

# 高光谱场景辐亮度模型仿真研究

魏斌<sup>1</sup>, 赵继广<sup>2</sup>, 黄璜<sup>1</sup>

(1. 解放军航天工程大学 研究生院, 北京 101416;

2. 解放军航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416)

**摘要:** 高光谱遥感的地面场景是高光谱遥感系统中影响因素最复杂多变的因素; 首先基于星载高光谱遥感成像的辐射传输过程, 对非均匀的朗伯表面的入瞳处大气辐亮度传输模型进行了研究, 得到只需要考虑目标与邻近像元反射率, 大气传输因子的辐亮度简化模型; 之后介绍了大气中光子扩散原理, 并采用蒙特卡洛方法对大气点扩散函数进行仿真; 联合地表目标像元反射率数据计算得到基于非均匀朗伯面地表的邻近像元反射率; 然后总结了大气传输模型软件 MODTRAN 计算入瞳处辐亮度数据的原理步骤, 并利用其反演了朗伯表面的相关大气传输参数; 最终利用基于传感器入瞳处的辐亮度数据表征了高光谱地面场景。

**关键词:** 高光谱; 场景仿真; 辐亮度; 蒙特卡洛; MODTRAN

## Study on Radiance Model Simulation of Hyperspectral Scene

Wei Bin<sup>1</sup>, Zhao Jiguang<sup>1</sup>, Huang Huang<sup>1</sup>

(1. Graduate College, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Electronics and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Hyperspectral ground scenes are the most complex and influential factors in the hyperspectral remote sensing system. Based on the radiative transmission process of satellite-borne hyperspectral remote sense, researched the radiative transmission model of the atmosphere at the entrance pupil of a non-uniform Lambertian surface. Simplified the model considered the reflectance of the target and neighboring pixels, and the radiance of the atmospheric transmission factor. Introduced the principle of photon diffusion in the atmosphere, and used the Monte Carlo method to simulate the atmospheric diffusion function. Calculated the reflectivity of neighboring cells based on the non-uniform Lambertian surface by combining the reflectance data of the target surface. Summarized the principle and steps of the radiance data at the entrance pupil for MOTDRAN, and used it to invert the relevant atmospheric transmission parameters of the Lambertian surface. Finally used radiance data based on the entrance pupil of the sensor to characterize the hyperspectral ground scene.

**Keywords:** hyperspectral; scene simulation; radiance; Monte Carlo; MODTRAN

## 0 引言

星载高光谱遥感的辐射传输路径是: 太阳光谱辐射经过大气反射、散射、吸收等影响后, 到达地表; 在被地物反射后, 其反射辐射再次经过大气影响, 并与大气直接反射的太阳辐射一起构成传感器入瞳前的辐亮度数据, 进入传感器中的辐射能量通过传感器的辐射维、空间维、光谱维离散采样后输出数字图像。这一过程可以分为场景系统和传感器系统。其中, 场景系统作为整个高光谱遥感体系中影响因素最复杂多变的因素, 尚未建立完备的模型来全面分析。

目前主要有两种方法对地面场景高光谱特性仿真。第一种是人工描绘场景中各物体的三维形貌, 并利用材质光谱结合纹理图设定各物体的反射特性<sup>[1]</sup>, 第2种利用高分辨率的高光谱数据描述场景反射率分布<sup>[2]</sup>。对于分析单一因素对高光谱成像的影响能力来说, 以上两种方法显得过于复杂。本文以传感器入瞳前的大气辐亮度传输模型为依据,

通过简化场景的几何形态, 并将其分为地面系统和大气系统两部分, 利用地面反射率数据和 MODTRAN 大气传输软件, 实现对高光谱场景的仿真模拟。

## 1 大气辐亮度传输模型

多年来, 研究者根据辐射在地表与大气之间的传输过程出发, 针对不同的地表特性, 主要建立了以下5种典型的大气辐射传输模型<sup>[3]</sup>:

- 1) 不考虑地-气多次反弹的模型
- 2) 基于地表均一的朗伯面模型
- 3) 基于地表均一的非朗伯面模型
- 4) 基于地表非均一的朗伯面模型
- 5) 基于地表非均一的非朗伯面模型

以上5种模型的理想化程度逐渐降低, 计算精度和要考虑的参数也越来越复杂。

在高光谱遥感成像过程中, 太阳光谱辐射经过大气反射、散射、吸收等影响后, 到达地表; 在被地物反射后, 其反射辐射再次经过大气传输到达传感器入瞳处。

如图1所示, 将入射到传感器前的总辐射能量分成三部分:

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-07-25。

作者简介: 魏斌(1994-), 男, 陕西富平人, 硕士研究生, 主要从事进行高光谱卫星对地观测仿真方向的研究。

(1) 来自太阳辐射经过大气传输到达目标表面并被反射至传感器前能量：图中路径 a 和路径 b（路径 a 是太阳辐射经大气传输后直接照射地物目标，路径 b 是太阳辐射经大气多次散射后的辐射能量照射到地物目标后直接进入传感器）；(2) 来自太阳辐射经过大气传输照射到背景景物并被反射至传感器前能量：图中路径 c 和路径 d（路径 c 是太阳辐射经大气传输直接照射到背景景物，路径 d 是太阳辐射经过大气多次散射后照射到背景景物）；(3) 路径 e 是大气路径辐射，即太阳辐射被大气多次散射后，不经过地物场景反射，直接进入传感器视场内的能量。

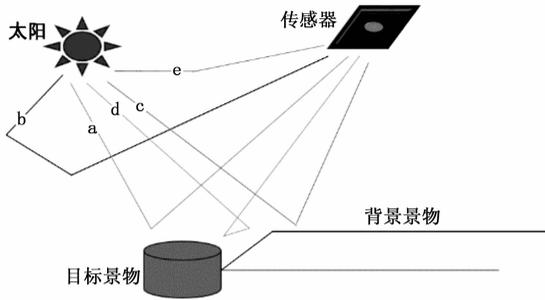


图 1 大气辐射传输路径

文献[4]总结了包含多次散射项的传感器入瞳处辐亮度。将地面看做是非均匀的，反射率为  $\rho(\lambda)$  的朗伯体时：

$$L(\lambda) = \frac{[E_s(\lambda) + E_N^*(\lambda)]\rho_e(\lambda)}{\pi} \frac{\tau_2}{1 - S(\lambda)\rho_e(\lambda)} + \frac{[E_s(\lambda) + E_N^*(\lambda)]\rho(\lambda)}{\pi} \frac{\tau_2}{1 - S(\lambda)\rho_e(\lambda)} + \frac{E_N^*(\lambda)}{\pi} \quad (1)$$

式 (1) 中， $L(\lambda)$  是传感器入瞳前辐亮度， $E_s(\lambda)$  为到达地表的太阳直接辐照度， $E_N^*(\lambda)$  为包含多次散射项的天空光辐照度， $\tau_2$  为目标地物到传感器路径的大气透过率， $\rho_e(\lambda)$  为邻近像元表面平均反射率。

在单一角度的天顶观测情况下，把场景看作非均一的朗伯面的模型时，上式可以等效为<sup>[5-7]</sup>：

$$L = \frac{A\rho}{1 - \rho_e S} + \frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} + L_a \quad (2)$$

式 (2) 中， $L$  为入瞳前传感器处像元接收的总辐亮度； $\rho$  为目标像元表面反射率； $\rho_e$  为邻近像元表面平均反射率； $S$  为大气朝下的球面反照率； $L_a$  为大气程辐射； $A$ 、 $B$  为基于大气条件和几何光照条件的系数。

式中所有的变量都为光谱波长的函数，为方便起见，波长指数被省略。等式右边第一部分代表太阳辐射经大气传输到地表反射直接进入传感器前的辐亮度；第二部分为背景景物像元经大气散射进入传感器前的辐亮度；第三部分即为大气程辐射。

等式中  $\rho_e$  需要通过大气点扩散函数对  $\rho$  处理得到，而  $A$ 、 $B$ 、 $S$  和  $L_a$  可通过大气传输模型 MODTRAN 设定观测视场角、平均海拔高度、大气模型、气溶胶类型、能见度范围等参数进行仿真反演<sup>[8]</sup>。

## 2 邻近像元反射率计算

被邻近像元反射的太阳光子通过与大气粒子的碰撞作

用被传感器接收，不考虑地气间多次反弹，即认为邻近像元对传感器接收到的总辐亮度贡献率的空间分布函数等同于光子射向地面并与大气的随机碰撞过程，最终在地面形成的光子数的相对密度空间分布函数<sup>[9]</sup>。

蒙特卡洛方法<sup>[10]</sup>是一种基于“随机数”的计算方法，将所求解的问题同一定的概率模型相联系，用计算机实现统计模拟或抽样，以获得问题的近似解，故又称随机抽样法或统计试验法。因此，选择用蒙特卡洛方法来仿真大气碰撞的随机过程。

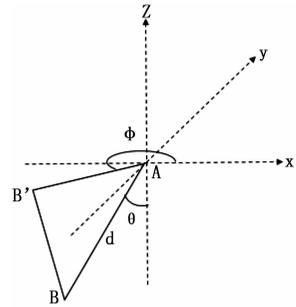


图 2 光子传输路径

光子在大气中的传输路线如图 2 所示。其中  $z$  为垂直高度， $x$ 、 $y$  为水平位置坐标。光子初始位置为  $A$  点，目标位置为  $B$  点， $B$  点在  $A$  点水平面方向的投影为  $B'$ 。 $d$  为自由路程，即光子在连续两次碰撞之间经历的路程。 $\theta$  是线段  $BA$  与  $z$  轴反方向的夹角，称为散射极角； $\Phi$  为  $BA$  与  $x$  轴正方向的夹角，称为散射方位角。散射方位角  $\Phi$  是在  $[0, 2\pi]$  内的随机数，散射极角  $\theta$  是在  $[0, \pi]$  内的随机数。

由以上分析可知，求解光子的传输路径可等效为求解  $d$ 、 $\theta$  和  $\Phi$  的值。

引入光学距离  $l$  的定义：沿自由路程对  $d$  削弱系数的积分。可由式 (3) 表示：

$$l = \int_0^d (K_s + K_a) ds \quad (3)$$

上式中， $K_s$  为大气散射系数， $K_a$  为大气吸收系数。 $l$  为无量纲量，令非碰撞概率密度函数  $P$  与  $l$  的关系为：

$$P = e^{-l} \quad (4)$$

则光子和大气粒子距离为  $l$  时的非碰撞概率可表示为：

$$r_1 = \int_0^l P(l') dl' = 1 - e^{-l} \quad (5)$$

其中： $r_1$  为区间  $[0, 1]$  的随机数。当  $l$  趋近无穷时， $r_1$  趋近 1，即相距无穷远的光子必然不发生碰撞，反之同理。则  $l$  可由式 (6) 求得：

$$l = -\ln(1 - r_1) = |\ln(1 - r_1)| \quad (6)$$

大气光学厚度定义为大气削弱系数在垂直路径自上而下的积分：

$$\tau = \int_z^0 (K_s + K_a) ds \quad (7)$$

对于水平均匀、垂直分布的大气，光学厚度  $\tau$  只和垂直高度  $Z$  有关。对应的大气光学厚度之差： $\Delta\tau = l \cos\theta$ ；根据式 (7) 中光学厚度与垂直高度的关系，可求得自由路程  $d$

$= \Delta z / \cos\theta$ , 光子的水平位移量分别为:  $\Delta x = d \sin\theta \cos\Phi$  和  $\Delta y = d \sin\theta \sin\Phi$ , 其中  $\Phi = 2\pi r_2$ ,  $\theta = \pi r_3$ ,  $r_2$ 、 $r_3$  分别为  $[0, 1]$  内的随机数。

### 3 大气传输计算

#### 3.1 大气传输影响因素

地球表层的大气主要分布在距离地球表面约 80~90 km 的低层大气中, 高层大气对太阳辐射传输几乎没有影响。底层大气中存在着多种气体以及微粒, 如尘埃、烟、雾、风、雨、雪等, 使光的传输特性发生变化。影响大气传输的最主要因素是大气分子和气溶胶的影响<sup>[11]</sup>。

大气分子主要包括  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $H_2O$  等, 其中占  $N_2$  对远红外和微波会表现出强吸收;  $O_2$  在可见光近红外波段具有 0.76  $\mu m$ 、0.688  $\mu m$ 、0.628  $\mu m$  3 个强吸收波段。 $CO_2$ 、 $H_2O$  是对可见光和近红外吸收的重要吸收分子。在太阳光谱范围内, 2  $\mu m$ 、1.6  $\mu m$ 、1.4  $\mu m$  是  $CO_2$  的 3 个主要吸收通道; 水汽对太阳辐射的吸收主要位于近红外及短波红外区, 其吸收强度与大气压、温度和光谱波长紧密相关。除上述分子外, 大气中还含有 He、Ne、Ar、Xe、 $O_3$  等少量分子, 虽然在可见光和近红外区有较强的吸收谱线, 但是含量很少, 可不考虑吸收作用。

大气中除大气分子外, 还存在尺寸较大的大量固态、液态微粒, 包括尘埃、烟粒、微水滴、盐粒及有机微生物等, 这些微粒在大气中的悬浮成溶胶状态, 称为气溶胶。气溶胶的光学特性、粒子形态等特性会因为时空不同发生剧烈变化, 深刻影响大气辐射传输过程。气溶胶的尺寸一般为 0.001~10  $\mu m$ 。气溶胶一方面使太阳辐射在传输过程中发生散射, 使返回大气层的辐射得到增强, 有色气溶胶的吸收特性还会使到达地表的太阳辐射产生衰减; 另一方面, 已经到达大气层内的太阳辐射又难以被反射出大气层。大气中存在的气溶胶主要来自两方面: 一是火山烟、风暴中的扬尘、植物的花粉、海水蒸发的盐粒等自然现象; 而是诸如化石燃料燃烧、汽车尾气等人类活动。研究者把常见的气溶胶粒子按照不同比例混合来定义其类型, 例如可用于干旱地区的沙漠型、用于受海洋季风影响严重的海洋型以及具有不同地物属性的大陆型<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 MODTRAN 软件

MODTRAN 是一个中分辨率大气辐射传输模型, 由美国空军研究实验室 (ARFL) 与光谱科技公司利用 FORTRAN 语言开发。它把 0 至 100 km 的整层大气当成 36 个均一水平的薄层气体叠置, 每薄层的光学特性通过温度、气压、气体分子的不同组合来刻画。内置了多种大气模型, 能在 0 到 50000  $cm^{-1}$  波数范围内以 1.0  $cm^{-1}$  的分辨率进行辐射传输运算。MODTRAN 利用二流近似、离散纵标等多次散射方法, 计算包含大气吸收与多次散射作用的透过率、辐照度等。目前已更新至 MODTRAN6 版本, 但由于知识产权原因, 国内一般研究人员仍普遍使用 MODTRAN4 版本。

在查阅相关 MODTRAN 文献后, 发现目前绝大部分以

性能介绍及其在遥感图像处理中大气校正应用为主题。有关于对入瞳处辐亮度计算原理和详细实现过程的说明则非常少。本文利用 MODTRAN 在 windows 环境下运行的可视化界面软件 PcModwin 进行仿真分析。

通过多次实践以及查看输出文件 MODOUT (包括 Modout1、Modout2、Modout3, 其中 Modout1 包含输出的完整结果), 初步总结了其关于辐亮度的计算过程: (1) 选择内置的大气廓线数据存储于公共数据中; (2) 将输入数据中确定的光谱分辨率和光谱范围等效为参与辐射传输计算的波数范围; (3) 将输入数据的几何观测关系等效为由传感器位置、观测天顶角、方位角几何关系; (4) 利用输入的气溶胶数据, 利用气溶胶吸收和非对称系数, 构建沿“地面到传感器高度”垂直路径的单次散射几何关系, 计算单次散射路径气溶胶吸收辐射量; (5) 在计算沿视线方向的单次散射几何关系基础上, 得到多次散射参数; (6) 根据气体分层理论, 利用多次嵌套循环方法, 计算整层大气的光谱辐亮度等参数; (7) 重采样  $1cm^{-1}$  波数的光谱辐亮度数据, 计算结束。

MODTRAN 按照计算目的不同可以分为透过率 (Transmittance)、热辐射亮度 (Thermal Radiance)、散射辐射亮度 (Radiance with Scattering)、太阳直射照度 (Direct Solar Irradiance) 4 种运行模式。

其中, 散射辐亮度模式输出结果包含表 1 所示内容。

表 1 MODTRAN 散射辐亮度模式部分输出结果

输出结果	定义
总路径透过率 (Trans. Total)	与路径类型、大气吸收与散射的衰减系数有关
热程辐射 (Path Thermal)	大气热辐射产生的辐亮度
表面辐射 (Surface Emission)	特定温度、比辐射率界面热辐射产生的辐亮度
总程辐射 (Path Total Radiance)	观察点得到的总路径辐亮度
总地面反射 (Total Ground Reflected)	太阳光地面反射产生的辐亮度, 包括太阳直射和散射反射
直接地面反射 (Direct Radiance)	太阳直射地面产生的辐亮度
总辐亮度 (Total Radiance)	观察点在视线方向接收到的辐亮度, 是热程辐射、大气太阳散射程辐射、地面反射辐亮度之和
光学深度 (Optical Depth)	衰减系数在路径方向上的积分

利用 MODTRAN 的散射辐亮度模式可以获得在特定地表反射率状态下的传感器入瞳处辐亮度, 而后通过相关数学逆推, 得到大气传输参数  $A$ 、 $B$ 、 $S$ 、 $La$ 。

## 4 仿真结果

#### 4.1 地面场景仿真

建立理想地面场景如图 3 所示, 将该场景当作非均匀的朗伯体。设定传感器空间分辨率 20 m, 光谱分辨率 10 nm, 覆盖 0.4~2.4  $\mu m$  范围, 轨道高度 600 km 并以推扫方

式对地垂直成像。把地表按照传感器空间分辨率大小为若干面元，并假设每一面元的反射率均匀分布。

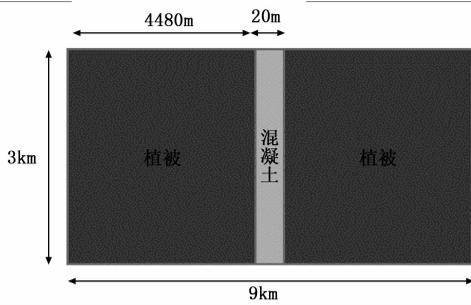


图 3 地面场景分布情况

地面反射率数据  $\rho$  来自美国 USGS 光谱库<sup>[13]</sup>，如图 4 所示，分别为典型植被和混凝土道路的反射率。典型植被的波谱特性是在可见光波段的  $0.55 \mu\text{m}$  附近有一个小的反射峰，在  $0.45 \mu\text{m}$  和  $0.65 \mu\text{m}$  附近有 2 个吸收谷；在近红外波段， $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$  处反射率急速升高，并在  $0.8 \sim 1.3 \mu\text{m}$  处形成一个平缓的高反射率平台，在  $1.4 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \mu\text{m}$  附近各有一个吸收谷。与混凝土的反射率情况相比，在波长  $0.8 \sim 1.3 \mu\text{m}$  处的反射率大于混凝土道路，在其他波长时情况相反。

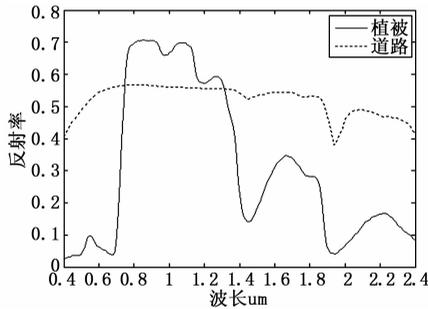


图 4 不同地物反射率曲线

图 5、图 6 分别描述了地表反射率分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1.0 \mu\text{m}$  波长时的仿真结果，可见该结果与图 4 的描述相符，即在  $0.5 \mu\text{m}$  时混凝土反射率高于典型植被，在  $1.0 \mu\text{m}$  时情况相反。

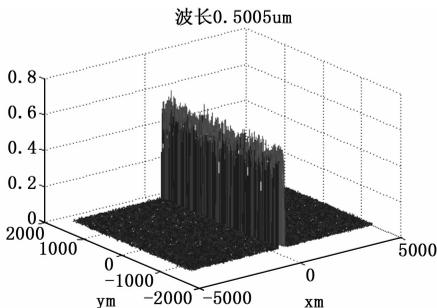


图 5 波长为  $0.5 \mu\text{m}$  时地面反射率

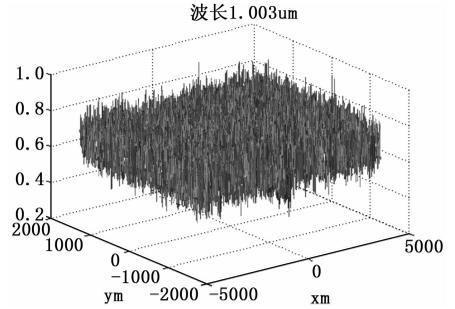


图 6 波长为  $1.0 \mu\text{m}$  时地面反射率

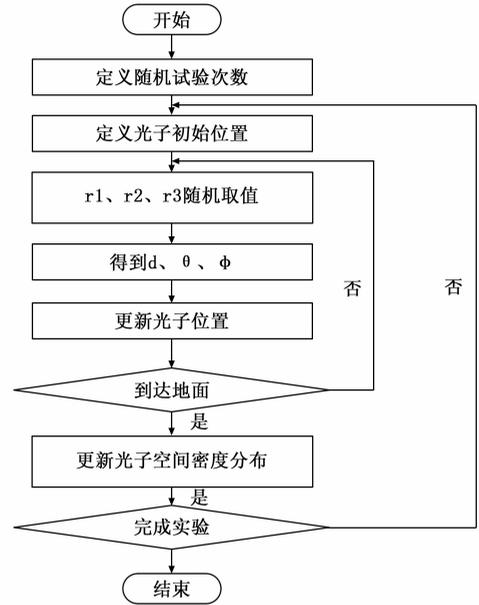


图 7 蒙特卡洛仿真点扩散函数流程

经过不断循环，直到光子到达地面，得到图 8 的光子分布密度图。

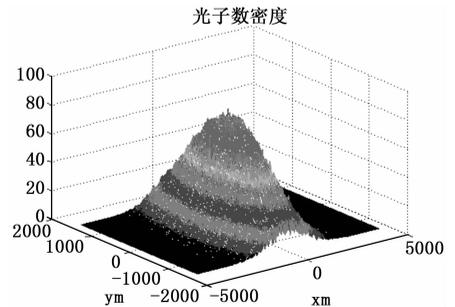


图 8 光子密度图

蒙特卡洛逼真描述了光子的传输过程，其结果是靠大量的统计数据的分析获得的。得到点扩散函数后，对 4.1 节中的反射率数据  $\rho$  进行平滑处理可以得到邻近像元反射率  $\rho_e$ 。如图 9 所示， $\rho_e(0.5)$  为波长  $0.5 \mu\text{m}$  时的邻近像元反射率情况。

#### 4.2 邻近像元反射率仿真结果

根据第 2 节所述，利用蒙特卡罗方法仿真大气点扩散函数的过程如图 7 所示。

#### 4.3 大气参数仿真计算

利用 MODTRAN 计算大气传输特性的参数。设置模式如表 2 所示，在运行 MODTRAN 时选择 DISORT 多次散射

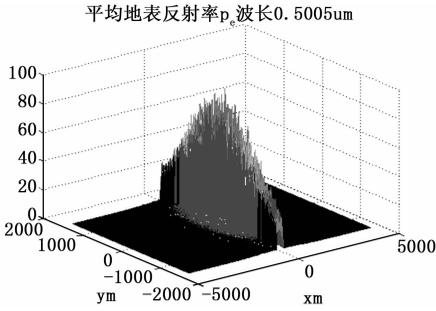


图 9 波长 0.5 μm 时的邻近像元反射率

算法, 通常设置散射算法流数为 8, 同时在地面反射率设置中, 将地面反射率 (Ground Albedo) 分别设置为 0、0.5、1<sup>[14]</sup>, 得到 3 种情况下总的 TOT (传感器接收的总辐亮度)、PATH (多次散射程辐射)、TGR (总地面反射辐亮度)。

表 2 包含多次散射的辐亮度计算步骤

参数设置选项卡	参数设置
大气模式	中纬度夏天
大气路径	斜程大气
执行模式	散射辐亮度;
CO <sub>2</sub> 混合比	360
温度	中纬度夏季模式
气溶胶类型	乡村环境
能见度	VIS=23km, 无云雨
场景海拔高度	海平面 0km
传感器高度	100km
观测天顶角	180°

通过 MODTRAN 仿真得到以上结果后, 则关于式 (1) 的相关参数 S、A、B、La 可由式 (8) 仿真得到:

$$\begin{cases} S = \frac{\Delta TOT_1 - 2\Delta TOT_{0.5}}{\Delta TOT_1 - \Delta TOT_{0.5}} \\ A = (1 - S)\Delta TGR_1 \\ B = (1 - S)\Delta PATH_1 \\ La = PATH_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $PATH_0$  是地面反射率为 0 的大气程辐射值;  $\Delta TGR_1$  是地面反射率分别为 1 和 0 时地面总反射辐亮度的差值;  $\Delta PATH_1$  是地面反射率分别为 1 和 0 时的大气程辐射差值;  $\Delta TOT_1$  是地面反射率分别为 1 和 0 时传感器入瞳前总辐亮度差值;  $\Delta TOT_{0.5}$  地面反射率分别为 0.5 和 0 时传感器入瞳前总辐亮度差值。

由式 (8) 计算的参数 S、A、B 以及程辐射 La 的结果为图 10, 需要注意的是, S 中的峰值为算式中分母为 0 时出现的极化现象, 上述求得的几类参数均为需求大气条件时的值, 当大气条件改变时, 反演得到的参数值随之改变。

#### 4.4 地面场景的入瞳处辐亮度

利用 4.1 节、4.2 节和 4.3 节计算结果, 结合大气传输公式, 就得到高光谱遥感入瞳处辐亮度数据。如图 11、12 所示为波长为 0.49 μm 时, 地面场景的入瞳处辐亮度仿真结果。

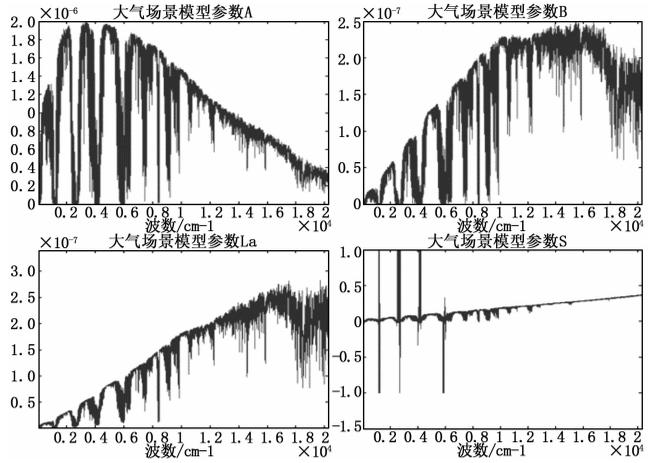


图 10 A、B、La、S 仿真结果

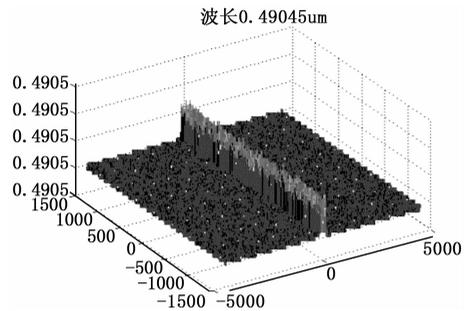


图 11 波长 0.49 μm 时入瞳处辐亮度

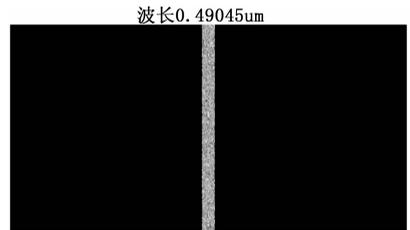


图 12 波长 0.49 μm 时辐亮度灰度图

从图中可以看出, 虽然混凝土道路上像元的入瞳处辐亮度仍然大于两边植被对应的像元辐亮度, 但与反射率数据相比, 出现了明显弱化, 这主要是因为在大气传输过程中的衰减造成的。

### 5 总结

本文采取基于地表非均匀的朗伯面大气场景模型, 利用蒙特卡罗算法仿真大气点扩散函数, 得到了包含邻近效应的地表平均反射率; 在对 MODTRAN 软件原理分析基础上, 考虑多次散射效应, 获得了传感器入瞳处的辐亮度数据。最后对给定的波长为 0.4~2.4 μm 范围的高光谱地面场景进行了仿真。根据结果来看, 本文采用的方法实现了对预定场景在光谱尺度的仿真。但是本文的方法忽略了地面几何和辐射能量入射角度等因素造成的辐亮度变化情况, 还具有一定的改进空间。