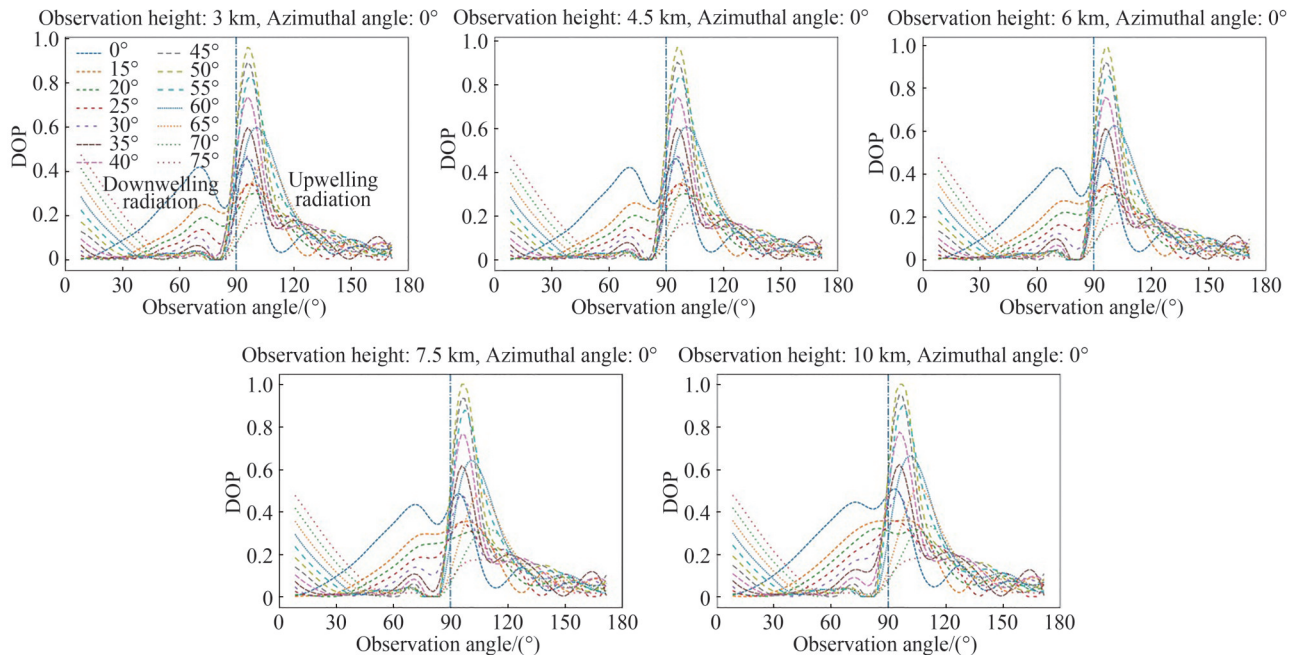


图 19 波长为 1.65 μm, 方位角为 0° 时不同太阳天顶角下偏振度随观测角度的变化

Fig. 19 Variation of polarization with observation angle for different solar zenith angles at a wavelength of 1.65 μm and an azimuth of 0°

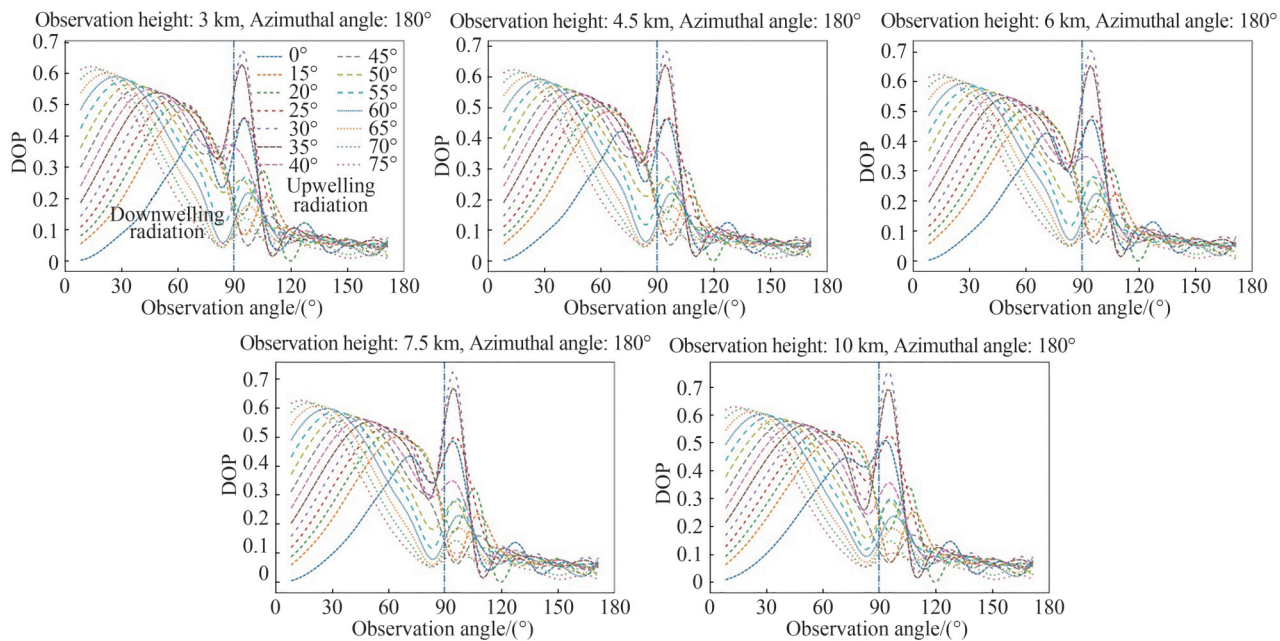


图 20 波长为  $1.65 \mu\text{m}$ , 方位角为  $180^\circ$  时不同太阳天顶角下偏振度随观测角度的变化

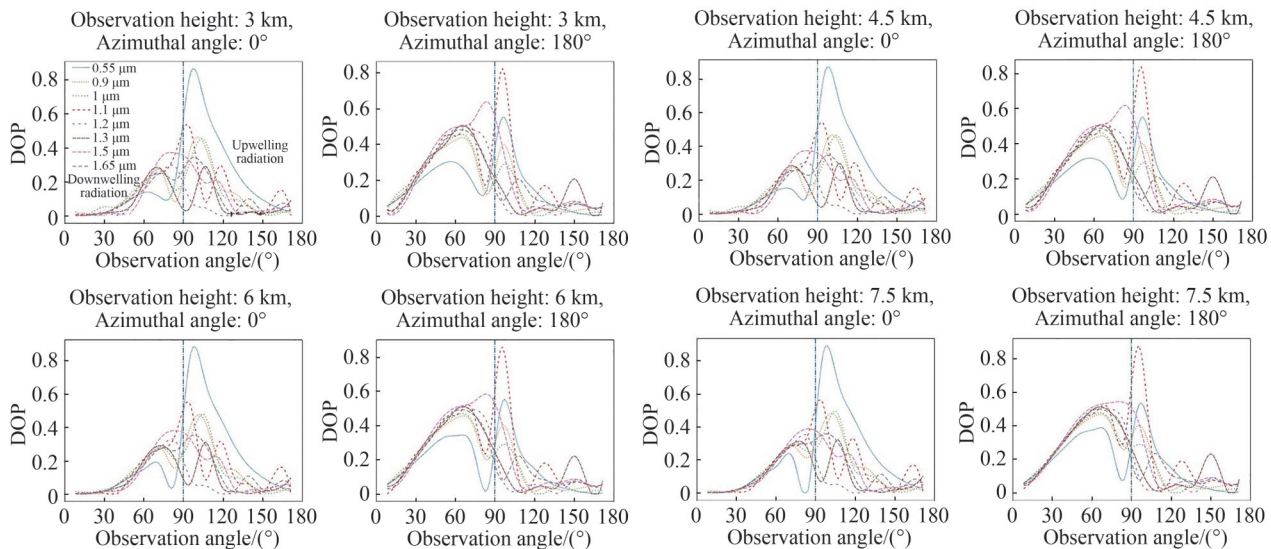
Fig. 20 Variation of polarization with observation angle for different solar zenith angles at a wavelength of  $1.65 \mu\text{m}$  and an azimuth of  $180^\circ$

振度随观测角度变化情况。对于观测方位角为  $0^\circ$  的情形,可看出当观测下行辐射时,偏振度最小值出现在太阳位置附近。当观测角度为  $0^\circ$  时,偏振度随太阳天顶角增大而增大,整体呈现单调递增趋势。当观测角度在  $60^\circ \sim 75^\circ$  附近时,偏振度随太阳天顶角增大而减小,整体呈递减趋势。当观测角度在  $90^\circ \sim 105^\circ$  附近时,偏振度随太阳天顶角增大先减小后增大再减小,偏振度最大值出现在太阳天顶角  $50^\circ$  附近。

对于观测方位角为  $180^\circ$  的情形,可看出当观测角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时,偏振度随太阳天顶角增大而增大,整体呈现单调递增趋势。当观测角度为  $15^\circ \sim 75^\circ$  时,偏振度随太阳天顶角增大而先增大后减小,且极值所对应的太阳天顶角随观测角度的增大逐渐减小。当观测角度大于  $90^\circ$  时,偏振度随太阳天顶角变化并无明显规律。

#### 2.4 典型太阳天顶角不同波长情况

图 21~23 给出了太阳天顶角为  $15^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $75^\circ$  时,不同观测高度和波长情况下偏振度随观测角度的变化情况,其中图 21~23 第一列代表观测方位角为  $0^\circ$ ,第二列代表观测方位角为  $180^\circ$  时的结果。





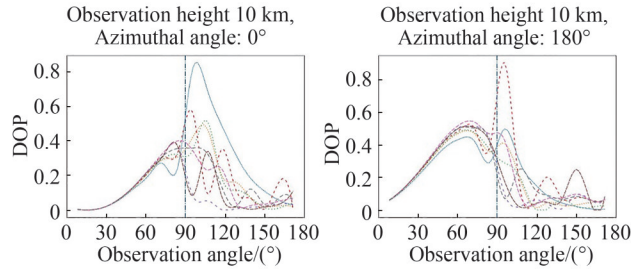


图 21 太阳天顶角为 15° 时不同波长下偏振度随观测角度的变化

Fig. 21 Variation of polarization with observation angle at different wavelengths for a solar zenith angle of 15°

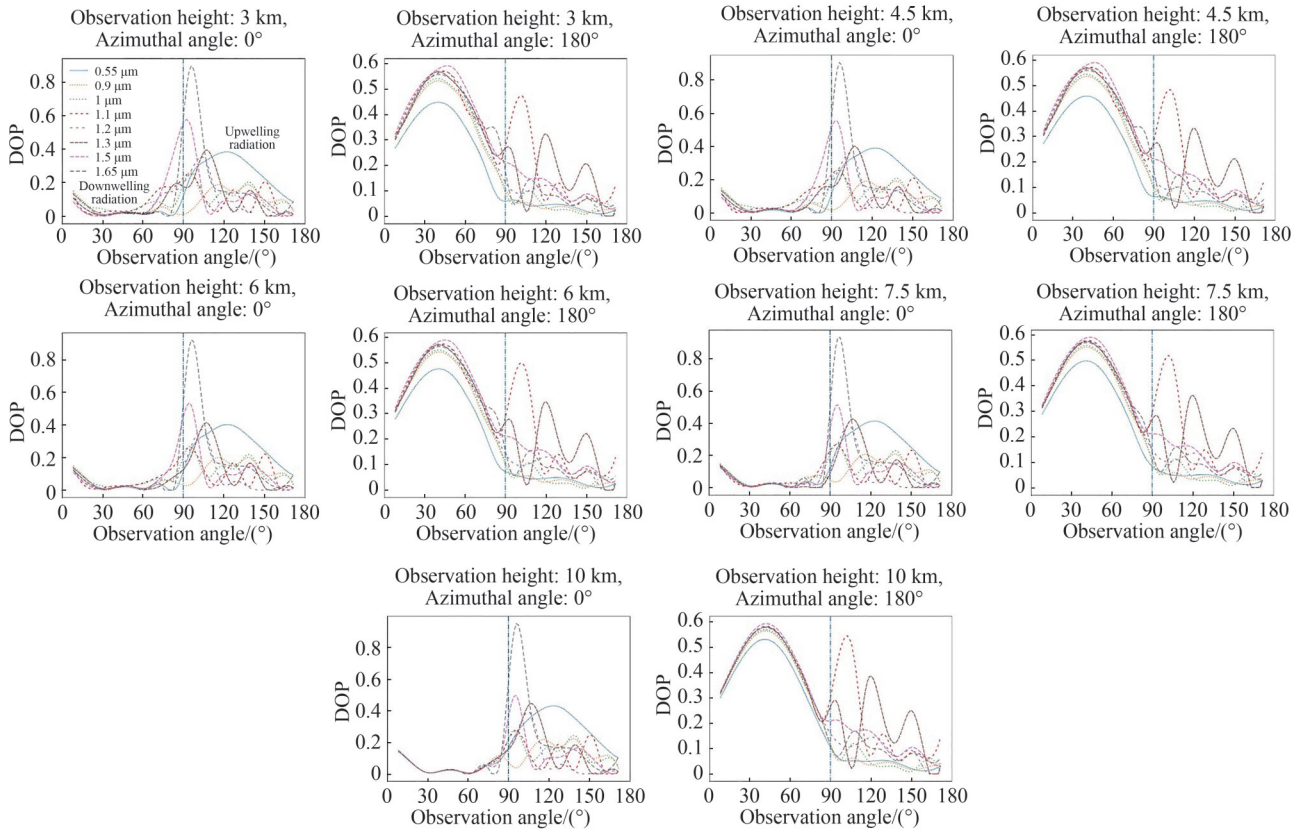
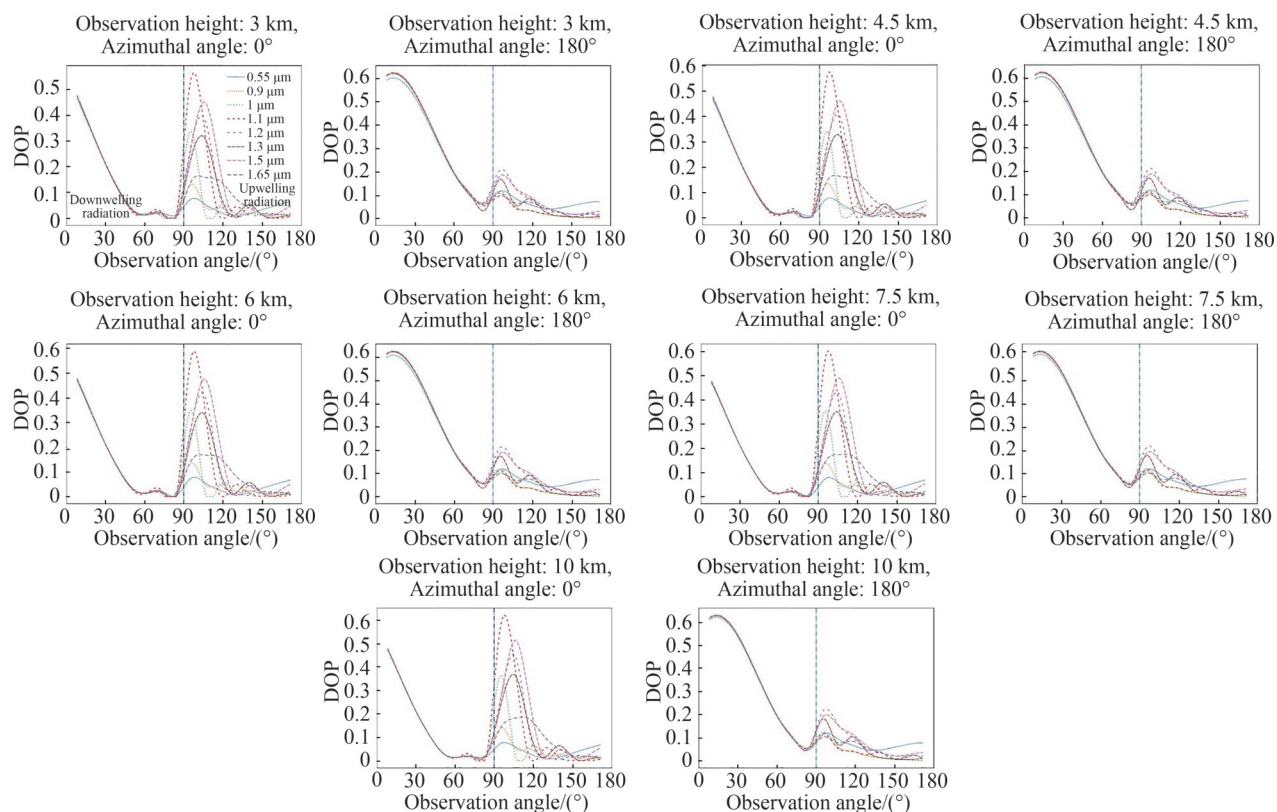


图 22 太阳天顶角为 45° 时不同波长下偏振度随观测角度的变化

Fig. 22 Variation of polarization with observation angle at different wavelengths for a solar zenith angle of 45°

从图中可以看出对于给定的观测高度和太阳天顶角,当观测下行辐射时,偏振度和波长一定程度上呈正比关系,其中波长为 0.55  $\mu\text{m}$  时偏振度取得最小值,1.5  $\mu\text{m}$  时偏振度取得最大值,这是由于直接太阳辐射随波长的变化导致的,如表 1 所示。除此之外,还可以看出当波长为 1.1  $\mu\text{m}$ ~1.3  $\mu\text{m}$  时,固定观测角度偏振度随波长并无明显关系,这可能是由于该波段范围内直接太阳辐射的变化和计算误差导致的。对于给定的观测高度,当观测下行辐射时,低太阳天顶角时不同波长的偏振度差异较大,当太阳天顶角等于 75° 时,可以看出波长对偏振度的影响微乎其微。对于给定的观测高度,当观测上行辐射时,不同太阳天顶角情况下偏振度与波长并无明显联系,这可能是由于短波红外波段后向散射的相矩阵元素变化剧烈且与波长并无明显关系导致的。

图 23 太阳天顶角为  $75^\circ$  时不同波长下偏振度随观测角度的变化Fig. 23 Variation of polarization with observation angle at different wavelengths for a solar zenith angle of  $75^\circ$ 

### 3 结论

本文构建了天空偏振分布模型,着重研究了星光成像过程中天空背景辐射以及偏振特性分布的变化情况。基于激光雷达实测数据和大气温度参数廓线,计算得到了典型地区整层大气粒子的分布特性及散射特性,结合大气矢量辐射传输模型,分析了星敏感器位于不同观测高度和观测波长情况下天空背景 Stokes 分量(包括天空背景辐亮度、 $Q$ 分量和  $U$ 分量)分布情况。与此同时,本文研究了天空背景在近红外波段的偏振特性,获得了不同大气条件及观测条件下的天空偏振分布情况,分析了观测与太阳位置对不同波长天空背景偏振分布的影响。研究发现:随着观测高度和观测波长的增加,天空背景辐亮度值以及偏振度整体呈现逐渐减小和逐渐增大的趋势。当观测波长等于  $1.5 \mu\text{m}$  时,由于此时太阳辐射通量密度最小,天空偏振度呈现最大值,此时采用偏振滤波技术提升恒星观测的概率和数目效果最佳。当观测角度等于太阳天顶角时,天空背景噪声最大,此时采用偏振滤波进行星光成像,效果最差。当观测方位角一定时,此时星敏感器选取合适的观测角度可以保证在较低太阳高度时能使用偏振滤波技术降低天空背景辐射对星光成像的影响。

#### 参考文献

- [1] DING Mu. Research on the application of star sensor based on spectral polarization technique for airborne platform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.  
丁木. 基于光谱偏振技术的空基平台星敏感器应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] HE Jiawei. Study on the key technologies for high-accuracy and all-time star sensor [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2013.  
何家维. 高精度全天时星敏感器关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- [3] HAN Li. Research on dim star signal extraction and star tracking algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.  
韩礼. 微弱恒星信号提取与星跟踪识别技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

- [4] DRAVINS D, LINDEGREN L, MEZEY E, et al. Atmospheric intensity scintillation of stars, I. statistical distributions and temporal properties[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1997, 109(732): 173.
- [5] ELLISON M A, SEDDON H. Some experiments on the scintillation of stars and planets[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1952, 112(1): 73-87.
- [6] BRIGGS B H, PARKIN I A. On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1963, 25(6): 339-366.
- [7] BUTLER H E. Observations of stellar scintillation[C]. Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences. Royal Irish Academy, 1951, 54: 321-340.
- [8] STECKLUM B. Measurements of stellar scintillation using photon counting statistics[J]. Astronomische Nachrichten, 1985, 306(3): 145-156.
- [9] BURKE J J. Observations of the wavelength dependence of stellar scintillation [J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(9): 1262-1264.
- [10] FUENTES F J, FUENSALIDA J J, SANCHEZ-MAGRO C. Measurements of the near-infrared stellar scintillation above the Observatorio del Teide (Tenerife)[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1987, 226(4): 769-783.
- [11] ZHU Qixiang, XIE Qian. Improving the detection capability of CCD for faint sky targets using spectral filtering technology [J]. Spacecraft Recovery and Telecommunications, 1989(1): 17-24.  
朱耆祥, 谢谦. 利用光谱滤波技术提高 CCD 对天空微弱目标的探测能力[J]. 飞行器测控技术, 1989(1): 17-24.
- [12] XU Weian. Application of spectral filtering device in daytime star measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 1996(4): 84-88.  
徐维安. 光谱滤波装置在白天测星中的应用[J]. 光学精密工程, 1996(4): 84-88.
- [13] SUN Xiaobing, HONG Jin, LUO Donggen, et al. Daytime astronomical spectral polarization imaging technology and experimental research[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6):5.  
孙晓兵, 洪津, 骆冬根, 等. 白天天体光谱偏振成像技术及实验研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6):5.
- [14] YE Song, FANG Yonghua, SUN Xiaobing, et al. A daytime observation method for stars based on polarization information[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(3):5.  
叶松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 一种基于偏振信息的恒星白天观测方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3):5.
- [15] ZHANG Ruijin, XIAN Hao, RAO Changhui, et al. Analysis of daytime skyglow background suppression using polarization filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501003.  
张锐进, 鲜浩, 饶长辉, 等. 偏振滤波白天抑制天光背景作用分析[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0501003.
- [16] UNITED STATES. National oceanic, atmospheric administration, united states. Air Force. US standard atmosphere, 1976[M]. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1976.
- [17] WANG Wei, CHU Jinkui, CUI Yan, et al. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. Chinese Journal of 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.
- [18] ZHANG Su, ZHAN Juntong, FU Qiang, et al. Simulation research on sky polarization characteristics under complicated marine environment[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2201001.  
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2201001.
- [19] HANEL G. The physical chemistry of atmospheric particles[J]. Hygroscopic Aerosol, 1984: 1-20.
- [20] JUNGE C E. Atmospheric chemistry[M]. Advances in geophysics. Elsevier, 1958, 4: 1-108.
- [21] CHEN Xiuhong, WEI Heli, LI Xuebin, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 183-189.  
陈秀红, 魏合理, 李学彬, 等. 可见光到远红外波段气溶胶衰减计算模式[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 183-189.
- [22] LIOU K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. Elsevier, 2002.
- [23] DUNTLEY S Q. The reduction of apparent contrast by the atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America, 1948, 38(2): 179-191.
- [24] EVANS K F, STEPHENS G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1991, 46(5): 413-423.
- [25] WENDISCH M, YANG P. Theory of atmospheric radiative transfer: a comprehensive introduction[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [26] RAO Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Science Press, 2012.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 科学出版社, 2012.
- [27] Reference Air Mass 1.5 Spectra[EB/OL].<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.

## Atmospheric Effects of Star Imaging (I): Sky Polarization

TAO Zhiwei<sup>1,2,3</sup>, DAI Congming<sup>1,3</sup>, WU Pengfei<sup>1,3</sup>, REN Yichong<sup>4</sup>, MEI Haiping<sup>1,3</sup>,  
XU Wenqing<sup>1,3</sup>, XU Gang<sup>1,3</sup>, TONG Jie<sup>1,3,5</sup>, FENG Yunsong<sup>2</sup>,  
RAO Ruizhong<sup>1,3</sup>, WEI Heli<sup>1,3</sup>

(1 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, Electronic Countermeasure College, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

(3 Advanced Laser Technology Anhui Laboratory, Hefei 230037, China)

(4 School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

(5 Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The rapid development of aerospace technology, such as GPS satellite navigation system, represented by high precision and sensitivity, is gradually gaining wide attention from researchers and replacing traditional radio navigation systems, playing an important role in military defense, space exploration, engineering surveying, air-to-air combat and other fields. However, due to the limitations of traditional electromagnetic theory, satellite navigation technology has relatively weak anti-electronic deception and electromagnetic jamming capabilities. In order to enhance the autonomy and reliability of the navigation system, a passive and strong counter-jamming navigation method, which is named as starlight navigation, has been proposed. In the 1950 s, the advent of star sensors has greatly improved the accuracy of starlight navigation. Star sensors are high-precision attitude-sensitive measuring instruments that measure the star vector component in the star sensor coordinate system by conducting the stellar observation, and determine the three-axis attitude of the carrier relative to the inertial coordinate system using known precise star positions. The high accuracy, strong counter-jamming ability, and independence from other systems of star sensor navigation technology have a wide range of applications and important military value on various airborne, shipborne, and vehicle-mounted platforms in near-earth space. However, as the development of observation platforms and the decrease in the observation height of star sensors in the atmosphere, a star sensor operating in the terrestrial space will inevitably be affected by sky background radiation, atmospheric turbulence, and atmospheric refraction during the observation. This three-part paper aims to extensively reveal these atmospheric effects on stellar observation. In Part I, we investigate how to reduce the effect of sky background radiation on star imaging by using polarization filtering technique. Based on the LIDAR measured data, we calculate the distribution and scattering characteristics of the entire atmospheric particles in typical regions. Concretely, we stratify the entire atmosphere based on specific calculation needs, taking into account the aerosol extinction profile, atmospheric density, and weather conditions of typical regions. We then calculate the aerosol particle number density, extinction coefficient, and scattering phase matrix, using the near-surface visibility, complex refractive index, and distribution type of aerosol particles, in conjunction with the Mie scattering theory. By combining the preprocessing data of atmospheric particles with the vector radiation transfer model, we employ the doubling and adding method and set the fixed parameters in this calculation model to study the polarization characteristics of the sky background in the near infrared band and obtain the polarization distributions of the sky background under different atmospheric and observation conditions. Furthermore, we analyze the effects of observation and solar position on the polarization distribution of the sky background under different values of wavelength. We show that using near-infrared light with a large value of wavelength and located in the absorption band for observation or increasing the observation altitude of the star sensor can suppress the sky background light to some extent by using polarization filtering technique. Other than that, we find that when the observing azimuth angle is certain, choosing a suitable observing angle can ensure the possibility of using polarization filtering technique at lower solar altitude to reduce the effect of sky background radiation on the star imaging. This research sheds light on the atmospheric effects on star imaging and provides insights into how polarization filtering technique can be used to reduce the impact of sky background radiation on stellar observation. Moreover, this study's findings have significant implications for the development of more effective and reliable star sensor

navigation technology.

**Key words:** Star sensor; Star imaging; Background radiation; Polarization distribution; Polarization filtering technique

**OCIS Codes:** 010.5620; 260.5430; 280.1310; 290.5855; 290.1310

---

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFA0706004), HFIPS Director's Foundation (No. YZJJ2023QN05), Open Fund of Infrared and Low Temperature Plasma Key Laboratory of Anhui Province, NUDT (No. IRKL2023KF05), National Key Basic Research and Development Program (No. 2020-JCJQ-ZD-136-11)