

基于 Monte Carlo 方法的混浊大气偏振模式 全天域建模

王子谦¹ 张旭东¹ 金海红^{1,2} 范之国^{1*}

(¹ 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)
(² 安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 大气偏振模式中包含了丰富的空间方位、地表特性以及大气层结构参数等信息,在偏振光导航、遥感探测等领域都具有重要的研究价值,但经典的理想大气偏振模式仿真模型同实际分布模式之间存在明显差异,不能准确表征混浊大气偏振模式的全局分布特性。因此,提出了一种混浊大气偏振模式的建模方法,该方法以三维天球大气模型为基础,用 Monte Carlo 方法模拟太阳光在大气中的传输过程,实现了对混浊大气偏振模式全局分布的建模。实验表明,建模仿真结果同混浊大气偏振模式的分布规律一致,偏振度分布模式同实际分布高度吻合,偏振角分布模式同实际分布模式具有相同的分布和变化特性,利用该模型可对混浊大气的偏振模式分布与变化特性进行分析和预测。

关键词 大气光学; 偏振光学; 散射; Monte Carlo 方法; 辐射传输; 大气偏振模式

中图分类号 P422.3; O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1013001

All Sky Turbid Atmospheric Polarization Pattern Modeling Based on Monte Carlo Method

Wang Ziqian¹ Zhang Xudong¹ Jin Haihong^{1,2} Fan Zhiguo¹

(¹ School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)
(² School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract Atmospheric polarization pattern contains a plenty of informations, such as informations of the spatial orientation, characteristics of earth's surface, structure parameters of the atmosphere, et al, which has important research value in polarotactic navigation, remote sensing, and other fields. However, the real celestial polarization pattern in the turbid atmosphere is quite different from simulation results of existing classical models, which cannot represent the atmospheric polarization pattern in turbid atmosphere. A turbid simulation model of atmospheric polarization pattern is proposed. This new model can be set up by using the three dimension (3D) celestial sphere model to describe the real atmosphere, using the Monte Carlo program of polarized light transport to simulate radiation transfer of the sunlight in the atmosphere. The experiments show that this model is consistent with the real polarization pattern in turbid atmosphere. Specifically the degree of polarization distribution highly accords with the real degree of polarization distribution. And the angle of polarization distribution can reflect the distribution and change feature of the real angle of polarization accurately. In conclusion, this model can be used to analyze and predict the distribution and change feature of the real atmospheric polarization pattern in turbid atmosphere.

Key words atmospheric optics; polarization optics; scattering; Monte Carlo methods; radiation transfer; atmospheric polarization pattern

OCIS codes 010.1290; 100.3008; 280.4788

收稿日期: 2014-04-02; **收到修改稿日期**: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61102153,61271121)、国家 863 计划

作者简介: 王子谦(1988—),男,硕士研究生,主要从事智能信息处理方面的研究。E-mail: ziqianwang@aliyun.com

导师简介: 张旭东(1966—),男,博士,教授,主要从事智能信息处理、机器视觉等方面的研究。

E-mail: xudong1118@163.com

* **通信联系人**。E-mail: ibcshfut@163.com

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

1 引言

太阳光进入大气层后,受到大气中粒子的散射作用,在天空中形成具有一定分布和变化规律的偏振态分布模式,即大气偏振模式^[1-2]。这一模式的形态特征与变化特性,同观测时间和位置有着密切的关系,并受到大气成分以及地表环境的影响^[2]。通过分析该模式的分布变化特性,可获得空间方位、地表特性以及大气成分等信息^[3-6]。研究大气偏振模式的形成、变化和分布特性,对偏振光导航、生物偏振感知机理、大气光学特性分析以及遥感探测等领域的研究具有重要价值,越来越多的国内外研究机构开展了针对大气偏振模式的研究工作^[1,4-9]。

而对大气偏振模式的建模分析是研究模式分布和变化规律与形成机理的重要手段之一。在全天域大气偏振模式的建模分析中,通常利用天球模型描述大气的整体环境,实现大气粒子的偏振辐射传输过程向全天域范围的扩展,如 Rayleigh 模型、Berry 模型、Hannay 模型等^[10-14]。Rayleigh 等经典模型通常选择 Rayleigh 大气作为建模条件,实现对理想大气偏振模式的仿真,其仿真结果的分布与变化特性同实际晴朗天空中的大气偏振模式相吻合^[3]。但在混浊大气中,由于存在大量的云雾等成分,水滴粒子浓度较高,导致光子在传输过程中的随机多次散射效应明显,这一过程同偏振 Monte Carlo 过程较为接近,而不满足 Rayleigh 大气条件^[5-7],导致混浊大气偏振模式同理想模式差异较大^[2-4],因此, Rayleigh 等经典表征模型不能准确描述混浊大气条件下的大气偏振模式分布情况。2013年,王威等^[15]基于 RT3 传输模型建立了大气偏振模式表征模型,该模型可对混浊大气偏振模式进行理论分析,其仿真结果同实际观测结果相一致。然而,这一模型未对全天域范围内的混浊大气偏振模式的全局分布特性进行表征建模。

为实现对混浊大气偏振模式全局分布特性的建模分析,本文将偏振 Monte Carlo 方法应用于大气的天球模型中,通过 Monte Carlo 过程描述太阳光在混浊大气中产生的随机多次散射,建立了一种混浊大气偏振模式的三维(3D)全天域表征模型。实验表明,由该模型可以获得大气偏振模式的全局分布,其中,偏振度分布(DOP)同实际测量的偏振模式高度吻合,偏振角分布(AOP)能够准确地反映实际偏振模式的分布和变化的特性。这一模型可以用于对混浊大气中大气偏振模式分布及其变化特性进行分析和预测。

2 偏振 Monte Carlo 方法

混浊大气是当大气环境中存在大量气溶胶或云雾粒子,即大气浑浊度较高时的大气光传输介质,在实际环境中,通常将浑浊度系数 β 小于 0.1 的大气环境视为清洁大气, β 大于 0.2 时为混浊大气^[5,16]。大气光在混浊大气中传输,会产生强烈的多次散射效应,导致天空偏振特性同理想大气条件下不同,这给光学探测和遥感等带来了困难^[5]。在理想大气条件下,大气中的散射作用主要为大气分子的单次作用,大气偏振模式的总体偏振度较高,可达到 0.5 以上,且偏振度的分布模式相对于太阳子午线呈现为对称分布,偏振角的分布模式呈反对称分布^[4,17]。而在混浊大气条件下,由于多次散射的退偏作用,大气偏振模式的整体偏振度通常低于 0.3,偏振度的分布相对于天顶位置呈中心对称,而偏振角的分布模式相对于太阳子午线保持反对称特性^[4,17]。

偏振 Monte Carlo 方法是一种利用 Monte Carlo 随机过程模拟光子的多次散射过程,从而进行辐射传输研究的仿真方法^[17-21],该方法通过对大量光子的辐射效应进行累加来研究光的辐射传输总效应,是研究混浊介质的研究方法之一,在光的偏振传输中得到广泛的应用^[13-15,17,20]。该方法包括辐射平面、接收平面以及散射介质三个基本要素,其中辐射平面的中心位置设置有辐射光源 O ,如图 1 所示。图中左侧 XOY 平面为辐射平面, O 点位于辐射平面的中心。右侧平面为接收平面,实现接收光子和累加光子辐射特性的功能。两平面之间的区域为散射介质,图中黑点表示介质中随机分布的散射粒子,三条由不同线型构成的连续有向线段分别表示三条不同光子的辐射路径,每一段有向线段表示光子在两次散射之间的运动轨迹。

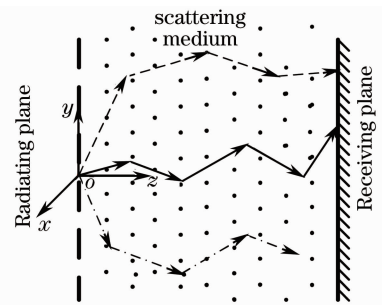


图 1 偏振 Monte Carlo 方法

Fig. 1 Monte Carlo programs of polarized light transport

光子由光源进入散射介质后,同介质粒子作用发生多次散射,形成辐射传输。部分光子经过多次散射后,到达接收平面,被接收平面吸收,其辐射特性被累

加到光源总的辐射特性中。其他光子在散射过程中则由于能量衰减而湮灭,不能到达接收面。为便于数值建模,将接收平面划分成由多个边长为 μ 的方形网格组成的网格阵列,接收平面对落入同一网格中的光子辐射特性进行累加。偏振 Monte Carlo 方法实际上是通过对接收面接收到的全部光子的辐射特性进行累加,以获得光源对介质的辐射特性。

在偏振 Monte Carlo 方法中,光子的辐射特性通过 Stokes 矢量表示。Stokes 矢量的形式为: $\mathbf{S} = [I, Q, U, V]^T$, 其中 I 为总的辐射光强, Q, U 为线偏振光强, V 表示圆偏振光强。大气中的圆偏振光极少,通常可以忽略,故由 Stokes 矢量可获得光的偏

振度 D_{op} 和偏振角 A_{op} :

$$\begin{cases} D_{op} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ A_{op} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \end{cases} \quad (1)$$

光子经过一次散射作用后, Stokes 矢量的变化可通过散射粒子的 Mueller 矩阵 \mathbf{M} 计算获得。若散射前的 Stokes 矢量为 \mathbf{S} , 散射后的 Stokes 矢量为 \mathbf{S}' , 则有

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \times \mathbf{S} \quad (2)$$

对于水滴粒子,可由 Mie 散射理论计算获得 Mueller 矩阵^[12]:

$$\mathbf{M} = \begin{cases} \frac{1}{2}(S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) & \frac{1}{2}(S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) & \frac{1}{2}(S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) & \frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) \\ 0 & 0 & -\frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) & \frac{1}{2}(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) \end{cases} \quad (3)$$

式中 S_1, S_2 为

$$\begin{cases} S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n + b_n \tau_n] \\ S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n + a_n \tau_n] \end{cases} \quad (4)$$

设 α 为散射角, π_n 和 τ_n 可通过 α 的勒让德多项式进行计算:

$$\begin{cases} \pi_1 = 1 & \tau_1 = \cos \alpha \\ \pi_2 = 3 \cos \alpha & \tau_2 = 3 \cos 2\alpha, \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (5)$$

a_n 和 b_n 为

$$\begin{cases} a_n = \frac{m^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - u_1 j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{m^2 j_n(mx) [x h_n^1(x)]' - u_1 h_n^1(x) [mx j_n(mx)]'} \\ b_n = \frac{u_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{u_1 j_n(mx) [x h_n^1(x)]' - h_n^1(x) [mx j_n(mx)]'} \end{cases} \quad (6)$$

其中 m 为粒子的复折射率, x 为粒子尺寸与光波波长间的比例关系, 即 $x = 2\pi r/\lambda$, 其中 r 为粒子半径, λ 为光子波长。函数 $j_n(z)$ 和 $h_n^1(z) = j_n(z) + iy_n(z)$ 为球形贝塞尔函数, 其中 $z = x$ 或者 mx 。通过随机选择散射角 α 作为每次散射后的光子传输方向, 并对全部光子在介质中传输时连续发生的散射过程进行计算即构成偏振 Monte Carlo 过程。故偏振

Monte Carlo 方法的输入参数包括粒子复折射率 m 、粒子半径 r 和光波波长 λ 。

在辐射传输过程中,光子辐射特性发生改变的同时,能量也会由于粒子的散射吸收作用逐渐衰减直至湮灭。偏振 Monte Carlo 方法通过与光子散射衰减过程相关的权重 W 表示光子能量,并设置一个临界值判断光子是否存在。当权重 W 衰减至低于临界值时,表示光子湮灭。由于每次散射过程相互独立,权重值 W 可表示为连续散射过程的累积,即

$$W = \left(\frac{u_s}{u_s + u_a} \right)^n \quad (7)$$

式中 n 表示光子经过的散射次数, u_s 为粒子的散射系数, u_a 为粒子的吸收系数:

$$\begin{cases} u_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n a_n^* + b_n b_n^*) \\ u_a = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) - u_s \end{cases} \quad (8)$$

混浊大气中随机分布有大量的球形粒子,这类颗粒与偏振 Monte Carlo 方法所研究的传输介质中的粒子具有相同辐射传输特性。故可将 Monte Carlo 方法应用于全天域大气偏振模式的仿真建模之中,实现混浊大气偏振模式的建模。

3 大气偏振模式的 Monte Carlo 表征模型

在大气偏振模式的建模中,通常将大气环境抽象为一个半球形的天球,太阳等天体投影于天球表面。混浊大气中水滴粒子对光子的散射传输过程可通过偏振 Monte Carlo 方法描述。故将偏振 Monte Carlo 方法与天球相结合应用于大气偏振模式的建模之中,建立全天域大气偏振模式的表征模型。

3.1 Monte Carlo 表征模型的建模方法

在天球中,太阳近似为天球上的点光源 S (点光源 S 位于图 2 所示的 S 点),光子由太阳位置向天球表面各点辐射,光子在大气中的散射过程由偏振 Monte Carlo 方法进行描述。

1) 将天球表面同时作为光子的辐射面和接收面。天球表面是对大气环境的建模抽象,所有天体都投影于天球表面上,光源太阳(辐射面上)和大气偏振模式(接收面上)也都位于天球表面上。因此,大气偏振模式的 Monte Carlo 表征模型中,辐射面和接收面共面,且位于球形曲面上。

2) 接收面仅记录辐射至其表面上的光子偏振态,但不吸收光子。因为,在实际大气环境中不存在可完全吸收光子的黑体表面,大气环境中的光子接收面只能对接收到的光子辐射特性进行累加,而不能吸收光子。

3) 光源位置可根据实际的太阳位置进行调整。

实际大气中太阳位置时刻发生改变,因此全天域模型的光源需根据建模需要在天球表面上任意移动。

4) 在天球外,距离天球表面较远处设置可完全吸收光子的介质边界。当光子向远离大气层的方向辐射,并辐射至距离大气层较远距离时,光子的辐射特性对大气的影晌极小,可以忽略。因此,为提高模型的计算效率并保证对光子辐射的运算可以结束,需要设置一层介质边界。选取距天球表面 10 倍天球半径的距离处为介质边界。当光子散射至该介质边界时,光子被介质边界吸收。

全天域大气偏振模式的 Monte Carlo 表征模型如图 2(a)所示。在模型中建立东北天球坐标系 $O'X'Y'Z'$ 和直角坐标系 $OXYZ$ 两个坐标系,如图 2(b)所示。其中,天球坐标系 $O'X'Y'Z'$ 同地理方位相对应,它以观测者为原点 O' ,以正东方向为 X' 轴方向,以正北方向为 Y' 轴方向,以天顶方向为 Z' 轴方向,天球半径为 R 。天球坐标系实现对光子的散射位置计算。直角坐标系 $OXYZ$ 同光子辐射传输过程有关,以天球的天顶点为原点 O , X 轴和 Y 轴分别同天球坐标系的 X' 轴和 Y' 轴平行且方向相同, Z 轴方向同 Z' 轴平行且方向相反。直角坐标系实现偏振 Monte Carlo 的计算过程。故有

$$\begin{cases} X - X' = 0 \\ Y - Y' = 0 \\ Z + Z' = OO' = R \end{cases} \quad (9)$$

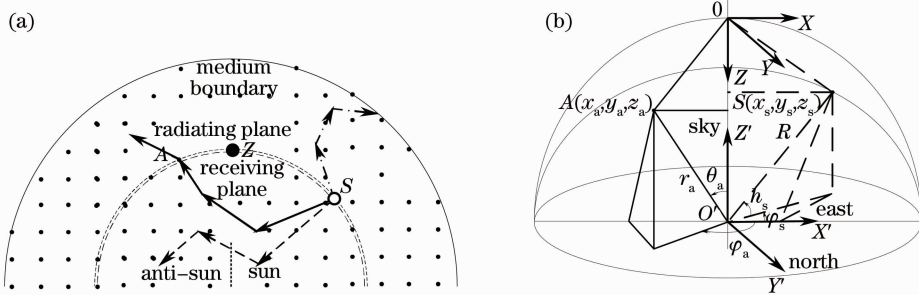


图 2 全天域偏振 Monte Carlo 模型。(a) Monte Carlo 模型示意图; (b) 天球坐标系

Fig. 2 Monte Carlo programs of polarized light transport for the all sky. (a) Diagram of Monte Carlo programs; (b) coordinate of celestial

3.2 表征模型的算法

全天域偏振 Monte Carlo 模型是以天球描述大气形态,并以偏振 Monte Carlo 过程描述光子辐射过程进行建模仿真所得到的大气偏振表征模型。

1) 确定光源辐射位置。实际太阳的位置由高度角 h_s 和方位角 φ_s 表示,可对应于模型中太阳的天球坐标 $S(R, \varphi_s, h_s)$ 。故可获得太阳的直角坐标

$S(x_s, y_s, z_s)$:

$$\begin{cases} x_s = R \cdot \cos(90^\circ - h_s) \cdot \cos(\varphi_s) \\ y_s = R \cdot \cos(90^\circ - h_s) \cdot \sin(\varphi_s) \\ z_s = R \cdot [1 - \sin(90^\circ - h_s)] \end{cases} \quad (10)$$

2) 辐射光子。光子由太阳向外辐射,初始的权重 W 为 1,可由太阳位置随机向外辐射,并在随机位置同粒子发生散射。故随机选择辐射方向和发生

散射前的传输距离 d ，辐射方向由单位方向矢量 $\mathbf{e} = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 表示。由于太阳光在进入大气层前为完全非偏振光，故光子初始的 Stokes 矢量为 $\mathbf{I}_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

3) 散射。光子沿 $\mathbf{e} = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 的方向传输了距离 d 后，同大气粒子发生散射，如图 2(a) 中 A 点所示。若光子前一次的散射位置为 $A'(x'_a, y'_a, z'_a)$ ，当前的散射位置为 $A(x_a, y_a, z_a)$ ，则有

$$\begin{cases} x_a = x'_a + \alpha \cdot d \\ y_a = y'_a + \beta \cdot d \\ z_a = z'_a + \gamma \cdot d \end{cases} \quad (11)$$

散射对光子 Stokes 矢量的改变可由(2)~(6)式计算得到。光子权重 W 的衰减可由(7)、(8)式计算获得。并随机选取散射后光子的辐射方向 \mathbf{e}' 及传输距离 d 。

4) 确定散射位置的天球坐标。散射位置的直角坐标 $A(x_a, y_a, z_a)$ 可得到散射位置的天球坐标系 $A(r_a, \varphi_a, \theta_a)$ ，则有

$$\begin{cases} r_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + (R - z_a)^2} \\ \varphi_a = \arctan\left(\frac{y_a}{x_a}\right) \\ \theta_a = \arcsin\left[\frac{(R - z_a)}{r_a}\right] \end{cases} \quad (12)$$

5) 判别光子是否到达天球表面。天球表面为光子接收面，若光子到达天球表面则对光子 Stokes 矢量进行累加。为便于数值仿真，当光子散射位置位于天球表面的一个邻域范围内时，则可认为已辐射至天球表面之上。当散射位置 $A(r_a, \varphi_a, \theta_a)$ 满足 $|R - r_a| < 0.01\mu$ 时，则认为辐射至天球表面。若光子到达天球表面，则累加当前光子的 Stokes 矢量，直接执行步骤 7)，否则顺序执行下一步。

6) 判断光子是否到达介质边界。当光子到达介质边界时，结束光子的散射计算过程，并对光子进行吸收。若散射位置 $A(r_a, \varphi_a, \theta_a)$ 满足 $r_a > 10R$ 时，认为光子到达介质边界，结束光子的传输过程，直接执行步骤 8)，否则，顺序执行下一步。

7) 判断光子是否存在。若当光子的权重 W 大于临界值时，则表示光子可继续传输，返回步骤 3)。当权重 W 小于临界值时，则光子湮灭，散射结束，顺序执行下一步。选取临界值为 1×10^{-6} 。

8) 判断当前光子是否为最后一个光子。本文中选取光源光子数为 1×10^9 个，若当前子为最后一个光子，则返回步骤 2)，光源辐射新的光子。否则，根据(1)式由接收面累加得到的总的 Stokes 矢量计

算大气偏振模式的偏振度分布模式和偏振角分布模式，算法结束。算法流程如图 3 所示。

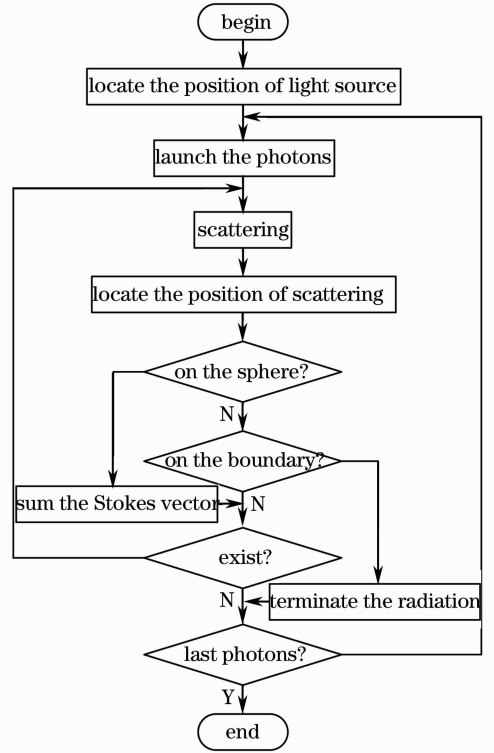


图 3 全天域大气偏振模式 Monte Carlo 表征建模流程

Fig. 3 Flow chart of Monte Carlo programs for all sky polarized light transport

4 实验与分析

可见和近红外光谱区是到达地面的太阳光主要区间，近红外区的光谱范围为 $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ，水汽等混浊介质粒子对这一波谱范围内的红外光具有较弱的吸收作用^[22]，验证实验中选取 $1.0 \mu\text{m}$ 的红外光作为入射光。

4.1 不同太阳位置下的仿真实验

在不同太阳位置下利用该模型对大气偏振模式进行仿真。通过分析仿真获得的模式分布和变化特性是否同经典的实际观测模式相符，来验证该模型是否正确。散射粒子选择 Haze L 粒子，Haze L 粒子^[22]是一种表征水滴混浊介质散射粒子。它的模半径为 $0.07 \mu\text{m}$ ，粒子复折射率随入射光的波长变化而变化，在可见和近红外光谱区范围内，水滴粒子的复折射率实部在 $1.3 \sim 1.4$ 左右，复折射率虚部近似为 0。Haze L 粒子在 $1.0 \mu\text{m}$ 的下复折射率为 $1.342 + i0$ ，将该粒子作为输入参数进行验证实验。仿真模式的太阳位置如表 1 所示。

为便于分析大气偏振模式的分布和变化特性，

表 1 仿真模式的太阳位置

Table 1 Sun positions for simulation

Position of sun	S_1	S_2	S_3	S_4
Solar altitude / (°)	0	45	30	30
Solar azimuth / (°)	0	0	45	90

仿真结果以二维(2D)形式进行表征,如图 4 所示,其中虚线位置为太阳子午线。由图中可见,在偏振度分布模式中,天空偏振度较低,除太阳位置附近及与太

阳相对天顶呈中心对称的位置附近以外,仿真模式的整体偏振度低于 0.2,并在天顶区域偏振度最低。仿真得到的偏振度分布模式相对于天顶位置呈现出中心对称的分布特征;偏振角分布模式相对太阳子午线呈现反对称的分布特征,并随着太阳位置变化而发生旋转。这一仿真结果与 Coulson 等^[2-4]对混浊大气中的实际分布模式的观测结果相符。

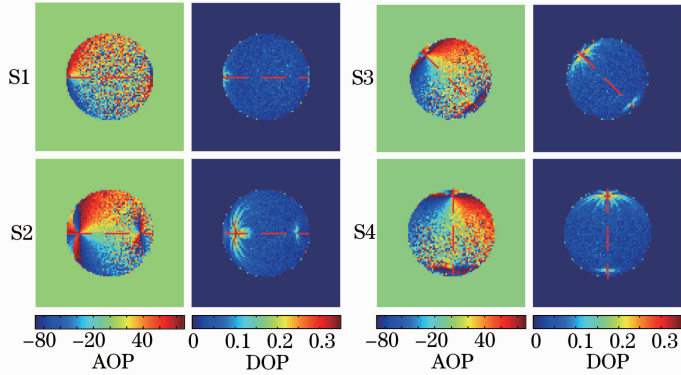


图 4 不同太阳位置下的大气偏振模式仿真结果

Fig. 4 Atmospheric polarization pattern simulation results of different sun positions

4.2 相同太阳位置下的仿真与实测对比

实际混浊大气偏振模式可通过图像测量方法获取。大气偏振模式测量装置由 Nikon D50 相机、Nikkor AF DX 10.5mm f/2.8G ED 鱼镜头、偏振片和滤光片组成,偏振片和滤光片置于鱼镜头前端,如图 5 所示。鱼镜头的视场为 160°,具有较大的观测视场,可以获取较广天空范围的光分布特性;前置偏振片对不同偏振光的透射性不同,完成对偏振态的检测;滤光片实现对红外波段进行选择;CCD 相机实现对光强信息的记录其图像量化位数为 8 bit。测量装置的 Mueller 矩阵如表 2 所示。

阵 M ,可计算获得实际大气偏振模式 Stokes 矢量 $S = [I, Q, U, V]^T$,其中,由于大气中圆偏振分量 V 较少,可以忽略。

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}^0 & M_{12}^0 & M_{13}^0 \\ M_{11}^{60} & M_{12}^{60} & M_{13}^{60} \\ M_{11}^{120} & M_{12}^{120} & M_{13}^{120} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{60} \\ I_{120} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

由计算获得 Stokes 矢量 $S = [I, Q, U, V]^T$,根据 (1) 式可以计算获得实测大气偏振模式的偏振度和偏振角分布。

表 2 偏振测量系统的 Mueller 矩阵参数

Table 2 Mueller matrix parameters of polarimeter

AOP	M_{11}	M_{12}	M_{13}
0°	0.5000	0.5000	0.0001
60°	0.5000	-0.2499	0.4330
120°	0.5000	-0.2501	-0.4328

由图像测量法可获得实际大气偏振模式的偏振度和偏振角分布。将获取的实测模式在相同太阳位置上同仿真模式对比,对本文模型进行验证。实测模式的观测地点为合肥工业大学,观测时间为 2013 年 5 月 20 日 16:00,该时刻太阳高度角为 32°34',方位角为 79°59'。实验时刻,大气中存在大量的云雾,浑浊度系数 β 接近 0.3,为混浊大气,相对湿度高于 80%,水分构成散射粒子的主要成分,该类粒子模半径较小,约为 0.1 μm ,故 Haze L 散射粒子可适用于该实际环境下的粒子散射特性分析^[21-22],可通过实

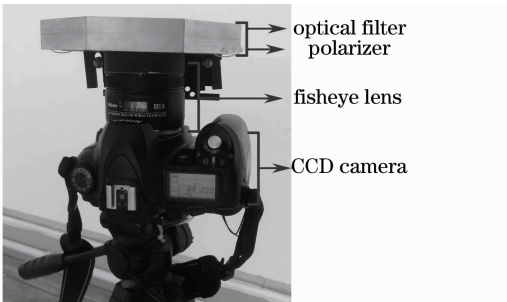


图 5 偏振检测装置

Fig. 5 Polarimeter

实际测量过程中,通过水平仪和指北针矫正测量设备水平和方位,将偏振片旋转至 0°、60°、120°,并分别在这三个检偏角下通过 CCD 相机拍摄天空偏振图像 I_0 、 I_{60} 、 I_{120} ,由偏振测量装置的 Mueller 矩

测实验结果对本文模型进行验证。按照上述光源和粒子参数,以及实测时刻的太阳位置进行仿真。实

测结果与仿真结果如图 6 所示,其中,虚线为太阳子午线。

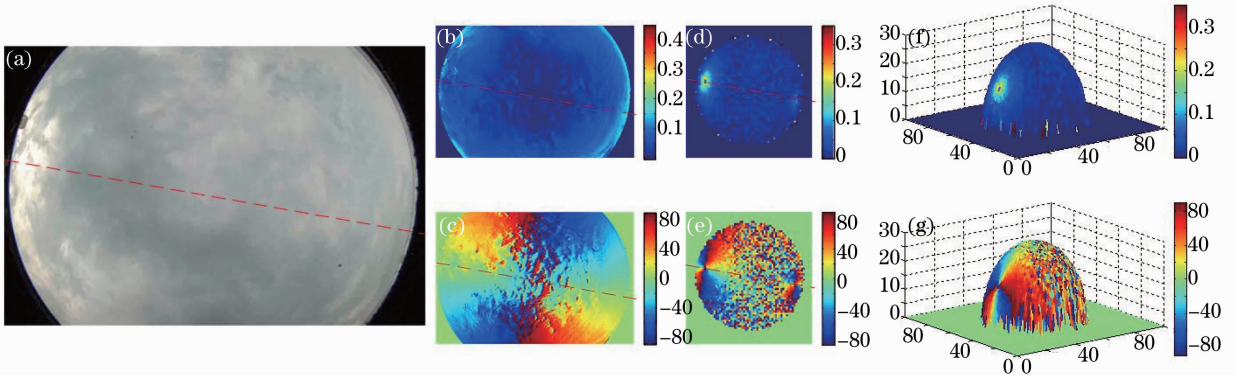


图 6 相同太阳位置下仿真与实测结果。(a) 实测混浊大气;(b) 实测偏振度分布;(c) 实测偏振角分布;(d) 二维仿真的偏振度分布;(e) 二维仿真的偏振角分布;(f) 三维仿真偏振度分布;(g) 三维仿真偏振角分布

Fig. 6 Comparison of simulation and measurement. (a) Measured atmosphere; (b) measured DOP distribution; (c) measured AOP distribution; (d) 2D simulated DOP distribution; (e) 2D simulated AOP distribution; (f) 3D simulated DOP distribution; (g) 3D simulated AOP distribution

如图 6(b)和(d)所示,实测与仿真获得的偏振度分布特性高度吻合。实测和仿真偏振度分布模式都相对于天顶位置呈中心对称分布的特性,且两者的取值分布较为接近,仿真模式的偏振度总体分布在 $0\sim 0.2$ 之间,而实测模式的偏振度总体分布在 $0\sim 0.25$ 之间。

由图 6(c)和(e)可见,实测与仿真获得的偏振角分布模式具有一致的分布和变化趋势。两者的偏振角模式都相对太阳子午线呈相同的反对称分布特性;且在沿远离太阳子午线的方向上,都具有逐渐向 $\pm 90^\circ$ 变化的趋势。由于本文仿真模型中选取的光子数量(1×10^9 个),远远小于实际大气环境中的光子数量,因此,在偏振角的仿真模式中会产生颗粒噪声。随着光子数量的逐渐增加,偏振角中的颗粒噪声会逐渐减小,但仿真建模的运算量会急剧增大。

对仿真和实测的大气偏振模式中,太阳子午线上点的偏振度和偏振角进行比较。由于仿真和实测

分布模式的像素大小不同,不能通过像素坐标直接进行比较,故将两者在太阳子午线上各个点的像素坐标统一映射为该点在三维大气偏振模式中的观测天顶角坐标进行比较,观测天顶角是位于天球原点处的观测者观测视线方向同天顶方向之间的夹角,天顶处观测天顶角为 0° 。以天顶为中心,可将太阳子午线分为两部分,其中,与太阳位置共同位于天顶同一侧的部分太阳子午线称为正太阳子午线,另一侧称为反太阳子午线,以反太阳子午线为正方向,即 $0^\circ\sim 90^\circ$ 表示反太阳子午线, $0^\circ\sim -90^\circ$ 表示正太阳子午线,其中, $\pm 90^\circ$ 为地平位置。由于观测设备的视场限制,实测有效数据在 $-80^\circ\sim 80^\circ$ 之间。

如图 7(a)所示,实测和仿真模式在沿太阳子午线方向上的偏振度变化趋势相一致,天顶(0°)附近的偏振度较低,接近地平($\pm 90^\circ$)位置的偏振度相对较高,其中,实测结果在天顶位置偏振度接近 0,而仿真结果在 0.05 左右波动变化。

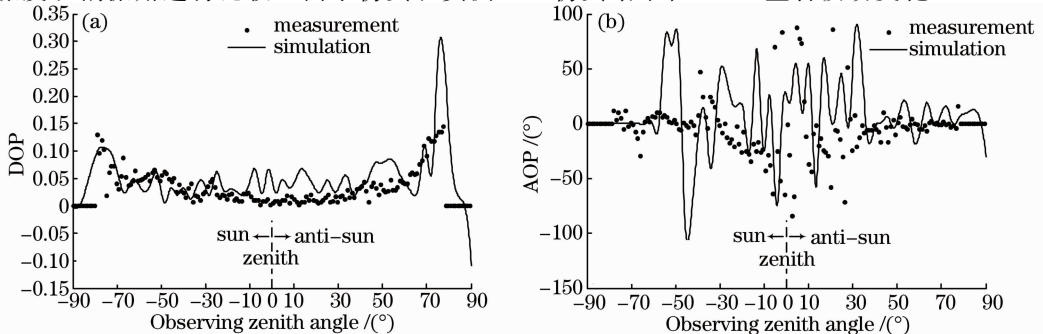


图 7 太阳子午线上仿真与实测偏振分布对比。(a) 偏振度分布对比;(b) 偏振角分布对比

Fig. 7 Comparison of simulation and measurement on solar meridian. (a) Comparison of DOP; (b) comparison of AOP

如图 7(b)所示,实测与仿真模式在沿太阳子午线方向上的偏振角分布在正负偏振角上反复震荡变化,震荡中心的偏振角为 0° 。但在观测天顶角 -60° 附近位置,即太阳位置附近,仿真模式中震荡特性与实测结果有一定差别。这是由于仿真实验中光源附近位置处散射发生的次数较少,主要体现为单次散射特性,而在实际模式中,太阳被云雾遮盖,该位置同样存在大量的云雾粒子散射作用,仍以多次散射作用为主,因此导致仿真结果同实测结果在该处偏振角分布不同。

通过反复实验表明,本文模型的仿真结果同混

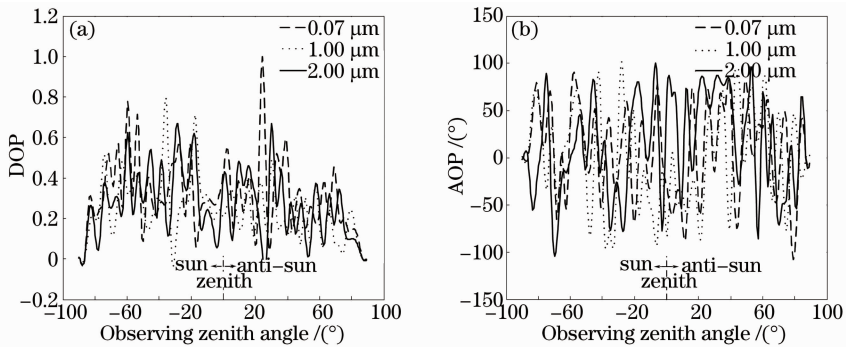


图 8 日落时分不同散射粒子仿真对比。(a) 偏振度分布对比; (b) 偏振角分布对比

Fig. 8 Comparison of simulations of different scattering particles on solar meridian at sunset. (a) Comparison of DOP; (b) comparison of AOP

浊时刻天空的偏振特性最为明显,对比图 7 (a)结果,天空偏振度明显升高,不同散射粒子的平均偏振度在 0.35 左右。由图 8(a)可见,三种混浊大气的偏振度在太阳子午线上的分布特性相同,呈现为中心对称特性,但随着散射粒子尺寸增大,整体偏振度逐渐降低。对比偏振角分布的变化特性,如图 8(b)所示,三种混浊大气的偏振角分布都具有以 0° 偏振角为中心呈反复震荡的一致特性,说明偏振角分布相对混浊大气仍具有较好的稳定性。

5 结 论

提出了一种全天域混浊大气偏振模式的表征方法,通过将 Monte Carlo 方法同天球大气模型相结合,实现对三维全天域混浊大气偏振模式全局分布的表征建模。通过实验验证表明,该模型仿真得到的偏振度分布同实际偏振模式高度吻合,所得偏振角分布能准确地反映实际偏振模式的分布和变化特性,可用于对大气偏振模式分布与变化特性进行分析和预测。

下一步将利用该方法对不同散射粒子及光谱条件下的大气偏振模式的分布特征与变化规律进行研

究和实际偏振模式一致,其中,仿真获得的偏振度分布同实际分布高度吻合,偏振角分布同实际分布具有一致的分布变化特性。本文模型可对实际大气偏振模式的分布与变化特性进行分析与预测。

4.3 日落时刻不同散射粒子的仿真

日落时刻,即太阳高度角为 180° 时,天空偏振特性最为明显,故选择日落时刻对选取模半径为 0.07、1.0、2.0 μm 的散射粒子进行仿真实验。三种混浊大气条件下,太阳子午线上偏振特性的变化如图 8 所示,其中,横坐标为太阳子午线上的观测天顶角。

究和分析,并比较不同光谱和粒子散射特性对大气偏振模式形成变化的影响和作用。

参 考 文 献

- 1 Jun Gao, Wang Lei, Bo Mei, *et al.*. Information acquisition in desert ant navigation[J]. International Journal of Information Acquisition, 2006, 3(1): 33-43.
- 2 Coulson K L. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere[M]. A Deepak Pub, 1988.
- 3 Horvath G, Varju D. Polarized Light in Animal Vision: Polarization Patterns in Nature[M]. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- 4 Horvath G, Barta A, Pomozi I, *et al.*. On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011, 366(1565): 772-782.
- 5 Yao Ruizhong. General characteristics of modulation transfer function of turbid atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900125.
饶瑞中. 混浊大气介质调制传递函数的一般特征[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900125.
- 6 Yao Ruizhong. Solar radiation pressure on water cloud particles [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101003.
饶瑞中. 作用于水云粒子的太阳辐射压力[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101003.
- 7 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. Representation and analysis of skylight polarization pattern based on complex sphere mapping on 2D plane [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 870-876.

- 吴良海, 高 隽, 范之国, 等. 基于复球面映射的大气偏振模式表征与分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 870—876.
- 8 Zhang Xudong, Lin Jinjin, Xie Zhao, *et al.*. Model of skylight polarization pattern based on electric vector [J]. Chinese J Electronics, 2010, 38 (12): 2745—2750.
- 张旭东, 林金金, 谢 昭, 等. 基于电矢量描述的大气偏振建模[J]. 电子学报, 2010, 38 (12): 2745—2750.
- 9 Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 38(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.
- 10 Hannay J H. Radiative transfer: exact Rayleigh scattering series and a daylight formula[J]. J Opt Soc Am, 2009, 26(3): 669—675.
- 11 Bence S, Horvath G. How well does the Rayleigh model describe the *E*-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study[J]. J Opt Soc Am A, 2004, 21(9): 1669—1676.
- 12 Berry M V, Dennis M R, Lee R L. Polarization singularities in the clear sky[J]. New Journal of Physics, 2004, 6(1): 162.
- 13 Hulst H C. Light Scattering: by Small Particles[M]. Mineola: Courier Dover Publications, 1957.
- 14 Ramella R J, Prah S, Jacques S. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I[J]. Opt Express, 2005, 13(12): 4420—4438.
- 15 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.
- 16 Wang Yaoqi, Shen Zhibao, Ji Guoliang, *et al.*. Atmospheric turbidity in winter over Lanzhou[J]. Plateau Meteorology, 1982, 1(4): 84—90.
- 王尧奇, 沈志宝, 季国良, 等. 兰州冬季的大气浑浊度[J]. 高原气象, 1982, 1(4): 84—90.
- 17 Hegedus R, Akesson S, Horvath G. 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, 2007, 24(8): 2347—2356.
- 18 Zhang Qianqian, Gao Jun, Xu Xiaohong, *et al.*. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1213001.
- 张倩倩, 高 隽, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1213001.
- 19 Huang Chaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng, *et al.*. Numerical calculation of optical properties of multi-particle size aerosol aggregate particles [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (6): 0601004.
- 黄朝军, 吴振森, 刘亚锋, 等. 多粒径气溶胶凝聚粒子光学特性的数值计算[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601004.
- 20 Zhang Yangyang, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. Three-dimensional dynamic simulation of light scattering transmission based on the Monte Carlo [J]. Microcomputer & Its Applications, 2013, 8: 7—9.
- 张阳阳, 高 隽, 范之国, 等. 基于蒙特卡罗的光散射传输三维动态仿真[J]. 微型机与应用, 2013, 8: 7—9.
- 21 He Xianqiang, Bai Yan, Zhu Qiankun, *et al.*. A vector radiative transfer model of coupled ocean-atmosphere system using matrix-operator method for rough sea-surface [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010, 111 (10): 1426—1448.
- 22 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012. 152—163.
- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 152—163.
- 23 Han Yong, Wang Tijian, Rao Ruizhong, *et al.*. Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 7396—7407.
- 韩 永, 王体健, 饶瑞中, 等. 大气气溶胶物理光学特性研究进展[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 7396—7407.

栏目编辑: 王晓琪