

# 基于电矢量描述的大气偏振建模

张旭东, 林金金, 谢 昭, 纪 松, 吴克伟, 高 隽

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

**摘 要:** 现有理想情况下大气偏振建模回避了对散射过程的描述, 无法扩展到实际模型. 本文采用电场强度矢量描述光波, 建立天球坐标系与东北天坐标系研究光的多点单次散射过程. 利用两坐标系之间的转换关系计算参数, 将单次瑞利散射分析方法应用于全天域. 计算散射光电场强度矢量并处理, 得到偏振度和偏振方向矢量来表征大气偏振信息. 仿真实验表明该方法能够准确描述理想情况下大气偏振模式, 且所得电矢量可以作为实际建模的参考数据, 方法具有一定的扩展性和应用价值.

**关键词:** 大气光学; 大气偏振模式; 电矢量; 坐标系转换

**中图分类号:** P401; TP311.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2745-06

## Modeling of Skylight Polarization Pattern Based on Electric Vector

ZHANG Xu-dong, LIN Jin-jin, XIE Zhao, JI Song, WU Ke-wei, GAO Jun

(Department of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** Traditional ideal model of skylight polarization pattern can't be extended to actual situations without analysis of scattering process. In this paper, electric field intensity vector is used to describe light waves. Then the celestial coordinate system and the north-east-up coordinate system are established respectively to analyze the scattering process. Utilizing the transformational relation of the two coordinate systems, the analytical method of Rayleigh scattering can be applied to every measured point over the celestial hemisphere. Degree of polarization and polarization direction vector are used to express skylight polarization information which can be calculated by electric vector of scattered light. Simulation results show that the new modeling method has certain expansibility and applicability because it can not only provide an accurate description of ideal skylight polarization pattern, but also offer the reference data for actual models.

**Key words:** atmospheric optics; skylight polarization pattern; electric vector; coordinate system transformation

## 1 引言

进入地球大气层之前, 太阳光作为一种横电磁波的自然光源是没有偏振的. 进入大气层之后, 由于大气中的空气分子、气溶胶粒子对光的散射作用, 以及云层和其它如岩石、植被、水域等表面对光的反射作用, 产生了大量偏振光, 在天空中形成了特定的偏振态分布, 称为大气偏振模式<sup>[1]</sup>. 大气偏振模式是仿生偏振光导航与定位研究的理论基础, 也是遥感探测、大气光学分析的重要对象<sup>[2-4]</sup>. 大气偏振建模与仿真研究能够从理论角度计算模式的状态特征和变化规律, 在整个大气偏振模式及其相关领域的研究工作中具有指导意义<sup>[5-7]</sup>.

现有大气偏振建模方法主要有两类, 传统瑞利散射法从大气偏振模式的形成机制出发, 考虑天球表面的多点单次瑞利散射, 计算偏振度和偏振角表征大气偏振信息<sup>[8,9]</sup>; 另一类方法从实测大气偏振模式的数据出发,

考虑光的多点多次散射, 采用数学模型拟合分布特征<sup>[10-12]</sup>. 现有方法均只考虑了光的散射过程, 不涉及光的反射、传输损耗等其他影响因素, 是一种理想情况下大气偏振模型.

本文通过分析认为现有理想建模方法回避了对散射物理过程的描述, 无法扩展到实际模型. 因此, 本文提出了一种基于电矢量描述的大气偏振建模方法, 拟在解决模型扩展问题. 采用电场强度矢量描述光波, 建立天球坐标系研究全天域多点散射, 建立东北天坐标系研究自然光入射下单次瑞利散射. 利用两坐标系之间的转换关系, 计算天球表面各点散射光的电矢量并进行处理, 得到偏振度和偏振方向矢量. 仿真结果表明, 该方法能够准确完备地计算理想情况下全天域大气偏振信息, 且所得电矢量可以用作实际大气偏振建模的参考数据, 方法具有一定的扩展性.

## 2 基于电矢量描述的单次瑞利散射过程分析

传统瑞利散射法利用散射光强与入射光强的特殊比值关系,结合空间几何位置,直接计算大气偏振度和偏振角.但是这种简单关系仅适用于瑞利散射,对于实际大气偏振模式的其他影响过程如光的反射、传输等不再适用.另一类建模方法仅关注数学模型的选取,物理意义不明确.光的偏振特性取决于电矢量的振动状态,现有理想建模方法由于回避了对散射过程的描述,无法计算散射光的电矢量信息,缺乏实际建模所需的基础数据,因而不具备扩展性.

本文采用电场强度矢量描述光波,这种描述方式适用于大气偏振模式形成的各个物理过程分析.假设空气分子可以看作均匀介质的球形粒子,则线偏振光入射下的单次瑞利散射过程能够根据洛伦茨-米散射理论进行分析.

如图 1 所示,以空气分子  $P$  为原点建立直角坐标系  $X_p Y_p Z_p$ , 设一束线偏振光  $E_i^x$  沿  $Z_p$  轴反向入射到点  $P$  发生单次瑞利散射,入射光电场振动沿  $X_p$  轴.假设被测点为  $P'$ ,以入射光传播方向  $Z_p P$  与散射光传播方向  $PP'$  所在平面为散射平面,线偏振光  $E_i^x$  能够以平行于和垂直于散射平面的方向分解为两个入射光电场强度分量  $E_{i\theta}^x$  和  $E_{i\phi}^x$ .认为入射光电场只产生相同的散射光电场,故两个入射光电场强度分量  $E_{i\theta}^x$  和  $E_{i\phi}^x$  经过瑞利散射后,分别获得两个散射光电场强度分量  $E_{S\theta}^x$  和  $E_{S\phi}^x$ ,有<sup>[13]</sup>:

$$E_{S\theta}^x = A \cdot \cos\phi \cos\theta \quad (1)$$

$$E_{S\phi}^x = A \cdot \sin\phi \quad (2)$$

$$A = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 a^3 \frac{\hat{n}_1^2 - 1}{\hat{n}_1^2 + 2} e^{ihr} \quad (3)$$

其中,  $E_{S\theta}^x$ 、 $E_{S\phi}^x$  是散射光电场强度分量  $E_{S\theta}^x$  和  $E_{S\phi}^x$  的矢量大小,  $\theta$  是散射角,  $\phi$  是观测角,  $\lambda$  是入射光波长,  $a$ 、 $\hat{n}_1$  分别是散射粒子的半径和折射率,  $r$  是被测点距离散射粒子位移,可取  $r = 3a$ .

实际入射到空气分子  $P$  的光并非线偏振光而是自然光.自然光可以分解为两束强度相等(总光强的一

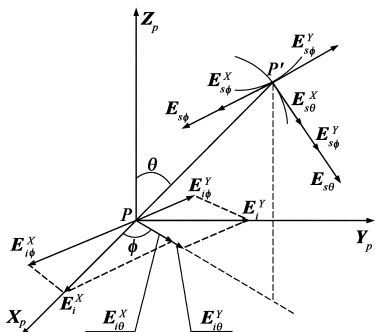


图1 自然光入射下的单次瑞利散射模型

半)、电场振动方向相互垂直且没有固定相位关系的线偏振光<sup>[8]</sup>.因此,本文将自然光分解为电场振动分别沿  $X_p$  轴与  $Y_p$  轴方向的两束线偏振光  $E_i^x$  和  $E_i^y$ ,如图 1 所示.对于被测点  $P'$  来说,线偏振光  $E_i^x$  入射下所得两个散射光电场强度分量可由式(1)、(2)获得.同理,分解入射线偏振光  $E_i^y$  为平行分量  $E_{i\theta}^y$  和垂直分量  $E_{i\phi}^y$ .根据球体对称性,观测角  $\phi$  是  $\phi$  的余角,散射角  $\theta$  不变.因此,入射光电场强度分量  $E_{i\theta}^y$  和  $E_{i\phi}^y$  对应两个散射光电场强度分量  $E_{S\theta}^y$  和  $E_{S\phi}^y$ ,有:

$$E_{S\theta}^y = A \cdot \sin\phi \cos\theta \quad (4)$$

$$E_{S\phi}^y = A \cdot \cos\phi \quad (5)$$

其中,  $E_{S\theta}^y$ 、 $E_{S\phi}^y$  是散射光电场强度分量  $E_{S\theta}^y$  和  $E_{S\phi}^y$  的矢量大小.

## 3 全天域大气偏振模型的建立

为了建立全天域大气偏振模型,本文以观测位置为原点建立天球坐标系,在天球表面选取多个被测点作为散射粒子,分别考虑各点的瑞利散射过程.由上节可知,基于电矢量描述的单次瑞利散射分析是在以散射粒子为原点的直角坐标系中进行,天球坐标系不再适用,故本文根据太阳位置建立东北天坐标系,利用两种坐标系之间的转换关系,将单次瑞利散射分析方法应用于全天域.本文采用偏振度和偏振方向矢量表征大气偏振信息.其中,偏振度由散射光的斯托克斯矢量获得;偏振方向矢量取决于散射光的电场振动状态,相比于传统模型的偏振角这一概念,物理意义明确,且在三维空间中能够完备描述偏振方向信息.本文设计的大气偏振建模流程如图 2 所示.

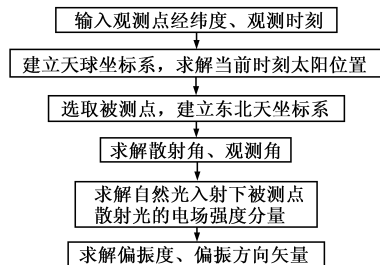


图2 基于电矢量描述的大气偏振建模流程图

### 3.1 坐标系的建立与转换

选取地球表面任一点为观测点  $O$ ,以点  $O$  为坐标原点建立天球坐标系  $X_0 Y_0 Z_0$ .其中,点  $O$  所在地平面的南向、北向分别作为  $X_0$  轴和  $Y_0$  轴方向,过点  $O$  的铅垂线并指向上为  $Z_0$  轴方向,如图 3 所示.在天球坐标系  $X_0 Y_0 Z_0$  中,对于任意观测时刻,可以根据天文学公式<sup>[14]</sup>确定太阳投影点  $S$ ,以高度角  $h_s$  和方位角  $\alpha_s$  来表征.选取天球表面任意不同于太阳投影点  $S$  的点作为被测点  $P$ ,以高度角  $h_p$  和方位角  $\alpha_p$  来表征.其中,高度

角  $h_p$  的取值范围是  $[0^\circ, 90^\circ]$ , 方位角  $\alpha_p$  的取值范围是  $[0^\circ, 360^\circ]$ .

在天球坐标系  $X_0Y_0Z_0$  中, 将自然光看作平面波, 其入射方向是沿太阳投影点  $S$  到观测点  $O$  的连线  $SO$ . 对天球表面任一被测点  $P$  来说, 自然光入射方向不变. 散射光传播方向是沿被测点  $P$  到观测点  $O$  的连线  $PO$ , 如图 3 所示.

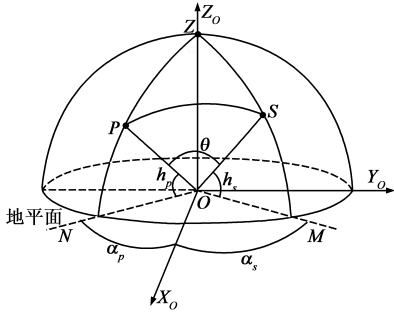


图3 天球坐标系下各点位置示意图

根据单次瑞利散射分析, 被测点  $P$  距离散射粒子  $P$  的位移  $r$ , 取值远远小于天球半径, 因此可以近似认为散射粒子与被测点重合. 因而, 本文定义一种直角坐标系, 以天球表面被测点  $P$  为坐标原点, 以太阳投影点  $S$  所在纬度圈的向东切向量方向为  $X_p$  轴方向, 以太阳投影点  $S$  所在经度圈的向北切向量方向为  $Y_p$  轴方向, 以自然光入射方向  $SO$  的反方向为  $Z_p$  轴方向, 称之为东北天坐标系  $X_pY_pZ_p$ , 如图 4 所示. 东北天坐标系  $X_pY_pZ_p$  适用于单次瑞利散射过程分析, 且一旦当前时刻太阳位置确定, 对于天球表面任一被测点  $P$  来说, 坐标系姿态不变.

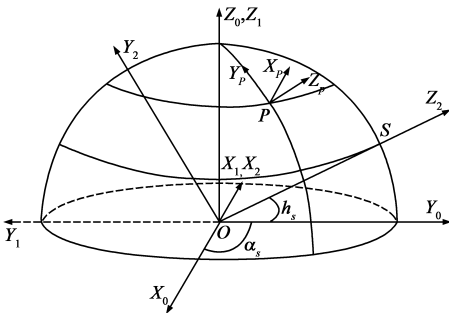


图4 天球坐标系与东北天坐标系位置变换示意图

由天球坐标系  $X_0Y_0Z_0$  绕  $Z_0$  轴旋转角度  $\alpha_s + 90^\circ$  变换到坐标系  $X_1Y_1Z_1$ , 坐标系  $X_1Y_1Z_1$  再绕  $X_1$  轴旋转角度  $90^\circ - h_s$  变换到坐标系  $X_2Y_2Z_2$ , 旋转方向符合右手法则, 如图 4 所示. 两次绕轴旋转对应的转动关系矩阵  $C$  为:

$$C = \begin{bmatrix} -\sin\alpha_s & \cos\alpha_s & 0 \\ -\sin(h_s)\cos\alpha_s & -\sin(h_s)\sin\alpha_s & \cos(h_s) \\ \cos(h_s)\cos\alpha_s & \cos(h_s)\sin\alpha_s & \sin(h_s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

坐标系  $X_2Y_2Z_2$  以观测点  $O$  为原点, 将其平移至以

被测点  $P$  为原点后就变换成东北天坐标系  $X_pY_pZ_p$ . 平移量是被测点  $P$  在坐标系  $X_2Y_2Z_2$  中的坐标值  $(X_2^p, Y_2^p, Z_2^p)^T$  取反, 有:

$$\begin{bmatrix} X_2^p \\ Y_2^p \\ Z_2^p \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} R\cos(h_p)\cos\alpha_p \\ R\cos(h_p)\sin\alpha_p \\ R\sin(h_p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $R$  为天球半径.

### 3.2 散射光电场强度参数计算

在天球坐标系  $X_0Y_0Z_0$  中, 以自然光入射方向  $SO$  与散射光传播方向  $PO$  之间夹角为散射角  $\theta$ , 如图 3 所示. 由当前时刻太阳位置及被测点位置, 根据球面余弦定理, 有:

$$\cos\theta = \cos(h_p)\cos(h_s)\cos(\alpha_s - \alpha_p) + \sin(h_p)\sin(h_s) \quad (8)$$

在东北天坐标系  $X_pY_pZ_p$  中, 以观测点  $O$  到被测点  $P$  的连线在坐标平面  $X_pPY_p$  上的投影与  $X_p$  轴之间的夹角为观测角  $\phi$ , 如图 1. 根据式(7)所得被测点  $P$  在坐标系  $X_2Y_2Z_2$  中坐标值  $(X_2^p, Y_2^p, Z_2^p)^T$ , 获得观测角  $\phi$ , 有:

$$\phi = \arctan \frac{Y_2^p}{X_2^p} \quad (9)$$

由式(1)至(9)能够计算出四个散射光电场强度分量  $E_{S\theta}^X, E_{S\phi}^X, E_{S\theta}^Y$  和  $E_{S\phi}^Y$  的矢量大小, 以下考虑矢量方向的表示. 如图 1 所示,  $E_{S\theta}^X$  和  $E_{S\phi}^X$  的振动方向一致, 平行于散射平面, 该方向对应的单位矢量设为  $n$ ;  $E_{S\theta}^Y$  和  $E_{S\phi}^Y$  的振动方向一致, 垂直于散射平面, 该方向对应的单位矢量设为  $m$ . 在东北天坐标系  $X_pY_pZ_p$  中, 根据球面余弦定理, 有:

$$n = \cos\theta\cos\phi \cdot e_x + \cos\theta\sin\phi \cdot e_y - \sin\theta \cdot e_z \quad (10)$$

$$m = \sin\phi \cdot e_x - \cos\phi \cdot e_y \quad (11)$$

其中,  $e_x, e_y, e_z$  是东北天坐标系  $X_pY_pZ_p$  中,  $X_p$  轴、 $Y_p$  轴和  $Z_p$  轴对应的单位方向矢量.

### 3.3 大气偏振信息的求解

将四个散射光电场强度分量  $E_{S\theta}^X, E_{S\phi}^X, E_{S\theta}^Y$  和  $E_{S\phi}^Y$  按照振动方向相同两两叠加, 获得两束强度不等、振动方向相互垂直且无固定相位差的线偏振光  $E_{S\theta}$  和  $E_{S\phi}$ , 有:

$$E_{S\theta} = A \cdot [\cos^2\theta\cos\phi(\sin\phi + \cos\phi) \cdot e_x + \cos^2\theta\sin\phi(\sin\phi + \cos\phi) \cdot e_y - \cos\theta\sin\phi(\sin\phi + \cos\phi) \cdot e_z] \quad (12)$$

$$E_{S\phi} = A \cdot [\sin\phi(\sin\phi + \cos\phi) \cdot e_x - \cos\phi(\sin\phi + \cos\phi) \cdot e_y] \quad (13)$$

由于自然光入射下瑞利散射后散射光大多为部分偏振光, 可以将线偏振光  $E_{S\theta}$  和  $E_{S\phi}$  作为散射部分偏振光的分解, 由此计算散射部分偏振光的斯托克斯矢量  $[I, M, C, S]^T$ , 有<sup>[13]</sup>:

$$\begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (E_{S\theta})^2 + (E_{S\phi})^2 \\ (E_{S\theta})^2 - (E_{S\phi})^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

大气偏振模式可由偏振度和偏振化方向来表征. 其中, 对于自然光入射下被测点  $P$  的线偏振度  $P_p$ , 可以根据定义<sup>[13]</sup>, 利用散射部分偏振光的斯托克斯矢量计算获得, 有:

$$P_p = \frac{(M^2 + C^2 + S^2)^{1/2}}{I} = \frac{1 - \cos^2\theta}{1 + \cos^2\theta} \quad (15)$$

对于偏振化方向的描述, 本文定义偏振方向矢量如下: 分别比较线偏振光  $E_{S\theta}$  和  $E_{S\phi}$  的矢量大小, 以矢量大小较大的线偏振光所对应的单位方向矢量 ( $m$  或者  $n$ , 参见式(10)、(11)) 作为被测点  $P$  的偏振方向矢量.

#### 4 大气偏振模型仿真结果与分析

为了比较本文方法与传统瑞利散射法的区别, 首先根据传统瑞利散射法在太阳高度角  $h_s = 0^\circ$ 、方位角  $\alpha_s = 90^\circ$  的条件下进行仿真实验, 由偏振度和偏振角描述大气偏振信息, 如图 5 所示. 其中, 图 5(a) 是偏振度伪彩色图, 颜色由蓝至红表示偏振度由小至大. 图 5(b) 是偏振角伪彩色图, 每一种颜色对应角度的一个区间. 由图 5 可见, 全天域偏振度分布随距离太阳角距的增大而增大, 对称性明显; 偏振角的变化规律不明显, 主要原因在于, 在三维空间中使用一维标量描述方向信息不够完备.

接下来, 本文利用 OpenGL 三维图形软件包在 Visual C++ 上, 就以上提出的基于电矢量描述的大气偏振

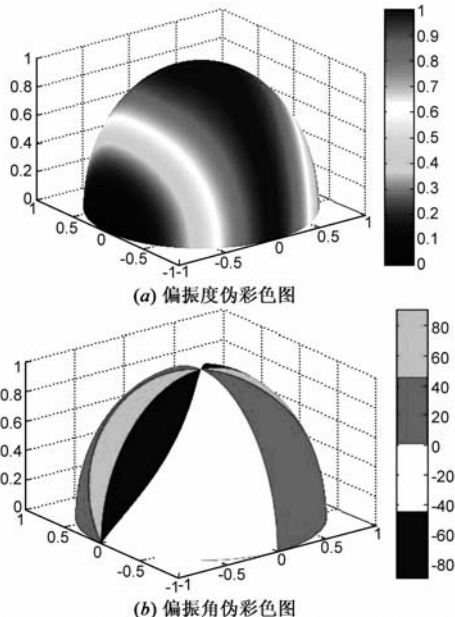


图5 传统瑞利散射法中大气偏振模式仿真结果

建模方法进行仿真实验. 理想情况下散射源于大气中的空气分子, 而氮气近似占空气分子总量的 78%, 因此选择氮气分子作为散射粒子, 取  $a = 32\text{nm}$ ,  $n_1 = 1.000297$ . 又由于空气分子在大气层内分布在自地表以上 90km 范围内, 取  $R = 90\text{km}$ . 此外, 入射光是自然光, 波长的取值范围为 (390nm, 780nm), 模型取其平均值, 有  $\lambda = 550\text{nm}$ . 模型选取统一观测日期是 2009 年 3 月 1 日.

理想情况下大气偏振模式与观测点位置、太阳位置密切相关.

**实验 1** 考察大气偏振模式与太阳位置的关系, 选择中国合肥作为唯一观测点, 经度为  $E117^\circ 17'$ , 纬度为  $N31^\circ 52'$ . 由于太阳位置随观测时刻变化而变化, 由 0 时至 24 时, 每隔 3 分钟采样观测时刻, 计算出满足太阳高度角  $h_s > 0$  的各个太阳位置, 天球表面太阳投影点轨迹如图 6 所示. 选取观测时刻为 8:00、11:00、14:00 及 17:00, 对应 4 个太阳位置 S1、S2、S3 及 S4, 分别计算当时的大气偏振信息分布情况. 各观测时刻下太阳位置参数如表 1 所示.

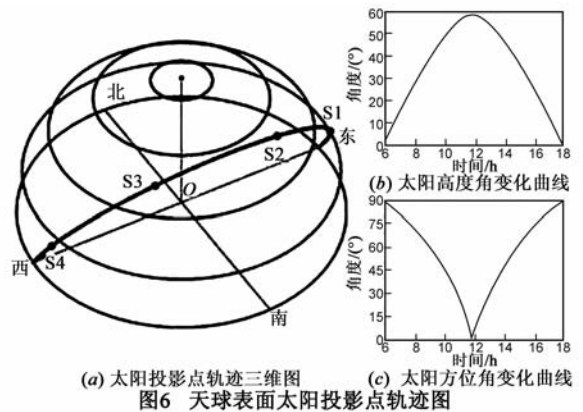


图6 天球表面太阳投影点轨迹图

表 1 同一观测地点, 不同观测时刻下太阳位置参数

太阳位置	S1	S2	S3	S4
太阳高度角( $^\circ$ )	21.61	53.5	50.42	16.76
太阳方位角( $^\circ$ )	76.27	34.29	317.65	280.29

在天球表面上, 按照高度角每隔  $10^\circ$ 、方位角每隔  $20^\circ$  的采样间隔, 共采样 324 个被测点. 同一观测地点、四个观测时刻下的全天域大气偏振模型仿真结果如图 7 所示. 其中,  $O$  点代表观测点, S1、S2、S3 及 S4 代表四个时刻下的太阳投影点, 太阳投影点与观测点连线代表入射太阳光方向. 偏振信息用短线表示, 偏振度决定短线的宽度及长度, 宽度及长度越大, 偏振度越大 ( $0 \sim 100\%$ ); 偏振方向矢量决定短线的指向, 与偏振角这一标量相比, 偏振方向矢量在三维空间中能够提供三维方向信息, 更加完备准确.

从图 7 可见, 当观测点位置不变, 理想情况下大气

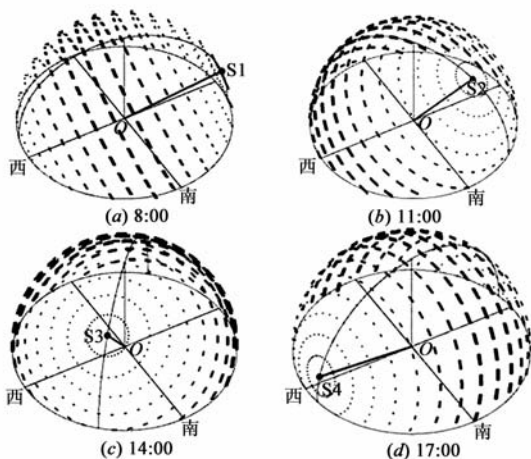


图7 同一观测点、不同观测时刻下大气偏振模型仿真结果

偏振模式跟随太阳位置不断变化,但全天保持以下特性:(1)被测点的偏振度随着被测点与太阳之间角距的增加而增大,与太阳角距为 $90^\circ$ 的位置处偏振度达到最大,理想情况下最大偏振度为100%,即该位置处的散射光是线偏振光;(2)被测点的偏振化方向均垂直于由太阳投影点、观测点及该被测点所构成的平面;(3)全天域大气偏振模式关于太阳子午线和反太阳子午线构成的平面对称。

**实验 2** 考察大气偏振模式与观测点位置的关系,选择唯一观测时刻为 11:00.分别选取中国哈尔滨(记作 O1)、乌鲁木齐(O2)、北京(O3)以及合肥(O4)作为观测点,计算当时的大气偏振信息分布情况.各观测点经纬度及当前时刻下太阳位置参数如表 2 所示。

表 2 同一观测时刻、不同观测点下太阳位置参数

观测点位置	O1	O2	O3	O4
观测点经度	E126°36'	E87°36'	E116°46'	E117°17'
观测点纬度	N45°44'	N43°45'	N39°92'	N31°52'
太阳高度角( $^\circ$ )	43.77	28.44	45.91	53.5
太阳方位角( $^\circ$ )	14.29	59.51	29.6	34.29

被测点选取方法同实验 1,同一观测时刻、四个观测点下的全天域大气偏振模型仿真结果如图 8 所示.其中,S 点代表太阳投影点,O1、O2、O3 及 O4 代表四个不同观测点.偏振信息的表示方法同实验 1。

从图 8 可见,尽管观测时刻相同,但观测点地理位置不同,对应的太阳位置就会不同,理想情况下大气偏振模式也会随之发生变化.但全天域大气偏振模式的特性与实验一描述的特性完全一致.由本文方法得到的仿真结果与晴朗天气下大气偏振模式的观测情况相符<sup>[4,9]</sup>;偏振度的分布规律与传统瑞利散射法的结论一致<sup>[8]</sup>;偏振方向矢量在三维空间中变化规律明显,在描述偏振化方向上相比于偏振角更加完备.由此可以说明,本文提出的一种理想情况下大气偏振模式建模方法是正确有效的。

由于实际大气偏振模式的其它影响过程,如地表的反射、传输损耗等都能以散射光电场强度矢量作为输入,因此,本方法能够为实际大气偏振建模提供参考数据,与不具备扩展性的传统方法相比,本方法具有一定的扩展性和应用价值.本文设计了理想大气偏振信息数据库,包含的属性有:观测地点、观测日期、观测时刻、被测点位置、散射光电场强度矢量大小、散射光电场强度矢量方向以及散射光斯托克斯矢量.理想大气偏振信息数据库能够有效缩短实际大气偏振模型的在线建模时间。

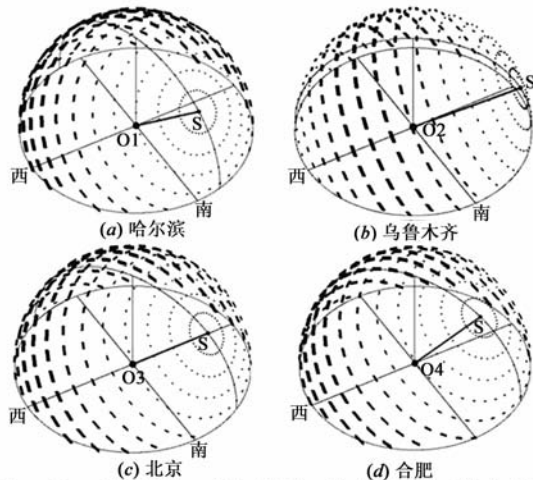


图8 同一观测时刻、不同观测点下大气偏振模型仿真结果

## 5 结论

本文通过理论分析与仿真实验认为,传统瑞利散射法无法由理想模型扩展至实际模型,且偏振角在描述偏振化方向时不够完备.因此,本文对传统瑞利散射法进行改进,采用电场强度矢量描述光波,分别建立天球坐标系与东北天坐标系,计算各点散射光电场强度矢量,获得偏振度,并定义偏振方向矢量代替偏振角描述方向信息.通过仿真实验验证,得出以下结论:

(1)该方法为理想情况下大气偏振信息的求解提供了一种新的思路。

(2)采用电场强度矢量描述光波,能够直接反映光的偏振特性,适用于大气偏振模式形成的各个物理过程分析。

(3)定义东北天坐标系,在当前时刻对于天球表面所有被测点姿态一致,适用于全天域多点单次瑞利散射过程分析。

(4)定义偏振方向矢量,相比于现有模型的偏振角,在描述偏振方向信息时更加准确完备。

(5)该方法获得的电矢量数据可以作为实际大气偏振建模的参考信息,模型具有一定的扩展性和应用价值。

本文是研究实际大气偏振建模工作的基础,提供了大量接口数据.下一步工作主要是在该方法的基础上,引入光的反射、传输损耗等其他影响因素,构建实际大气偏振模型并仿真,将仿真结果与实际数据相比较,修正模型参数,由仿真数据结合实测结果探寻实际大气偏振模式的变化规律,为仿生偏振光导航与定位研究工作提供理论依据.

#### 参考文献:

- [1] R Wehner. Polarization vision – a uniform sensory capacity? [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(14): 2589 – 2596.
- [2] R Hegedüs, S Åkesson, R Wehner, G Horváth. Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2007, 463(2080): 1081 – 1095.
- [3] A Barta, G Horváth. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, 226(4): 429 – 437.
- [4] O V Postlyakov, O S Ugolnikov, I A Maslov, A N Masleev. Polarization of the twilight sky: measurements, empirical model, radiative transfer simulation and application to aerosol profile retrieval [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 13842 – 13855.
- [5] 吴春明, 钱徽, 朱森良. 大气效果绘制的若干问题研究 [J]. *电子学报*, 2005, 33(8): 1403 – 1406.  
Wu Chun-ming, Qian Hui, Zhu Miao-lian. Some problems about rendering atmospheric effect [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(8): 1403 – 1406. (in Chinese)
- [6] 赵永强, 潘泉, 陈玉春, 张洪才. 基于偏振成像技术和图像融合理论杂乱背景压缩 [J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 433 – 435.  
Zhao Yong-qiang, Pan Quan, Chen Yu-chun, Zhang Hong-cai. Clutter reduction based on polarization imaging technology and image fusion theory [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 433 – 435. (in Chinese)
- [7] 王宇舟, 金声震. 空间太阳望远镜的图象预处理系统研制 [J]. *电子学报*, 2005, 33(7): 1291 – 1294.  
Wang Yu-zhou, Jin Sheng-zhe. Development of image pre-processing system for space solar telescope [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(7): 1291 – 1294. (in Chinese)
- [8] B Suhai, G Horváth. How well does the Rayleigh model describe the 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.

- [9] J Gál, G Horváth, V B Meyer-Rochow, R Wehner. Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland North of the arctic circle [J]. *Proceedings of the royal society A*, 2001, 457(2010): 1385 – 1399.
- [10] G Horváth, B Bernáth, B Suhai, A Barta, R Wehner. First observation of the fourth neutral polarization point in the atmosphere [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(10): 2085 – 2099.
- [11] M V Berry, M R Dennis, R L Lee Jr. Polarization singularities in the clear sky [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(162): 1 – 14.
- [12] A Wilkie, R F Tobler, C Ulbricht, G Zotti, W Purgathofer. An analytical model for skylight polarization [A]. *Proceedings of the 15th Eurographics Workshop on Rendering Techniques [C]*. Norköping, Sweden: Eurographics Association, 2004. 387 – 398.
- [13] K N LIOU. 大气辐射导论(第2版) [M]. 北京: 气象出版社, 2004. 174 – 214.  
K N LIOU. *An Introduction to Atmospheric Radiation (second edition)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 174 – 214. (in Chinese)
- [14] 王文武, 孙枫, 刘承香, 王树甫, 谢荣生. 太阳系天体视位置的长期计算法 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2000, 21(5): 18 – 23.  
WANG W, SUN F, LIU C, WANG S, XIE R. The algorithm continuously used to calculate the apparent place of celestial body in the solar system [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2000, 21(5): 18 – 23. (in Chinese)

#### 作者简介:



张旭东 男, 1966 年 11 月出生于安徽合肥. 合肥工业大学计算机与信息学院副教授、硕士生导师. 主要从事智能信息处理、计算机视觉等方面的研究工作.

E-mail: xudong1118@163.com



林金 女, 1987 年 3 月出生于安徽颍上. 2007 年毕业于合肥工业大学电子信息工程系, 同年进入该校信号与信息处理专业, 现为硕士生, 从事智能信息处理方面的有关研究.

E-mail: gray0779@yahoo.cn