

# 基于矢量辐射传输的大气偏振建模

王 威 褚金奎 崔 岩 支 炜 陈 辰

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 研究了大气辐射传输过程中获得的实际天空偏振分布模式。利用简化的双层大气模式模拟实际大气,以基于倍加-累加法的矢量辐射传输模式(RT3)为基础求解矢量辐射传输方程,得到全天空离散点处光波的 Stokes 参量,进而计算天空对应点处光波的偏振信息,建立基于 RT3 的大气偏振模型,并与传统 Rayleigh 散射理论模型进行了对比分析。结果表明,晴天、多云、阴霾天空的偏振度依次降低,并且随着波长的增大,偏振度下降明显。基于 RT3 的大气偏振模型不仅与传统 Rayleigh 散射理论模型一致,而且能够反映不同天气、不同波长以及不同地表反射率对天空偏振的影响规律,利于实际大气下的偏振光测试与应用。

**关键词** 大气光学;大气偏振模式;倍加-累加法矢量辐射传输模式;散射光

**中图分类号** O436.3;P401 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0513001

## Modeling of Atmospheric Polarization Pattern Based on Vector Radiative Transfer

Wang Wei Chu Jinkui Cui Yan Zhi Wei Chen Chen

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** Atmospheric radiative transfer is investigated to obtain the actual skylight polarization pattern. The simplified double-layer atmospheric model is used to simulate actual atmosphere. The vector radiative transfer equation (VRTE) is solved by means of polarized radiative transfer based on the adding-doubling method (RT3) to get the Stokes parameters of light wave in the discrete points of the sky. Then the skylight polarization information is calculated according to the solution of VRTE. The skylight polarization pattern based on RT3 is built and compared with Rayleigh scattering theory model. The results show that, at the weather conditions of clear sky, cloudy sky and thick cloudy, the degree of polarization (DOP) is gradually reduced, especially for the long wavelength. Simulation results are in good agreement with the traditional Rayleigh scattering theory model. It can also reveal the impact of different weathers, different wavelengths and different albedos on skylight polarization. Therefore it is conducive for the measurement and application of polarized light in actual atmosphere.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric polarization pattern; vector radiative transfer mode of adding-doubling method; scattering light

**OCIS codes** 010.1290; 290.5855; 030.5620; 260.5430

## 1 引 言

偏振是天空散射光的重要特性之一,太阳辐射在进入地球大气之前是非偏振的自然光,经过大气分子和气溶胶的散射后成为部分偏振光,来自四周的偏振光形成了大气偏振模式<sup>[1]</sup>。大气偏振分布规

律在偏振导航、智能信息获取、大气光学分析、偏振遥感探测等诸多领域中都具有重要意义。

自从 Arago 在 1809 年首次发现了天空散射光的偏振现象以来,国内外很多学者都对大气偏振进行了深入研究<sup>[2~8]</sup>。这些研究表明当太阳位置一定时,在

**收稿日期**: 2012-11-23; **收到修改稿日期**: 2013-01-05

**基金项目**: 国家 973 计划(2011CB302101,2011CB302105)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT10ZD104)资助课题。

**作者简介**: 王 威(1986—),男,硕士研究生,主要从事天空偏振测试技术及仪器等方面的研究。

E-mail: weiwangtianxia1111@163.com

**导师简介**: 褚金奎(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事智能机器人、仿生偏振导航传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

不同天气下具有较为稳定的天空散射光偏振分布模式。1870年 Rayleigh 创立了 Rayleigh 散射理论,该理论的创建验证了自然光在传播过程中受空气分子的散射作用,会改变本身的偏振特性,形成拥有不同偏振态的偏振光,奠定了偏振光学的物理学基础。随后人们从 Rayleigh 散射定律中得到启发,构建出了大气偏振的 Rayleigh 散射理论模型<sup>[9]</sup>,获得了晴朗天空下的大气偏振光的分布规律。此后国内外相继出现了各种天空偏振辐射测试系统,从而验证晴朗天气下 Rayleigh 散射模型的正确性<sup>[10]</sup>。1908年 Mie<sup>[11]</sup>给出了均匀介质球形粒子在单色平面电磁波照射下散射问题的精确解,即 Mie 散射理论。虽然 Mie 散射理论更加接近于实际大气散射过程,但是由于其复杂性,并未广泛应用,人们也没有据此建立能应用于不同天气情况的实际大气偏振模型。国内有关大气偏振相关研究起步虽晚,但发展较快。大连理工大学的褚金奎团队,在开展仿生偏振光导航研究时,提出在传统 Rayleigh 散射模型的基础上,加入太阳位置实时计算模块,以修正实时监测到的天空偏振数据,从而获得了动态的理想大气偏振模型<sup>[4,9,12]</sup>。

基于 Rayleigh 散射的大气偏振模型可以很好地解释晴朗天气条件下的大气偏振现象,但是由于没有从辐射传输过程分析散射成因,没有考虑到气溶胶和地表对大气偏振的影响,所以模型本身是不够准确的。为了获得更精确的偏振信息以及减小大

气偏振应用误差,建立了基于倍加-累加法的矢量辐射传输模式(RT3)的高精度实际大气偏振模式,该模式能够计算在一定的大气环境、地表情况、云和气溶胶状况以及给定测试参数条件下,天空中某个方向上光波的 Stokes 参量,并据此计算相关偏振信息,为实际天气情况下进行偏振测试提供理论基础。

## 2 基于倍加-累加法的矢量辐射传输模式

辐射传输方程是描述电磁波在介质中传播及其再分配方式的基本方程,它分为标量辐射传输方程和矢量辐射传输方程。考虑散射光偏振时,要采用矢量辐射传输方程并选取合适的求解方法。RT3 是基于倍加-累加法原理求解矢量辐射传输方程的一种数值模式。

### 2.1 矢量辐射传输方程

辐射是电磁波的一种表现形式,辐射及其偏振状态的完整描述可以用 Stokes 参数表示,即用  $\mathbf{I} = [I, Q, U, V]^T$  来描述<sup>[13]</sup>,其中  $I$  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。电磁波在平面平行大气中传播的矢量辐射传输方程可以表示为<sup>[14]</sup>

$$\mu \frac{d\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = -\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi) + \mathbf{J}(\tau, \mu, \phi), \quad (1)$$

式中函数  $\mathbf{J}(\tau, \mu, \phi)$  可以表示为

$$\mathbf{J}(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') \mathbf{I}(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' + \frac{\omega}{4\pi} \mathbf{F}_0 \exp(-\tau/\mu_0) \mathbf{M}(\tau, \mu, \phi; -\mu_0, \phi_0), \quad (2)$$

式中  $\mu$  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, $\mathbf{F}_0 = [F_0, 0, 0, 0]^T$  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, $\mathbf{M}$  为  $4 \times 4$  阶散射相矩阵,又称 Mueller 矩阵。(2)式中右边第一项为多次散射的贡献项,第二项为来自上一层边界入射辐射造成的单次散射的贡献项。

方程中的 Mueller 矩阵  $\mathbf{M}$  是由单次散射相矩阵  $\mathbf{P}$  经参考平面旋转变换后得到的。一般对于球形对称的随机取向散射粒子而言,散射相矩阵  $\mathbf{P}$  可以写为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 \\ y_1 & x_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_3 & y_2 \\ 0 & 0 & -y_2 & x_4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

那么 Mueller 矩阵转换公式可表示为<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{M} = \mathbf{L}(\pi - i_2) \times \mathbf{P} \times \mathbf{L}(-i_1), \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2i & \sin 2i & 0 \\ 0 & -\sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

矢量辐射传输方程(1)式是一个高度非线性微积分方程,一般情况下必须进行数值求解。求解过程中,一般首先要对辐射传输方程离散化。基于不同的求解方法,派生出不同的矢量辐射传输模式。

### 2.2 倍加-累加法原理

倍加-累加法是求解矢量辐射传输方程的一种数值解法。它适用于平面平行、垂直不均匀散射大气的偏振辐射传输方程的计算。其基本思路很直

观<sup>[16]</sup>：如果两个介质层的反射和透射性质是已知的，那么它们组合层的反射和透射性质可以通过简单的累加方式得到，依此类推就可计算出整层大气的反射矩阵和透射矩阵，并将边界作为一层来处理，从而可以求得整层大气的辐射性质。

在倍加-累加法中，对于一个厚的均匀层，可以将其划分为  $2^n$  个完全相同的薄层，通过倍加法计算可以非常迅速地获得其反射和透射性质。倍加法用来求均匀层间的反射透射矩阵，而非均匀层之间采用累加法。在 RT3 模式中，用傅里叶级数对方位角进行展开、对天顶角进行离散化。利用倍加-累加法计算大气层的多次散射，不仅数值稳定，也容易理解<sup>[17]</sup>。

### 3 基于 RT3 的大气偏振建模

求解矢量辐射传输方程，建立实际的大气偏振模型，首先要设置较为合理的大气模式和气溶胶模型，选取合适的地表类型、空间几何参数(太阳位置、观测点位置)以及波长范围等，其中大气模式与气溶胶模型是影响辐射传输计算精度的重要因素。基于

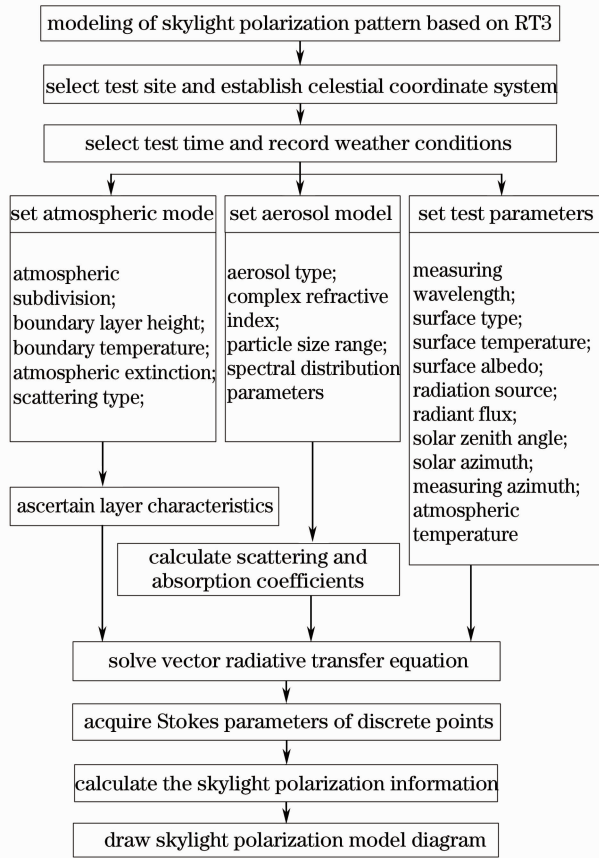


图 1 基于 RT3 的大气偏振建模流程图

Fig.1 Flowchart of building atmospheric polarization pattern based on RT3

RT3 的实际大气偏振建模流程如图 1 所示。

#### 3.1 大气模式

按照美国标准大气模式，根据大气气溶胶的分布、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<sup>[18]</sup>。对流层占大气 82.2%~92.5%，并且对流层是辐射发生散射、产生偏振的主要层。对流层又可以分为上、中、下三层。其中上层平均分布在 5~15 km，这一层水汽含量极少，主要发生的是 Rayleigh 散射；中层平均分布在 2~5 km，是云雨雷电层，一般发生的是 Mie 散射；下层平均分布在 0~2 km，它受地表的影响比较大，尤其是地面反照率。为了降低计算难度，忽略下层的影响，把对流层分为两层，即 0~5 km 的风雨层和 5~15 km 的 Rayleigh 散射层。基于美国标准大气模式的简化双层大气模式如图 2 所示。

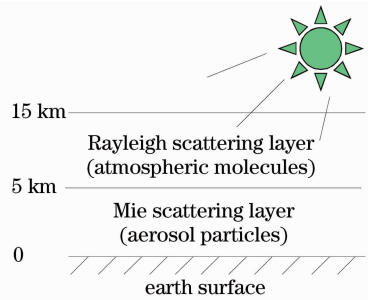


图 2 简化双层大气模式

Fig.2 Simplified double-layer atmospheric model

#### 3.2 气溶胶模型及其参数化

大气气溶胶的粒径范围一般在几纳米到几十个纳米之间，由于粒径大于  $1 \mu\text{m}$  的气溶胶浓度非常小，为简化计算，模型选取的气溶胶粒径范围为  $0.001 \sim 1 \mu\text{m}$ 。气溶胶粒子的物理特性(如粒子数分数和谱分布)，以及化学光学特性(如复折射率)，要进行精确的取值是不可能的，一般采用参数化的方法进行选取。

气溶胶粒度谱分布有几种分布模式，选用修正的伽马分布，它是 1969 年由 Deirmendjian<sup>[19]</sup> 提出来的表示环境气溶胶谱分布的一种数学函数：

$$N(d) = a \cdot d^\alpha \cdot \exp(-b \cdot d^\gamma), \quad (6)$$

式中  $a, b, \alpha, \gamma$  是四个参数，由这四个参数即可确定粒子浓度随尺度的变化情况。根据测量经验，晴天、多云、阴霾天空下，气溶胶谱分布参数可以按照表 1 设定。

表 1 不同天气条件下气溶胶伽马分布参数  
Table 1 Aerosol gamma distribution parameters under different weather conditions

Weather condition	$a$	$b$	$\alpha$	$\gamma$
Clear sky	0.1	1.2	5.1	1
Cloudy sky	0.3	0.8	4.5	1
Thick cloudy	2.3	0.65	4.1	1

气溶胶粒子的复折射指数是描述电磁辐射与物质相互作用的参数,它由实部和虚部构成,它决定了构成气溶胶粒子的化学组成,是影响偏振的重要因素<sup>[20,21]</sup>。1983年国际气象与大气物理协会提出了大气气溶胶的标准模型(SPA),它按成分将大气气溶胶分为六种<sup>[16]</sup>:1)水溶性粒子;2)沙尘型粒子;3)海洋型粒子;4)煤烟;5)火山灰;6)质量分数为75%的硫酸液滴。不同化学组成的气溶胶折射指数差别很大,反映了不同种类气溶胶对太阳辐射不同的吸收和散射特性。为计算和研究方便,通过系统的观测实验,在同时考虑气溶胶组成和取样区域两个前提下,石广玉<sup>[16]</sup>给出了典型气溶胶随波长变化的折射指数模型,可以据此进行取值。

## 4 大气偏振仿真结果与分析

### 4.1 基于 RT3 的 Rayleigh 散射天空偏振建模

为了验证本文建模方法的可行性与准确性,首先对 Rayleigh 散射大气进行基于 RT3 的偏振建模。采用美国标准大气模式,假设大气比较纯净,即简化双层大气的成分均是空气分子,那么此时大气发生的是 Rayleigh 散射。

测试参数条件:只考虑太阳辐射,太阳天顶角为  $60^\circ$ ,太阳方位角为  $0^\circ$ ,太阳直接光通量为  $3.14 \text{ W/m}^2$ ,流数为 8,地表类型为朗伯地表,地表反照率为 0,地表温度为 300 K,大气层顶温度为 210 K。标准状态下,不同波长大气分子的散射系数可以按照下式计算:

$$K = 1.0563 \times 10^{-6} \times \lambda^{-4}. \quad (7)$$

分别选取波长为 450、550、700 nm,按照本文大气偏振建模方法进行仿真计算,最后采用自主编写的偏振模型显示软件,对波长 450nm 的计算结果进行图像显示,如图 3 所示。

图 3 中,红圆点表示太阳,短黑线的粗细表示该位置光波的偏振程度,短黑线的方向表示偏振的方向。太阳子午线上,偏振方位角为  $90^\circ$ ,其他位置偏振方向与对应的以太阳为圆心的圆相切,并且天空中最大的偏振发生在与太阳入射方向  $90^\circ$  夹角的位置处。

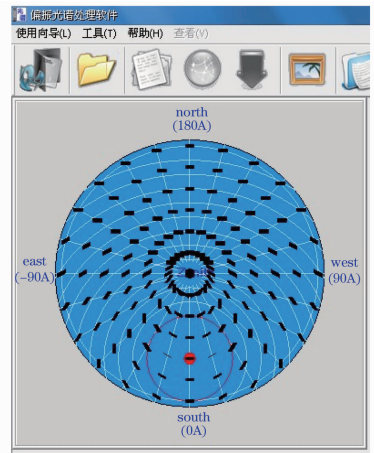


图 3 基于 RT3 的 Rayleigh 散射天空偏振分布  
Fig. 3 Polarization distribution of the sky based on RT3 of Rayleigh scattering

根据传统 Rayleigh 散射理论建模方法,利用 OpenGL 三维图形软件包和 Visual C++ 绘制的天空偏振模型如图 4 所示<sup>[9]</sup>。其中,散射角  $90^\circ$  时偏振最大,用间隙更密的粗虚线表示。

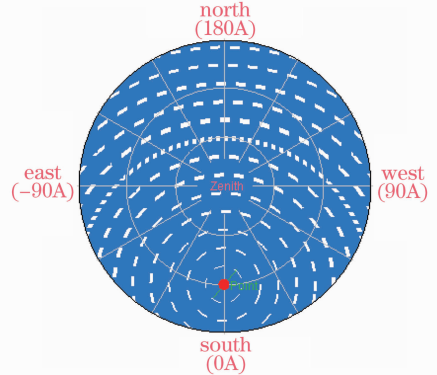


图 4 Rayleigh 散射天空理论模型

Fig. 4 Theoretical model of Rayleigh scattering sky

很明显,在 Rayleigh 散射大气下,基于 RT3 的天空偏振分布与传统理论模型基本吻合,不同的是前者还可以研究不同波长对大气偏振的影响规律。太阳子午线上不同波长对应的偏振度(DOP,  $D_{OP}$ )随测量高度角  $\theta$  的变化如图 5 所示。其中,S 代表太阳点,太阳高度角为  $30^\circ$ ,A 代表 Argeo 中性点,其高度角为  $150^\circ$ ,高度角  $\theta$  为  $120^\circ$  时对应的散射角为  $90^\circ$ 。由图 5 可以看出,在太阳点处偏振度最小,在散射角为  $90^\circ$  时偏振度取得最大值,在中性点 A 附近偏振度较小。三个波长对应 DOP 的分布范围分别是  $0.29 \sim 0.46$  (450 nm)、 $0.36 \sim 0.49$  (550 nm)、 $0.40 \sim 0.50$  (700 nm)。因此, Rayleigh 散射情况下,波长越长,偏振度越大,越有利于天空偏振测试。一般情况下, Rayleigh 散射主要发生在非常晴朗的天气

情况,而多云、阴霾等天气则主要发生 Mie 散射。

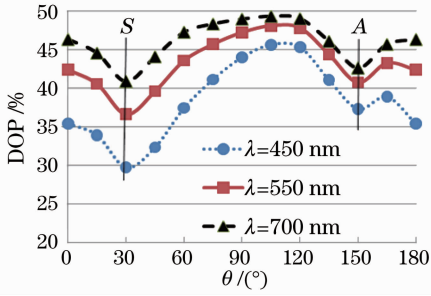


图 5 偏振度与测量高度角的变化关系

Fig. 5 Relationship between DOP and measurement elevating angle

#### 4.2 基于 RT3 的实际大气偏振建模

为了在实际大气下进行偏振导航,必须对实际大气下的天空偏振模式进行研究。实际大气成分比较复杂,既有 Rayleigh 散射,也有 Mie 散射。一般地,大气上层主要成分是空气分子,发生的是 Rayleigh 散射;而大气下层,尤其是接近地表层,往往包含各种云、气溶胶等粒子,发生的是 Mie 散射。下面对不同天气情况下的天空偏振进行仿真分析。

测试参数条件不变,采用图 2 所示的简化双层

大气模式模拟实际大气,上层为大气分子层,下层为气溶胶层。假定气溶胶类型为沙尘型气溶胶,其折射指数为  $1.53-0.008i$ ,不同天气下气溶胶的伽马分布参数按照表 1 选取,分别针对波长 450、550、700 nm 按照文中构建的方法进行大气偏振建模。

三种波长、三种天气下,太阳子午线内的 DOP 随测量高度角  $\theta$  的变化规律如图 6 所示。从图 6 中可以清晰地看出,对于不同天气、不同波长,偏振度均是在太阳点和 A 中性点处较小,且散射角为  $90^\circ$  时最大,这些偏振分布规律与理论模型一致。图 6 (a),(b)与(c)分别给出了同一波长在不同天气下偏振度随观测高度角的变化规律。对于选定的三种波长,均是晴天 DOP 最大、多云 DOP 次之、阴霾 DOP 最小,即随着天气情况变坏,DOP 逐渐减小。对于三种波长,DOP 随天气变化的下降量  $\Delta D_{OP}$  如图 7 所示。 $\Delta D_{OP}$  的变化范围分别为  $0.013 \sim 0.07$  (450 nm)、 $0.016 \sim 0.094$  (550 nm)、 $0.034 \sim 0.11$  (700 nm)。随着波长的增大,三种天气对应 DOP 的下降趋势越来越明显。因此波长越长,天气情况越恶劣,DOP 越小,越不利于偏振光检测。图 6 (d),

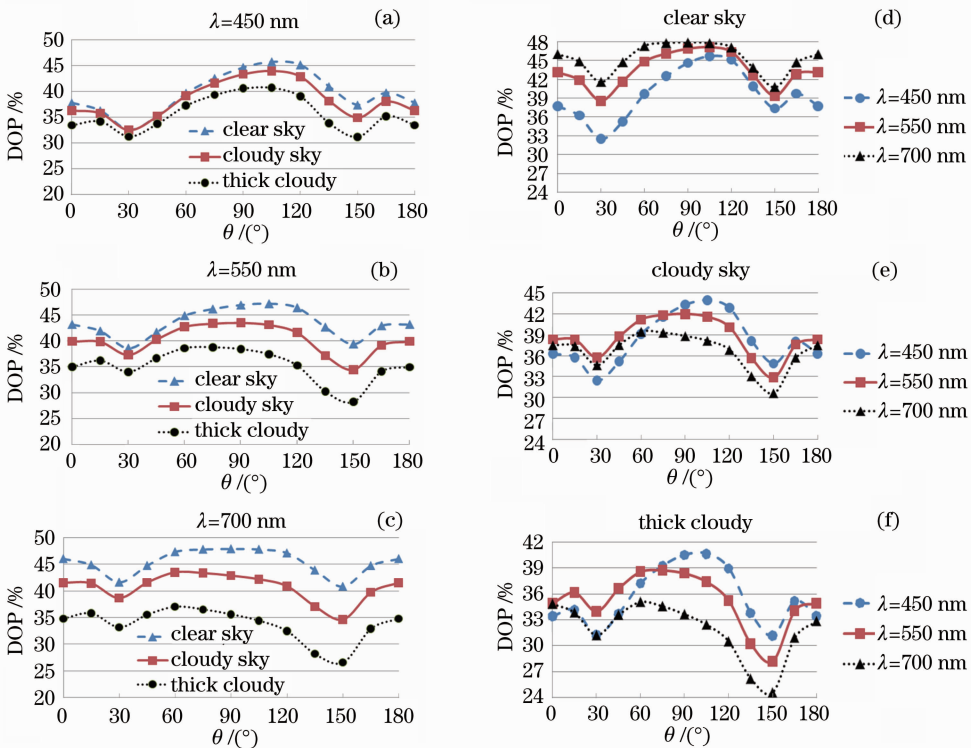


图 6 不同条件下 DOP 与观测高度角的关系。(a),(b),(c)分别为同一波长不同天气下的仿真结果;

(d),(e),(f)分别为同一天气不同波长的仿真结果

Fig. 6 Relationship between DOP and measurement elevating angle under different conditions. (a), (b) and (c) are the simulation results at the same wavelength but different weathers; (d), (e) and (f) are the simulation results at the same weather but different wavelengths

(e)与(f)分别给出了同一天气情况在不同波长下DOP随观测高度角的变化规律。对于晴天、多云和阴霾天空,DOP随波长的变化规律并不一致。其中晴朗天空DOP随波长的增大而增大[见图6(d)];多云天空DOP随波长的增大开始变得凌乱,略显下降趋势[见图6(e)];阴霾天空,DOP随波长的增大而明显减小[见图6(f)]。综上,对于晴朗无云天空,波长越长,DOP越大,越利于偏振光测试;而多云、阴霾等恶劣天气,短波段对应DOP较大,更有利于偏振测试与应用。由此验证了在多云、阴霾等天气下,短波段更利于偏振导航的特性<sup>[6,22]</sup>。

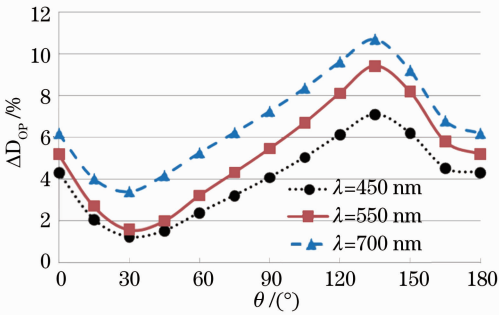


图7 不同波长下DOP随天气变化的下降量  
Fig. 7 Reduction of DOP as the weather changes at different wavelengths

为了研究地表反照率 $\rho$ 对天空偏振的影响,取反照率0,0.2,0.4,0.6,0.8,并分别进行仿真。不同地表反照率时,DOP随观测高度角的变化关系如图8所示。明显随着地表反照率的增大,DOP分布曲线规律基本不变,但DOP逐渐减小。即地表反照率越大,DOP越小,越不利于偏振测试研究与应用。

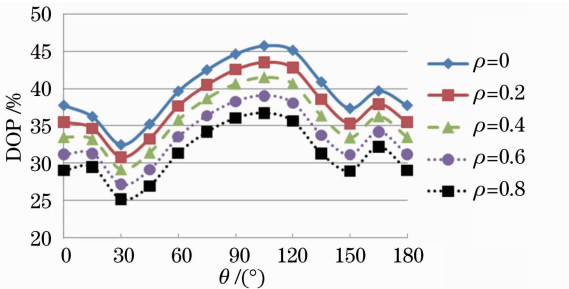


图8 不同反照率对应偏振度与测量高度角的变化关系  
Fig. 8 Relationship between DOP and measurement elevating angle under different albedos

## 5 结 论

从RT3出发,对设定的大气环境、地面情况、云和气溶胶状况以及给定观测条件,仿真计算了天空离散点处光波的Stokes参量,并据此获得了相关偏

振信息。基于此方法,根据简化大气模式和气溶胶模型,最终建立了模拟实际大气情况下的天空偏振模型。相比于传统Rayleigh散射理论模型,该建模方法有以下优点:

1) 能够研究不同波长、不同天气情况以及不同地表反照率对天空偏振分布的影响规律。仿真结果表明,晴朗大气下,DOP随波长的增大而增大;多云、阴霾等恶劣天气,DOP随波长的增大呈下降趋势,且波长越长,DOP下降越多;随着地表反照率的增大,DOP逐渐减小。因此晴朗天气下选用长波长,多云、阴霾天气下选用短波长,对应的DOP大,利于偏振光检测和应用。

2) 能够研究不同气溶胶分布对天空偏振的影响。

3) 简化大气模式比传统Rayleigh散射大气更加接近于实际天空大气成分,所得天空偏振模型也更接近于实际天空偏振模型,有利于研究实际大气情况下的天空偏振。

由于不同地区的大气模式与气溶胶模型是由大量测试实验确定的,所以为了得到更加接近所在地实际大气的偏振模型,还需要进行更多的测试实验,从而获得对应的修正模型,为在各种天气情况下应用天空偏振光奠定基础。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering measurements[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(1): 111~115  
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1): 111~115
- 2 G. S. Smith. The polarization of skylight: an example from nature[J]. *American J. Physics*, 2007, **75**(1): 25~35
- 3 X. Cheng, X. Z. Wang. Numerical study on the wavelength-dependent polarization of light scattered by aqueous droplets for RGB spectrums[J]. *Optik*, 2010, **121**(11): 974~979
- 4 Cao Nannan. Research on Polarized Characteristics of Scattering Skylight for the Bionic Navigation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008  
曹楠楠. 应用于仿生导航的天空散射光的偏振特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008
- 5 H. Ramon, A. Susanne, H. Gabor. Polarization patterns of thick clouds; overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(8): 2347~2356
- 6 Chu Jinkui, Wang Wei, Cui Yan *et al.*. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 520~526  
褚金奎, 王威, 崔岩等. 气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(3): 520~526
- 7 G. Horvath, A. Barta, J. Gal *et al.*. Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3):

- 8 Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3002~3006  
黄旭锋, 步 扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 9 Yao Hongyi. Research on the Skylight Polarization for the Bionic Micro-Nano Navigation System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006  
姚弘轶. 面向仿生微纳导航系统的天空偏振光研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006
- 10 Cui Yan, Cao Nannan, Chu Jinkui *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(6): 1431~435  
崔 岩, 曹楠楠, 褚金奎 等. 天空偏振光测量系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2009, **17**(6): 1431~1435
- 11 G. Mie. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions[J]. *Ann. Physics*, 1908, **25**(4): 377~445
- 12 Jinkui Chu, Kaichun Zhao, Qiang Zhang *et al.*. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors & Actuators A*, 2008, **148**(1): 75~82
- 13 Zhu Yingbin, Du Xinyue, Zhao Daomu. Generalized Stokes parameters for polarization properties of stochastic electromagnetic beams on propagation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2332~2336  
朱映彬, 杜新悦, 赵道木. 基于广义 Stokes 参量的随机电磁光束偏振态传输特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2332~2336
- 14 Duan Minzheng, Lü Daren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurements I. Theory and simulations [J]. *Chinese J. Atmospheric Science*, 2007, **31**(5): 757~765  
段民征, 吕达仁. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演 I. 理论与模拟[J]. 大气科学, 2007, **31**(5): 757~765
- 15 Gao Yang, Duan Minzheng, Huang Xingyou. Preliminary comparisons of the typical polarized radiative transfer models: precision and efficiency [J]. *J. Remote Sensing*, 2010, **14**(5): 839~851  
高 扬, 段民征, 黄兴友. 典型矢量辐射传输模式计算精度与效率的初步比较[J]. 遥感学报, 2010, **14**(5): 839~851
- 16 Shi Guangyu. Atmospheric Radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007. 154~157, 367~370  
石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社. 2007. 154~157, 367~370
- 17 K. F. Evans, G. L. Stephens. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1991, **46**(5): 413~423
- 18 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003. 48~60  
盛裴轩, 毛节泰, 李建国 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 48~60
- 19 D. Deirmendjian. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions [M]. New York: Elsevier Press, 1969. 75~77
- 20 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101002  
郝增周, 龚 芳, 潘德炉 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0101002
- 21 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501001  
孙学金, 李 浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气散射偏振度特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0501001
- 22 Guan Guixia, Yan Lei, Chen Jiabin *et al.*. Research on sky polarized light distribution [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(4): 459~463  
关桂霞, 晏 磊, 陈家斌 等. 天空偏振光分布的实验研究[J]. 兵工学报, 2011, **32**(4): 459~463

栏目编辑: 王晓琰