

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0260-04

# 基于 Tracepro 的卫星光学特征模拟

杨 锐, 万 敏, 路大举

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 提出了基于光线追踪软件 Tracepro 进行空间卫星的可见和红外光学特征模拟计算的方法。首先建立了卫星位置、卫星表面坐标体系和地球经纬度坐标之间的转换关系, 将经过 Sinda/G 计算获得的卫星表面温度场分布模型导入 Tracepro 中, 设置卫星三维模型的表面特性, 包括卫星表面的反射率、发射率等; 利用 Tracepro 中的灰体辐射模拟获得了卫星由于热辐射形成的红外光学特征; 并根据建立的转换关系获得某一时刻卫星、地球和太阳之间的相互位置关系, 使用该模拟方法可以直观地获得卫星表面光学作用的过程, 有利于分析整个过程, 提高计算的精确度。

**关键词** 光学特征; 模拟; 光线追踪; 卫星

**中图分类号** O432 **文献标识码** A

## Simulation of Satellite Optical Characteristic Based on Tracepro

YANG Rui, WAN Min, LU Da-ju

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The way to simulate the visible signal and infrared signal from satellite in space based on TracePro is introduced. First, the satellite position's coordinate, satellite surface's coordinate and the earth's coordinate are converted to one unite coordinate, then the temperature model from Sinda/G is inserted in Tracepro, and the surface properties, such as the reflectivity and emissivity are built. The infrared characteristic of satellite radiation is obtained, using the gray radiation in the software. The distances between the satellite, the earth and the sun are determined by the above conversion. This simulation could directly show the optical action on the satellite surface, is propitious to analyze the process and improve the precision.

**Key words** optic characteristic; simulation; ray tracing; satellite

## 1 引 言

人造卫星沿预先设定的轨道运动, 其运行环境的平均温度只有几 K, 其表面承受的辐照主要来源于太阳直接照射、地球大气的长波辐射以及地球对太阳辐射的反射。这些能量的大小又与卫星和地球的相对位置、季节、地球表面状态以及大气等有关。当卫星进入地球阴影区时, 会产生过冷现象; 进入日照区时, 由于卫星表面对太阳光有吸收作用, 将导致卫星体温度的升高, 形成一个同周围环境相比的高温体。经过分析得知卫星经过太阳的照射将会导致卫星表面温度升高到 100 °C 左右, 同周围环境相比, 卫星表面温度场足够高, 可以作为一个暗背景下的强信号源, 在红外光谱范围内发射信号<sup>[1~3]</sup>。

卫星除了吸收作用, 还会对入射辐射部分反射。

地球整体对太阳光的反照率可以近似为 0.30, 反射光谱同太阳光谱一致<sup>[4,5]</sup>。由于太阳色温近似为 5900 K, 根据维恩位移定律可以知道太阳辐射的峰值波长大概在 0.49 μm, 太阳辐射主要集中在可见波段。因此, 人造卫星反射的信号光主要集中在可见和近红外波段。

## 2 空间坐标转换

对卫星光学特征的分析, 必须知道观测时卫星、太阳、地球和探测点的位置; 同时卫星在运行中不停地调整自身坐标系, 保证卫星探测器总是指向地球表面, 因此卫星光学特征分析中存在多坐标系的转换, 必须建立统一的坐标系。卫星相对地球运行的轨道是一个椭圆轨道, 地球位于这个椭圆轨道的一个焦点

**基金项目:** 国家 863 计划资助课题。

**作者简介:** 杨 锐(1977—), 男, 四川遂宁人, 中国工程物理研究院应用电子学研究所硕士研究生, 主要从事光学工程的研究。E-mail: youngriver0023@sina.com

上,卫星所处的位置可以利用卫星轨道的六要素计算获得。这六个要素是:卫星轨道半长轴、轨道偏心率、轨道倾角、升交点赤经、近地点幅角和平近点角<sup>[6]</sup>。通过轨道要素可以计算出在某一时刻卫星在轨道中所处的位置。根据 Nevada 中卫星温度场计算的轨道设计中可以知道:卫星所处的轨道和卫星表面坐标系之间的关系如图 1 所示,其中 X 轴指向卫星同地球球心的连线,Y 轴在卫星轨道面上垂直于 X 轴,Z 轴垂直于卫星轨道面。二者结合起来就可以计算出某一时刻卫星各种位置之间的关系。

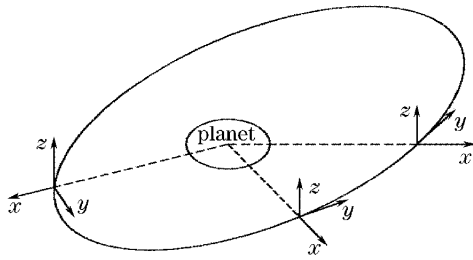


图 1 卫星轨道示意图

Fig. 1 Satellite orbit

### 3 卫星可见光学特征的计算

卫星表面的可见光信号主要来源于地球对太阳的反照光和太阳的直接照射光。由于任何卫星都是由不同的几何体组合而成的,因此首先将卫星表面划分成小面元,每一个面元均视为是各向同性的。假设太阳在卫星处的辐照度为  $E$ ,太阳入射方向同卫星表面法线夹角为  $\theta_{\text{sun}}$ ,观测方向同卫星表面法线方向夹角为  $\theta_r$ ,观测点同卫星的距离为  $R_{0,s}$ ,观测方向同太阳入射方向在卫星表面上的方位夹角为  $\varphi$ , $S_0$  为接收面积, $F_{\text{BRD}}$  表示卫星表面材料的双向反射函数, $dA$  表示卫星表面的有限面元。

$$dS = \frac{S_0}{R_{0,s}^2} \cos \theta_r \cos \theta_{\text{sun}} M F_{\text{BRD}}(\theta_r, \theta_i, \varphi) dA.$$

在计算中必须注意:

1) 如果  $\theta_i$  和  $\theta_r$  中有一个角度大于  $90^\circ$ ,那么该小面元对卫星信号的贡献为 0;

2) 计算各个小面元的贡献时,必须判断某一个小面元是否被其他面元所遮挡。

计算地球表面反照光对卫星信号的作用,可以用如下公式计算地球表面各部分对卫星的贡献

$$dE = \frac{dA_e M_e \cos \theta_e}{\pi} \cos \theta_{r1} \cos \theta_{r2} \frac{dA}{R_{e,s}^2},$$

$$dS_e = \int_{\text{earth}} dE \frac{S_0}{R_{0,s}^2} \cos \theta_r F_{\text{BRD}}(\theta_r, \theta_i, \varphi),$$

式中  $A_e$  表示地球表面的小面元, $M_e$  表示地球大气层处的太阳辐照度, $\theta_e$  表示太阳入射方向同地球表面小面元法线之间的夹角。 $\theta_{r1}, \theta_{r2}$  分别表示地球小面元的法线方向和卫星小面元的法线方向同它们之间连线的夹角, $dS_e$  表示地球表面对卫星表面某一小面元的总的影晌效果。

### 4 卫星红外光学特征的计算

卫星同周围低温环境相比是一个高温物体,可以通过卫星发射的红外辐射信号将卫星同周围环境区分开。根据前面的分析知道,在太阳直接照射的情况下,卫星体温度可以升高到  $100^\circ\text{C}$  左右,通过维恩位移定律可以知道卫星辐射的峰值波长大概在  $7\sim 8\ \mu\text{m}$  之间,说明卫星的热辐射主要集中在中远红外波段,在可见和近红外部分几乎没有什么信号。在文中采用的温度分布数据是从 Sinda/G 对卫星温度分布计算结果中直接提取的。

卫星同探测器的位置关系如前所述,假设卫星表面的有限面元为  $dA$ ,表面反射率为  $\epsilon$ ,表面温度为  $T$  (K),通常将该卫星表面的热辐射视为朗伯体辐射,那么该面元对探测器信号的贡献可以表示为

$$dS = \frac{\epsilon M(T)}{\pi} \frac{S_0}{R^2} \cos \theta_r dA.$$

与前相同,当  $\theta_r > 90^\circ$  时,该面元对探测器信号的贡献为 0,同时在计算中要考虑面元之间的相互遮挡。

### 5 计算方法

通过上面的分析知道了卫星表面有限面元独自对探测器信号的贡献。但实际上有限面元之间还会相互作用,不同表面之间会出现遮挡和反射,导致探测器接收到的信号发生变化。在实际分析卫星表面信号时必须充分考虑到这些现象。模拟卫星表面信号的方法有很多,比如蒙特卡罗方法、有限面元分析方法。在本文中采用一种基于蒙特卡罗方法的光线追踪软件 Tracepro 来对光线传输过程进行描述,它可以对目标表面的散射特性进行设置,很好地模拟光线同各个有限面元之间的相互作用,包括双向反射、透射、衍射等,同时,Tracepro 还可以对光源进行设置,包括黑体、灰体和特定方向的入射光线都可以进行计算,并且能够进行光谱分布计算,可以获得很好的计算结果。

针对太阳从背面和侧面照射卫星的情况进行模

拟,通常情况下,太阳入射方向、卫星位置和观测位置都可以用地球经纬度进行定义,可以通过经纬度计算获得相对位置关系,获得卫星表面在该系统中的相对位置信息,在各坐标体系之间建立统一关系。

## 6 卫星信号模拟计算

若某地球同步卫星的轨道参量  $a$  为 42241 km,  $e=0, \Omega=0$ ; 也就是卫星在赤道面运动,其运动轨迹是一个圆。卫星几何特性如表 1 所示。

表 1 卫星的尺寸及表面热特性参量

Table 1 Dimension and heat parameter of satellite

Unit	Amount	Size /m	Material	Specific heat /[J/(kg·K)]	Density /(kg/m <sup>3</sup> )	Heat exchange /[W/(m·s·K)]	Surface absorptivity	Surface emissivity
Body	1	Column $\phi 2 \times 3$	Polishing Al	921.3	2767.4	221	0.2	0.9
Sollar cell	2	Coboid $3 \times 1 \times 0.4$	High guide heat Si	711.9	2324.6	148.8	0.9	0.2

采用 Sinda/G 进行卫星温度场分布计算获得卫星表面温度分布如图 2 所示。

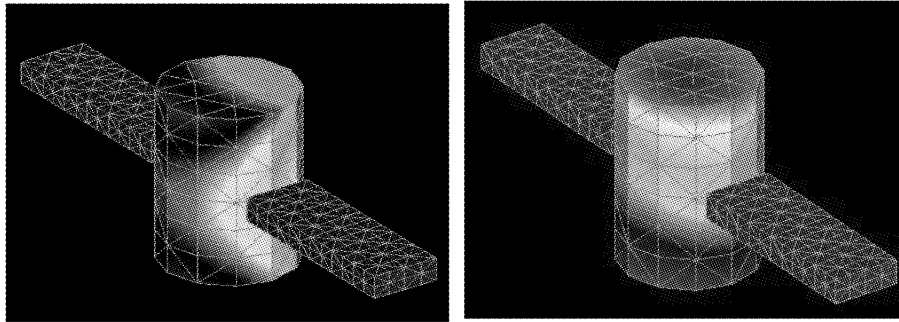


图 2 不同位置卫星的温度场分布图

Fig. 2 Temperature of satellite in different position

首先,将 Sinda/G 中所使用的卫星模型导入到 Tracepro 中,生成 Tracepro 自己的模型,接着利用自己编写的程序读取 Sinda/G 计算获得的温度场分布,并将该模型中的每一个有限面元同实际温度结合到一起,设计好模型各部分的灰体发射率,将该温度和表面发射率以及每一个面元相应的模拟光线数写入到 Tracepro 模型中,接下来设置模型中每一个有限面元的反射特性、吸收特性,这些参量可以在 Tracepro 中每一个面元 surface property 中进行设计。这样,一个基于 Tracepro 的热辐射模型就建立了。由于红外辐射的模拟必须采用连续光谱计算方式,可以在 Raytrace option 中设计需要模拟的光谱段,其设置波长从零到无穷大,可以根据自己的需要进行不同波段的划分。在本文中,将模拟的光谱段划分为  $0 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \sim 1 \mu\text{m}$ ,  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ,  $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ,  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,  $5 \sim 8 \mu\text{m}$ ,  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  和  $12 \sim \text{inf} \mu\text{m}$ , 每一个波段范围内的辐射能量都是采用灰体公式计算获得的,其模拟光线数正比于这些

能量。

其次,在模型中引入太阳和地球的反射,由于太阳和地球相距卫星都是相当遥远的,所以要将该模型进行简化才能进行相应的模拟。在太阳入射方向上设置一个圆板,该板的法线方向同太阳入射方向一致,其大小要比卫星在该方向上的投影大,将该圆板设置成一个灰体,沿法线方向发射,其辐射度等于太阳在卫星处的辐照度,温度等于太阳的色温。在设计地球反射对卫星的影响时,可以设计一个单独的模型计算太阳在地球上的辐照在卫星处的影响,保证太阳和地球的相对位置不变,设计地球的反射率和吸收率,并在接近卫星的地方设计一个全吸收板,通过模拟太阳对地球的照射,全吸收板就可以获得地球的反射,在卫星模拟中可以将该全吸收板作为一个光源导入。

最后在探测位置设计一个接收板作为模拟信号的接收器,通过模拟就可以获得该处的卫星的光学辐照度。

在本文的模拟中,获得了卫星光学信号在地球不同照射位置下的信号分布如表 2 所示。大气层表面与地心和卫星连线交点处的辐照度,在

表 2 不同光谱范围卫星的光学信号辐照度( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 Tabel 2 Spectrum irradiation of satellite ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

Direction	Spectrum				
	0.4~0.8 $\mu\text{m}$	0.8~1.2 $\mu\text{m}$	1.2~2.4 $\mu\text{m}$	3~5 $\mu\text{m}$	8~12 $\mu\text{m}$
Back	$1.09 \times 10^{-14}$	$6.1 \times 10^{-15}$	$4.9 \times 10^{-15}$	$9.2 \times 10^{-14}$	$5.17 \times 10^{-13}$
Side	$9.81 \times 10^{-14}$	$4.63 \times 10^{-14}$	$3.61 \times 10^{-14}$	$2.13 \times 10^{-13}$	$7.59 \times 10^{-13}$

## 7 结 论

在对卫星光学信号的不同波段进行模拟时,其光学信号主要包括可见光和红外两部分,其中 0.6~2.4  $\mu\text{m}$  主要来源于太阳光的直射和地球对太阳光的反射,波长 3~5  $\mu\text{m}$ , 8~12  $\mu\text{m}$  范围内的信号主要来源于卫星红外辐射。这些信号的强度均与太阳、观测点和卫星的相对位置有关,特别是 0.6~2.4  $\mu\text{m}$  范围内的信号受相对位置的影响特别明显,侧向和后向照射的信号值差异很大。

卫星表面各部分由于相互之间不停地进行热交换,导致各部分温度近似一致,没有明显的温度差别。各个波段内的卫星信号强度不一样,其中 1.2~2.4  $\mu\text{m}$  范围内的最弱,0.4~0.8  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  范围内的信号较强。

## 参 考 文 献

1 Yao Lianxing, Chou Weili, Wang Fuheng. The Optical Character of Target and Circumstance [M]. Beijing: Space Navigation Press, 1995. 229~246

姚连兴,仇维礼,王福恒. 目标和环境的特性 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995. 229~246

2 Li Yubo, Lu Yuan. Research on optical characteristics of satellites and camouflage [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, 17(3): 63~65

李玉波,路 远. 卫星光学特征及其隐身初探 [J]. 光电子技术与信息, 2004, 17(3): 63~65

3 Shen Guosi, Yang Baocheng, Cai Jiguang. Theoretical simulation of infrared radiation fields satellite [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005, 25(2): 6~9

沈国土,杨宝成,蔡继光. 卫星红外辐射场理论模拟 [J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(2): 6~9

4 Li Daoyong, Wang Yunqiang, Gong Yanjun. Research on light scattering from spatial objects [J]. *J. Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2004, 17(3): 183~187

李道勇,王云强,宫彦军. 空间目标的光散射特性研究 [J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2004, 17(3): 183~187

5 Han Yuge, Xuan Yiming. Infrared feature of the satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34: 34~37

韩玉阁,宣益民. 卫星的红外辐射特征研究 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34: 34~37

6 Liu Tun, Zhao Jun. Dynamics of Aircraft in Space [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003. 25~33

刘 瞰,赵 钧. 空间飞行器动力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003. 25~33