

8-20-2020

## Infrared Radiation Modeling of Planets Based on VSOP87 Theory

Guo Feng

*School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

Xiaojian Xu

*School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Infrared Radiation Modeling of Planets Based on VSOP87 Theory

### Abstract

**Abstract:** Based on the Variations Seculaires des Orbites Planetaires (VSOP) 87 theory, an approach for generating infrared radiant scene of planetary background was presented. With the VSOP87 theory, the heliocentric coordinates of eight planets in the solar system were worked out at given time. The coordinates were revised by time correction so that real coordinates were achieved. The corrected heliocentric ecliptic coordinates of planets were converted into geocentric horizontal coordinates according to the position of the observer. After that, the projected coordinates and projected radiuses of planets were achieved from projection transformation based on the field of view (FOV) and line of sight, then which planet appeared in the FOV was realized. In accordance with the radiant calculation, the irradiance at the sensor of planets was computed, and the infrared radiant image of planets in given FOV was generated. With these steps, a model which can simulate the infrared radiation of planets in the given FOV at any given condition was achieved.

### Keywords

planets, solar system, infrared radiation, scene generation

### Recommended Citation

Guo Feng, Xu Xiaojian. Infrared Radiation Modeling of Planets Based on VSOP87 Theory[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 643-648.

# 基于 VSOP87 理论的行星红外辐射场景生成模型

郭枫, 许小剑

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 提出了一种基于行星轨道长期变化(VSOP)87 理论的行星红外辐射场景生成模型。利用 VSOP87 理论计算出给定时刻太阳系内八大行星在日心坐标系下的黄道坐标, 对坐标进行时间修正得到修正后的真实坐标。根据观测者所处位置, 对修正后的行星黄道坐标进行坐标转换, 得到行星相对观测者的地平坐标。根据视轴方向和视场大小通过投影变换得到成像平面内各行星的投影坐标及投影半径, 进而判断出行星是否出现在视场内。通过辐射计算求得各行星在传感器处的辐射照度, 可仿真得到视场内行星的辐射图像。实现能够模拟在任意给定条件下视场内行星的红外辐射图像。

**关键词:** 行星; 太阳系; 红外辐射; 场景生成

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 03-0643-07

## Infrared Radiation Modeling of Planets Based on VSOP87 Theory

Guo Feng, Xu Xiaojian

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Based on the Variations Seculaires des Orbites Planetaires (VSOP) 87 theory, an approach for generating infrared radiant scene of planetary background was presented. With the VSOP87 theory, the heliocentric coordinates of eight planets in the solar system were worked out at given time. The coordinates were revised by time correction so that real coordinates were achieved. *The corrected heliocentric ecliptic coordinates of planets were converted into geocentric horizontal coordinates according to the position of the observer. After that, the projected coordinates and projected radiuses of planets were achieved from projection transformation based on the field of view (FOV) and line of sight, then which planet appeared in the FOV was realized. In accordance with the radiant calculation, the irradiance at the sensor of planets was computed, and the infrared radiant image of planets in given FOV was generated. With these steps, a model which can simulate the infrared radiation of planets in the given FOV at any given condition was achieved.*

**Keywords:** planets; solar system; infrared radiation; scene generation

## 引言

在空间和弹道导弹目标探测跟踪与识别过程中, 当传感器视线指向天空时, 太阳系内的行星可

能会进入传感器视场对探测识别结果造成影响, 因此, 行星背景红外辐射特性的研究在目标探测与识别中有着重要的意义。

每颗行星均有其独特的运行轨道和光散射辐射特性, 这些位置及辐射特性模型与探测识别传感器模型相结合, 可完成行星光辐射特性的高逼真度仿真和场景生成。国外对行星辐射与散射的研究主要有 1982 年 Bretagnon 提出的 VSOP82 理论<sup>[1]</sup>, 该



收稿日期: 2014-03-19

修回日期: 2014-06-04;

作者简介: 郭枫(1990-), 男, 河南, 硕士生, 研究方向为虚拟现实仿真, 星空背景辐射场景成像; 许小剑(1963-), 男, 江西, 博导, 教授, 研究方向为雷达特性、目标识别和传感器系统建模。

<http://www.china-simulation.com>

• 643 •

理论是一个描述太阳系内行星轨道在相当长时间范围内周期变化的半分析理论, 提供了对几大行星位置计算的周期序列, 通过对周期序列进行正弦或余弦项累加求和, 可以得到这个行星在给定时间的椭圆轨道参数。1988 年 Bretagnon 和 Francou 创建了 VSOP87 理论<sup>[2]</sup>, 提供了 6 种较高精度计算日心坐标系下八大行星相对太阳的黄道坐标, 可以根据需要较为方便的计算球坐标或直角坐标。Martin 等人基于 VSOP87 理论, 提供了一个易操作的 3D 模型<sup>[3]</sup>实时模拟太阳系内行星运行情况。美国空军研究实验室基于 VSOP87 理论开发了 CBAMP 模型<sup>[4]</sup>, 该模型能够模拟给定观测者所处位置时整个天空的行星背景辐射图像。目前, 介绍国内对行星背景红外辐射特性研究的文献还很少。

本文提出一种基于 VSOP87 理论的行星背景红外辐射建模与仿真的方法。首先利用 VSOP87 理论计算出在给定时间八大行星在日心坐标系下的位置坐标, 再将各位置坐标转换到地心坐标系下并进行章动、岁差和周年光行差的坐标修正, 然后通过坐标转换将该地心坐标系下坐标转换到以观测者为中心的坐标, 并投影到成像平面, 算出行星在投影平面上的中心点坐标及投影半径。最后对各行星的辐射量进行计算得到给定观测位置、观测时间、起止波长、视场和视轴指向下视场内的行星辐射量。

## 1 场景生成总流程

判断行星是否在给定视场内、以及在投影平面上的辐照度, 需要知道行星的位置和辐射量两个基本信息。为了得到任意给定时刻给定观测地点处行星的位置坐标, 首先利用 VSOP87 方法计算出日心坐标系下各行星的位置坐标, 再利用坐标转换<sup>[5]</sup>将日心坐标系下坐标转换到观测者为中心的地平坐标系下; 然后通过给定视场大小和视轴方向计算行星在投影平面上的坐标和投影半径, 并判断是否在视场投影内; 最后根据各行星的物理特性求得各

自辐射量, 结合投影坐标和辐射量最终生成二维辐射图像。

行星红外辐射场景生成的总体流程图如图 1 所示。

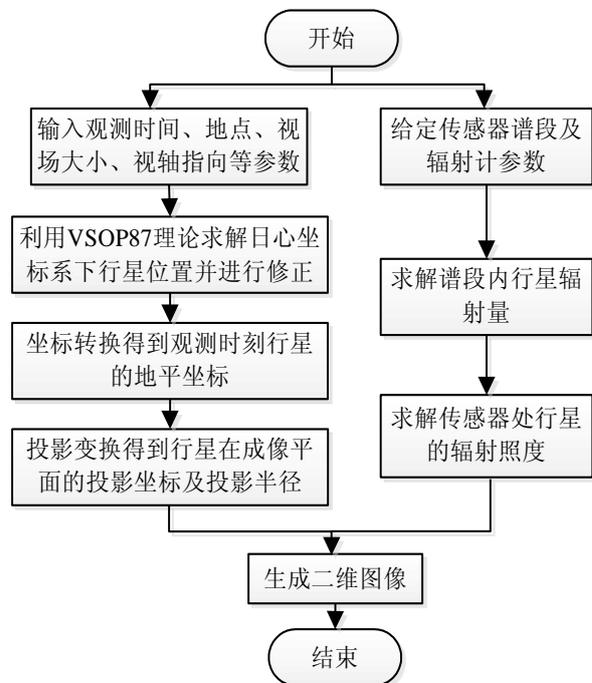


图 1 行星辐射仿真流程图

## 2 行星的视位置计算

行星的视位置计算主要包括位置计算、坐标转换和投影变换 3 个步骤。

### 2.1 位置计算

VSOP87 理论可以较为准确的计算出任意给定时刻太阳系内八大行星相对于太阳的位置分布情况。它提供了 VSOP87, VSOP87A, VSOP87B, VSOP87C, VSOP87D, VSOP87E 共 6 张周期项系数表计算太阳系内八大行星的坐标。其中 VSOP87 表计算得到相对于儒略日 2000-01-01 的椭圆轨道坐标; VSOP87A、VSOP87B 表分别得到相对于儒略日 2000-01-01 的日心直角坐标和日心球坐标; VSOP87C, VSOP87D 表分别得到相对于黄道和春分点的给定时刻日心直角坐标和日心球坐标;

VSOP87E 表得到坐标原点在太阳系质心时相对于儒略日 2000-01-01 的直角坐标。

采用直角坐标进行坐标转换, 因此计算行星位置坐标时采用 VSOP87C 周期项系数表。VSOP87C 周期项系数表包含 3 部分数据, 分别计算行星日心黄道坐标下直角坐标  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  数值。其中  $X$  轴数据又由  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  6 部分组成(有些行星只有 2 部分), 每部分都包括若干个周期项序列, 把这些周期项序列结合给定时刻的儒略世纪数进行余弦项累加求和, 可得到  $X$  轴坐标值<sup>[2]</sup>。同样方法可求得  $Y$  轴和  $Z$  轴坐标。

## 2.2 坐标转换

坐标转换包括时间转换和空间转换 2 个步骤, 是为了将上述日心坐标系下行星的位置坐标转换到以观测者为中心的地平坐标系下。

### 2.2.1 时间转换

随着时间的变化, 天极、天赤道、黄极、黄道以及春分点都有以恒星为背景的运动。以它们为基本点和基本圈的黄道坐标系就会随时改变着它们在天球上的位置。即使天体不受任何影响, 它的坐标值也会因天球坐标系的基本点、圈在空间运动而变化, 天球上这些点、圈的变化是地球在空间运动状态受其它天体摄动的结果。随时间变化而使坐标改变的主要有岁差、章动、周年光行差等因素。

章动是指在外力作用下, 地球自转轴在空间绕轴的短周期摆动而对天球坐标造成的影响。章动是由很多短周期运动叠加而成的。其中最大是运动周期为 18.6 年, 它所对应的振幅为  $9.210''$ , 此值称为章动系数。

岁差是指由于包括月球、太阳、行星等外力的作用造成黄道和赤道的空间位置变化, 使得春分点沿着黄道迎着太阳运动, 而出现回归年比恒星年短的现象, 岁差的影响使得天体的平位置随时间  $t$  而变化。

观测者具有一定的运动速度而引起的天体方向的变化称为天体的光行差现象。光行差又包括周

年光行差、周日光行差。周日光行差和周年光行差相比可以忽略不计, 因此一般只考虑周年光行差。

时间转换的目的就是对坐标进行岁差、章动、周年光行差的修正, 以得到观测时刻的真实黄道坐标<sup>[6]</sup>。

首先将日心坐标系下行星黄道坐标转换为以地球为坐标原点的地心坐标系坐标, 转换过程为:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 - X_e \\ Y_2 = Y_1 - Y_e \\ Z_2 = Z_1 - Z_e \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(X_1, Y_1, Z_1)$  为日心坐标系下行星的黄道直角坐标;  $(X_e, Y_e, Z_e)$  为日心坐标系下地球的黄道直角坐标;  $(X_2, Y_2, Z_2)$  为地心坐标系下行星的黄道直角坐标。

然后将转换后的直角坐标  $(X_2, Y_2, Z_2)$  依次左乘岁差修正矩阵  $P$ 、章动修正矩阵  $N$ 、周年光行差修正矩阵  $A$  进行修正, 得到修正后的直角坐标  $(X_3, Y_3, Z_3)$ , 各修正矩阵的求解方法可参考文献[5]。

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = P \cdot N \cdot A \cdot \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2.2 空间转换

空间转换是将时间转换得到的坐标转换到以观测者所在地为中心的地平坐标系下。

首先将地心坐标系下行星的黄道坐标转换为赤道坐标, 通过左乘旋转矩阵实现, 过程为:

$$\begin{bmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\epsilon) & -\sin(\epsilon) \\ 0 & \sin(\epsilon) & \cos(\epsilon) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $(X_4, Y_4, Z_4)$  为转换得到的行星赤道坐标,  $\epsilon$  为黄赤交角。

然后将地心下的赤道坐标转换到以观测者所在地为中心的地平坐标, 以得到行星相对于观测者所处位置的真实坐标。转换公式为:

$$\begin{cases} \sin H = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \\ \cos A \cdot \cos H = \cos \phi \cdot \sin \delta - \\ \quad \sin \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \\ \sin A \cdot \cos H = -\cos \delta \cdot \sin t \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $(A, H)$  为转换后的行星地平坐标,  $A$  为行星相对观测者的方位角,  $H$  为行星相对观测者的俯仰角;  $\delta$  为转换前的黄道赤纬, 由直角坐标转换为极坐标求得;  $\phi$  为观测地点的纬度,  $t$  为恒星时角, 其计算公式为:

$$t = S_0 - L - \alpha \quad (5)$$

式中:  $S_0$  为世界时 0 时的格林尼治恒星时;  $L$  为观测地点的经度, 且东经为正西经为负;  $\alpha$  为转换前的黄道赤经, 由直角坐标转换为极坐标求得。

### 2.3 投影变换

投影变换是将上述转换得到的地平坐标  $(A, H)$  转换到以视轴方向和投影平面构成的传感器坐标系下的坐标, 然后通过透视投影<sup>[7]</sup>得到各行星在投影平面上中心点的二维坐标值, 以及在投影平面上的投影半径。通过比较传感器成像平面大小和行星投影坐标、传感器像素边长及行星投影半径, 可以判断出各行星是否出现在传感器视场中及在成像平面上占据的像素个数。

首先通过左乘旋转矩阵  $\mathbf{P}'$  得到行星在传感器坐标系下的三维坐标  $(X_4, Y_4, Z_4)$ :

$$\begin{bmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{bmatrix} = \mathbf{P}' \cdot \begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $(X_h, Y_h, Z_h)$  是行星在地平坐标系下由球坐标  $(A, H)$  转换得到的直角坐标。

通过透视投影得到的行星在投影平面上的坐标  $(x, y)$  为:

$$\begin{cases} x = -X_4 \cdot f / Z_4 \\ y = -Y_4 \cdot f / Z_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $f$  为视点到投影平面之间的距离, 由传感器视场角  $FOV$  和图像边长像素值  $Num$  及单个像素单元的长度  $w$  决定:

$$f = \frac{Num \cdot w}{2 \tan(FOV / 2)} \quad (8)$$

行星在成像平面上的投影半径  $r$  为:

$$r = R_p \cdot f / Z_4 \quad (9)$$

式中:  $R_p$  为行星的半径。对于不同观测时刻, 由于地球与行星之间相对运动, 通过投影得到的中心点坐标和投影半径也是不同的。

### 3 传感器谱段内辐射量计算

太阳系内太阳源源不断向外辐射能量, 行星吸收太阳辐射能量使自身温度升高, 同时又向外辐射能量。最终行星吸收的能量与辐射的能量相同, 达到能量平衡。对于灰体辐射源, 斯蒂芬-玻尔兹曼准则描述了辐射源向外辐射的能量  $E$  与有效温度  $T_e$  之间的关系:

$$E = \varepsilon \sigma T_e^4 \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon$  为辐射源的发射率, 为介于 0 到 1 之间的数, 若辐射源为黑体则  $\varepsilon$  为 1;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为  $5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ;  $E$  为辐射源单位面积上辐射出的能量。

假定太阳可视为有效温度为 5 779 K 的黑体, 即满足发射率  $\varepsilon=1$  的斯蒂芬-玻尔兹曼准则, 则太阳辐射出的总能量  $E_s$  为:

$$E_s = 4\pi R_s^2 \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

式中:  $T$  为太阳的有效温度 5 779 K,  $R_s$  为太阳的半径。太阳辐射出的能量以球状辐射到整个空间, 距离太阳  $l$  处的行星被太阳照射并吸收的能量  $P_i$  为:

$$P_i = \sigma T^4 R_s^4 \pi R_p^2 (1-A) / l^2 \quad (12)$$

式中:  $R_p$  为行星的半径;  $A$  为行星的球面反射率;  $l$  为行星到太阳之间的距离。

假定行星也为黑体, 则其单位面积上向外辐射的能量满足式(9), 且光谱发射率  $\varepsilon(\lambda)=1$ , 即不随波长变化。可知行星整个球面向外辐射的总能量  $P_o$  为:

$$P_o = 4\pi R_p^2 \sigma T_p^4 \quad (13)$$

式中:  $T_p$  为行星的有效温度。

当行星吸收的能量  $P_i$  与辐射的能量  $P_o$  相同时, 达到温度平衡, 联立方程(10)和(11)求解可得到行星的有效温度。然而实际中由于金星、地球及火星周围环绕着大气层, 大气层造成的温室效应会使行星的实际有效温度比计算出的偏高。另外对于大行星, 因为有内部热源的影响, 也会使实际有效温度偏高。美国国家航空和宇航航局(NASA)给出了太阳系内八大行星的详细物理参数<sup>[8]</sup>。表 1 给出了计算行星有效温度过程中用到的行星数据参数及用上述方法计算出的行星有效温度。

表 1 行星物理特性参数

|     | 平均半径<br>/km | 相距太阳<br>距离/ $10^6$ km | 球面<br>反射率 | 有效<br>温度/K |
|-----|-------------|-----------------------|-----------|------------|
| 水星  | 2440        | 57.9                  | 0.068     | 440.1      |
| 金星  | 6051        | 108.2                 | 0.9       | 184.2      |
| 地球  | 6372        | 149.6                 | 0.306     | 254.3      |
| 火星  | 3389        | 227.6                 | 0.25      | 210.1      |
| 木星  | 71492       | 778.6                 | 0.343     | 110        |
| 土星  | 60268       | 1433.5                | 0.342     | 81.1       |
| 天王星 | 25559       | 2872.5                | 0.3       | 58.2       |
| 海王星 | 24764       | 4495.1                | 0.29      | 46.6       |

假设行星均为朗伯辐射源, 求出行星有效温度即等效黑体温度之后, 可利用普朗克函数求解已知温度  $T$  和波长  $\lambda$  下行星的光谱辐射出射度  $M_{\lambda bb}$ 。若给定传感器的起止波长值  $\lambda_s, \lambda_e$ , 可通过对整个波段上积分求和求得波段内行星的辐射出射度  $M_{bb}$ :

$$M_{bb} = \int_{\lambda_s}^{\lambda_e} M_{\lambda bb} F(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

式中:  $F(\lambda)$  为传感器在积分谱段上的响应函数。

行星在传感器处产生的辐射照度<sup>[9]</sup>示意图如图 2 所示, 设行星在立体角  $\Delta\Omega_s$  内的截面积为  $\Delta A_s$ , 辐射亮度为  $L$ , 被照面面积为  $\Delta A$ , 行星与传感器相距为  $l$ ,  $\Delta A$  的法线与  $l$  的夹角为  $\theta$ , 则行星在传感器处产生的辐射照度为:

$$I = \frac{L\Delta A_s \cos(\theta)}{l^2} \quad (15)$$

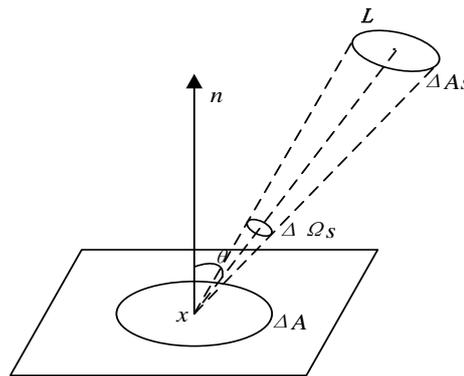


图 2 行星产生的辐射照度

### 4 仿真结果与分析

计算出行星在成像平面上的中心点位置坐标、投影半径及辐射照度之后, 就可以生成视场内行星的红外辐射图像。考虑到实际传感器中光学系统的弥散特性, 成像过程中需要卷积点扩散函数来模拟实际成像效果。

本文分别选用中段空间实验(MSX)中使用的空间红外成像传感器(SPIRIT) III 的辐射计 A 谱段和 E 谱段<sup>[10]</sup>作为积分谱段进行行星红外辐射场景仿真, 表 2 给出了该辐射计各谱段的波长范围及相应的灵敏度。

表 2 SPIRIT III 辐射计谱段参数

| 波段 | 谱段范围( $\mu\text{m}$ ) | 灵敏度( $10^{-18} \text{ W/cm}^2$ ) |
|----|-----------------------|----------------------------------|
| A  | 6.0-10.9              | 1.1                              |
| B1 | 4.22-4.36             | 10                               |
| B2 | 4.24-4.45             | 10                               |
| C  | 11.1-13.2             | 0.8                              |
| D  | 13.5-16.0             | 0.7                              |
| E  | 18.1-26.0             | 1.7                              |

作为第一个例子, 图 3 分别示出了 A 谱段和 E 谱段下视场内行星红外辐射图像仿真结果, 其中水平方向为方位向, 垂直方向为俯仰向。仿真条件如下: 观测时间为世界时 2010-10-01 12:00; 观测者坐标为东经  $116.07^\circ$ 、北纬  $33.15^\circ$ ; 视轴指向为方位角  $260.4^\circ$ 、仰角  $21^\circ$ ; 传感器像素个数为  $256 \times 256$ , 每个像素单元的边长为  $27 \mu\text{m}$ , 瞬时视场角为  $20 \times 20 \mu\text{rad}$ , 总视场为  $0.3 \times 0.3^\circ$ ; 假定传感器光谱响应度为 1。

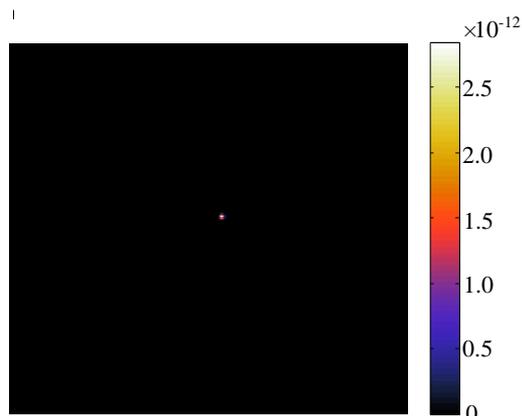
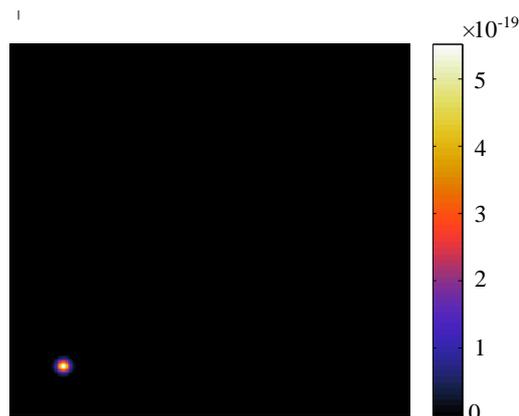
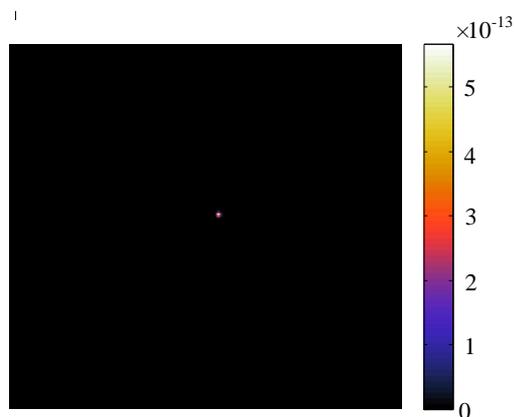
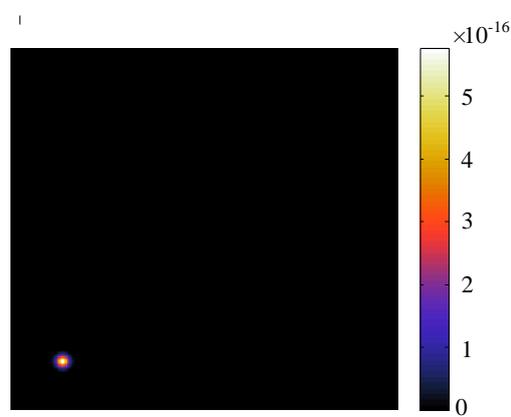
(a) A 谱段行星辐射  $W/cm^2$ (a) A 谱段行星辐射  $W/cm^2$ (b) E 谱段行星辐射  $W/cm^2$ (b) E 谱段行星辐射  $W/cm^2$ 

图 3 行星红外辐射图像仿真图像

图 4 行星红外辐射图像仿真图像

观察图像右边的色度条数值, 分别把 A 谱段、E 谱段行星的辐射量和表 2 中对应谱段的灵敏度对比可知, 两个谱段行星的辐射量均大于辐射计灵敏度, 故此仿真条件下两个谱段均能检测到行星。通过判断行星在投影平面上出现的位置及在传感器图像中所占像素个数可知该行星应为水星。

图 4 示出了方位角和俯仰角分别为  $248.7^\circ$  和  $27.6^\circ$ ; 其余仿真条件与图 3 条件同时的 A 谱段和 E 谱段行星红外辐射仿真图像。

分别把 A 谱段和 E 谱段行星的辐射量和表 2 中对应谱段的灵敏度对比可知, 此仿真条件下 A 谱段辐射量小于辐射计灵敏度, E 谱段辐射量大于辐射计灵敏度。可见在此观测条件下 A 谱段无法检测到行星, 而 E 谱段可检测到行星。通过判断行星在投影平面上出现的位置及在传感器图像中所占像素个数可知该行星应为土星。

## 5 结论

基于 VSOP87 理论计算八大行星在太阳系中日心坐标的方法, 提出了在给定观测时间、观测者位置、视轴方向、视场大小以及传感器起止波长条件下, 判断各行星是否出现在传感器视场内, 以及模拟视场及谱段内行星红外辐射特性的方法。本文所建立的行星红外辐射场景生成模型在空间和弹道导弹目标探测跟踪与识别, 以及对星空背景场景的仿真中具有重要作用。

### 参考文献:

- [1] P Bretagnon. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes, Solution VSOP82 [J]. Astronomy and Astrophysics, 1982, 114(2): 278-288.
- [2] P Bretagnon, G Francou. Planetary theories in rectangular and spherical variables, VSOP87 solutions [J]. Astronomy and Astrophysics. 1988, 202(1-2): 309-315.