

地表反射光对天基空间目标的成像影响

闫佩佩 马彩文 折文集

Influence of earth's reflective radiation on space target for space based imaging

Yan Pei-Pei Ma Cai-Wen She Wen-Ji

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 169501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.169501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.169501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁电体中极化长程涨落的光子关联谱实验研究

Experimental study of photon correlation spectroscopy for the long-range fluctuation of polarization in ferroelectrics

物理学报.2015, 64(14): 147801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147801>

基于能量密度分布的辐射源粒子空间抽样方法研究

A new sampling method based on radiation energy density for location of radiative source particles

物理学报.2014, 63(23): 239501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.239501>

不同粒径沙地表面双向反射特性研究

Bidirectional reflectance of sandy land surface with different particle sizes

物理学报.2014, 63(18): 187801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.187801>

热辐射输运问题的隐式蒙特卡罗方法求解

An implicit Monte Carlo method for thermal radiation transport

物理学报.2013, 62(24): 249501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.249501>

深空背景下空间目标紫外特性建模方法研究

Modeling of ultraviolet characteristics of deep space target

物理学报.2011, 60(8): 089501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.089501>

# 地表反照光对天基空间目标的成像影响

闫佩佩<sup>1)2)†</sup> 马彩文<sup>1)</sup> 折文集<sup>1)</sup>

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 光电跟踪与测量技术研究室, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年2月10日收到; 2015年4月8日收到修改稿)

天基空间目标观测时, 在对空间目标的可见光特性提取的过程中, 随着其姿态的不断变化, 存在太阳光照射不到目标表面、或是在某一特定位置由于目标的强烈反射导致太阳光照不均匀的情况. 针对这些问题, 分析了在可见光和近红外波段空间目标表面的光照特性, 提出了利用地表反照光作为天基空间目标成像辅助照明光源的思想, 给出了一种精确的建模方法. 基于漫反射模型建立了地表反照光在空间目标表面的照度计算方法, 借助satellite tool kit卫星工具软件获取太阳、目标的坐标, 省去了以往方法中烦琐的矩阵相乘和坐标转换过程; 对任意时刻的地表有效反照区域给出了判断, 引入对地球表面进行网格划分的方法, 对划分后的每一个面元均匀采样, 通过数值积分可计算出整个有效地表反照区域的地表反照辐射. 以某天基成像任务中的太阳同步轨道卫星为例, 就地表反照光对目标的光照情况进行仿真, 计算得出卫星在经过北极上空时可以利用地表反照光作为辅助光源这一重要结论. 仿真结果验证了建模方法的正确性.

**关键词:** 空间光学, 天基成像, 地表反照光, 建模与仿真

**PACS:** 95.30.Jx, 02.60.Jh, 95.55.Fw, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.64.169501

## 1 引言

随着科技的发展, 为了更有效地利用空间、更深入地探索空间, 为未来提供及时、准确的空间目标信息, 各航天大国都在积极研究对空间目标的天基成像手段<sup>[1,2]</sup>, 以此建立起来的空间目标观测系统也逐渐成为空间监视网的发展方向. 空间目标光学特性作为空间光电探测系统所感知的信息, 是空间目标探测识别的基础和依据. 近年来, 对空间目标光学特性进行全谱段分析已逐渐成为国内外学者关注的方向<sup>[3-9]</sup>.

对于远距离、只能作为点源观测的一类目标, 国内学者提出了一种基于光谱的空间点目标特征提取与识别方法<sup>[10]</sup> 然而成像观测时, 天基空间目标成像系统搭载在某些航天器平台上, 利用航天器的姿态变化可以获得更近的观测距离. 当航天器姿态到合适的条件时, 就能够对目标进行清晰成像,

从而获取空间目标的形状、大小等几何特征, 进而为目标认知提供依据.

任何光学仪器都存在自身工作波段的限制, 在各类目标探测光学仪器的发展过程中, 可见光一直以来都被认为是最重要的谱段<sup>[11]</sup>. 对空间目标可见光特性提取时, 天基成像系统主要依靠太阳光照明对空间目标进行成像, 太阳光直接照射到空间目标表面, 光电成像系统通过目标表面反射的太阳光作为光源进行工作<sup>[12,13]</sup>. 成像过程中, 随着目标姿态的不断变化, 太阳光可能照不到需要观测的空间目标表面<sup>[14,15]</sup>, 或是在某一特定位置, 由于目标的某些部位对光线反射强烈导致表面光照不均匀, 从而大大影响成像效果. 在这些特殊情况下, 研究地球非阴影区的地表反照光能否作为天基成像的稳定照明光源就具有重要意义.

国外对天基目标成像仿真的研究开展较早, 进行了许多关于天基空间目标的光照分析工作<sup>[16-18]</sup>. 国内对空间目标表面的可见光特性研

† 通信作者. E-mail: [yppoptics@163.com](mailto:yppoptics@163.com)

究起步较晚, 目前已经发表的文章主要集中在太阳辐射的数学模型建立上, 对于地球反射光的计算, 采用的方法大多是在计算太阳辐照度的公式上简单地乘以地球平均反射率<sup>[19-22]</sup>. 研究发现这种计算方法是精确的, 因为在不同时刻, 观测卫星、目标、太阳以及地球的相对位置是变化的, 地表反射有效区域的范围也是变化的, 从而使空间目标在天基成像系统中的亮度特征也不相同. 这就需要地对地表反射有效区域进行准确判断. 文献<sup>[15]</sup>虽然给出了地表反照有效区域的划分, 但没有考虑实时情况下太阳、地球和空间目标三者的位置关系, 而且对于如何确定积分区域没有分析, 只是给出了一种典型情况. 本文就地表反照光能否作为天基成像的辅助照明光源进行了研究, 给出了一种精确的建模方法. 以某天基成像任务中的具体情况为例, 进行了地表反照光在空间目标表面处的光照情况模拟, 计算获得了经过北极上空时地表反照光在空间目标表面处的辐照度随时间的变化关系. 得出在天基观测中利用地表反照光作为辅助照明光源方法可行这一重要结论, 建模及仿真结果可为在轨探测的轨道设计和成像条件分析提供理论依据和数据参考.

## 2 空间目标表面的地球反照光理论建模

空间目标表面接受到的空间辐射能量主要来源于太阳的直接辐射、地球大气辐射和地球表面反照. 在可见光和近红外波段以太阳的直接辐射和地球表面的反射为主<sup>[15]</sup>, 如图 1 所示. 在可见光波段, 空间目标均为非自发辐射物体, 主要是靠反射太阳光产生亮度. 文献<sup>[3, 4, 10, 19-22]</sup>对于非自发光空间目标的太阳直射问题已经进行了详细的论述, 这里不再赘述. 本文针对天基空间目标成像时, 某些位置单纯依靠太阳光照明效果不佳的情况, 分析此时的地表反照辐射在空间目标表面产生的辐照度影响, 给出这种情况下的地表反照光辐照度计算模型, 并推导出积分公式, 计算出最终结果.

### 2.1 地表反照光

太阳光照射到地球表面时, 能量分为三部分进行传递: 吸收、镜面反射和漫反射. 其中被吸收的能量以红外波方式重新辐射到空间, 在这里不

考虑; 镜面反射发生在具有反射表面的地方, 而卫星能接收到的这部分能量很少, 可以忽略<sup>[23]</sup>. 在这里, 我们认为地球是对太阳光的一个均匀漫反射源. 为进一步分析问题, 将地球和大气等效为一个朗伯球体, 朗伯球体表面具有良好的漫反射特性, 太阳光经过这个朗伯球面的反射照亮空间目标<sup>[15,24]</sup>, 光路图如图 1 所示.

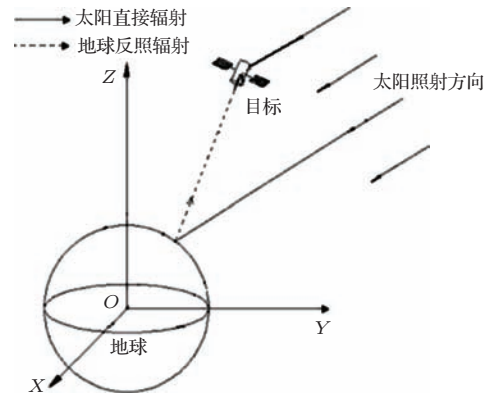


图 1 空间目标可见光和近红外波段辐射示意图

Fig. 1. Sketch of visible and near-infrared radiation about space target.

等效的朗伯球面反射称为地球顶部反射, 地球顶部反射包括地球大气层和地表地物的漫反射. 对应的地球顶部反射率称为地球表观反射率. 在地表温度和光谱反射率等参量确定后, 在特定的大气辐射传输模型和测量条件下地球表观反射率值是确定的<sup>[15,24]</sup>.

### 2.2 地表反照光在空间目标表面产生的照度计算

在分析时, 将背景源简化为只包括太阳和地球, 且太阳和地球的辐射强度分别取其年平均值. 地球附近的太阳常数近似为  $1358 \text{ W/m}^2$ , 在  $450-850 \text{ nm}$  波段, 大气层外太阳的法线方向辐照度为  $573 \text{ W/m}^2$ , 用  $E_{\text{sun}}$  表示.

入射光照射到朗伯体表面, 光线向各个方向散射形成漫反射. 某一时刻, 当太阳光照射到地球表面时, 取地球表面一个微小面元  $dA_e$ , 该面元被太阳光照亮, 如图 2 所示.

这时, 微小面元  $dA_e$  成为一个小的面光源照射到空间目标表面, 如图 3 所示. 图中,  $E_{\text{sun}}$  为在相应波段内大气层外太阳的法线方向辐照度,  $dA_e$  为地表的微小面元,  $n_e$  为垂直于该面元的单位向

量;  $\mathbf{n}$  为地球到太阳的单位向量;  $B$  为该向量与地表的交点.

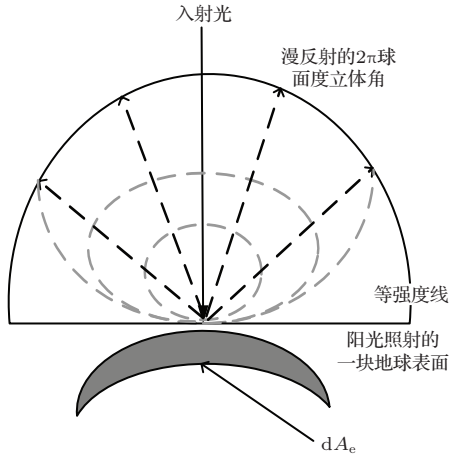


图2 地球漫反射模型

Fig. 2. Earth's diffuse reflection model.

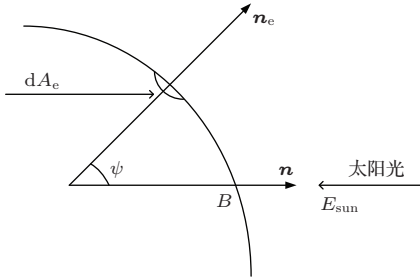


图3 地表反照光光路示意图

Fig. 3. Sketch of earth's reflective radiation path.

从图3可知, 入射到  $B$  点的太阳光辐照度为  $E_{\text{sun}}$ , 到达与该点夹角为  $\psi$  的面元  $dA_e$  上的辐照度  $E_{\text{in}}$  可以表示为

$$E_{\text{in}} = E_{\text{sun}} (\hat{\mathbf{n}}_e \cdot \mathbf{n}) = E_{\text{sun}} \cos \psi. \quad (1)$$

到达  $dA_e$  的太阳光部分被吸收, 部分被反射. 吸收部分这里不考虑, 反射光的强度大小与地球表面反射率有关. 用  $\rho_{\text{top}}$  来表示微元  $dA_e$  处的地球表面反射率, 则来自微元面积  $dA_e$  的漫反射太阳辐照度  $E_{\text{out}}$  由下式给出:

$$E_{\text{out}} = \rho_{\text{top}} E_{\text{in}} = \rho_{\text{top}} E_{\text{sun}} \cos \psi. \quad (2)$$

当微元  $dA_e$  接收到太阳光成为一个面光源时, 它向外发射能量, 辐射通量是逐渐减小的. 并不是所有的从微元  $dA_e$  发出的漫反射光都能到达空间目标处, 实际上只有一部分能到达空间目标表面. 为了计算这部分能量, 以  $dA_e$  为中心, 以  $dA_e$  到空间目标的距离  $D$  为半径建立一个半球空间, 如

图4所示. 则半球内总能量  $W$  可以用下式表示:

$$\begin{aligned} W &= \int_{\theta=0}^{\pi/2} \Delta\omega_o \cos \theta (2\pi D \sin \theta) D d\theta \\ &= \pi D^2 \Delta\omega_o. \end{aligned} \quad (3)$$

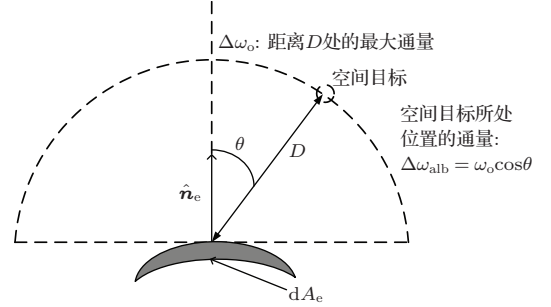


图4 到达空间目标处的辐射通量示意图

Fig. 4. Sketch of flux at space target's position.

遵守能量守恒定律, 半球的总能量一定等于从  $dA_e$  辐射出来的能量. 由此可求出  $\Delta\omega_o$ :

$$\pi D^2 \Delta\omega_o = E_{\text{out}} dA_e, \quad (4)$$

$$\Delta\omega_o = \frac{\rho_{\text{top}} E_{\text{sun}} \cos \psi dA_e}{\pi D^2}. \quad (5)$$

于是, 空间目标所处位置的辐照度  $\Delta\omega_{\text{alb}}$  为

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{\text{alb}} &= \Delta\omega_o \cos \theta \\ &= \frac{\rho_{\text{top}} E_{\text{sun}} \cos \psi \cos \theta dA_e}{\pi D^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

实际中并不是只有一处微元的地球表面反射光传递到空间目标表面, 而是所有微元共同反照的结果, 此时空间目标表面的照度是所有  $\Delta\omega_{\text{alb}}$  的共同作用. 将地球反照在空间目标表面产生的照度记作  $\omega_{\text{alb}}$ , 则

$$\begin{aligned} \omega_{\text{alb}} &= \int_0^{A_e} \Delta\omega_{\text{alb}} dA_e \\ &= \int_0^{A_e} \frac{\rho_{\text{top}} E_{\text{sun}} \cos \psi \cos \theta dA_e}{\pi D^2} dA_e \\ &= \frac{E_{\text{sun}} * \rho_{\text{top}}}{\pi} \int_0^{A_e} \frac{\cos \psi \cos \theta}{D^2} dA_e, \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $A_e$  为有效地表反照区域.

从  $dA_e$  发出的漫反射光, 只有到达空间目标表面才能产生影响. 因此必须对 (7) 式进行约束才能符合实际情况:

1) 首先假设地球为理想的球形, 微元  $dA_e$  应该在太阳可以照亮的一面才能接收到太阳光, 即  $\hat{\mathbf{n}}_e \cdot \mathbf{n} = \cos \psi > 0$ ;

2) 在某一时刻, 太阳光以某角度入射照亮地表上的微元  $dA_e$ ,  $dA_e$  上的光线必须可以到达空间目标表面, 即  $\cos \theta > 0$ .

### 2.3 地球反照光积分表达式确定

为了精确计算地球反照光在空间目标表面产生的辐照度, 必须对 (7) 式中的积分表达式进行求解. 因此需要通过每一时刻太阳、地球和空间目标的相对位置关系, 得出各个矢量之间的夹角, 进而得到积分表达式的显示表达. 而很多文献 [15, 20—22] 在进行地表反照光计算时都忽略了这个问题, 只是进行简单的估算.

#### 2.3.1 坐标系建立

为了确定目标表面光线的入射方向矢量, 并根据照明与观测条件进行遮挡判断, 建立 J2000.0 惯性坐标系 [25], 如图 5 所示. J2000.0 惯性坐标系  $i-j-k$  以地球质心为坐标原点, J2000.0 地球平赤道面为基本平面,  $i$  轴在基本平面内指向 J2000.0 春分点,  $k$  轴为地球的自转轴, 由地心指向北极,  $j$  轴利用右手法则确定 [4]. 假设地球表面任意一点  $A$  的坐标为  $P_A$ , 则  $P_A = (x_A, y_A, z_A)$  可以通过地球半径  $R_{\text{earth}}$ 、该点的纬度  $\alpha$  和周向角  $\varphi$  来表示:

$$\left. \begin{aligned} x_A &= R_{\text{earth}} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi \\ y_A &= R_{\text{earth}} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \\ z_A &= R_{\text{earth}} \cdot \sin \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

纬度和周向角为独立均匀分布. 将  $\alpha$  的取值范围  $N$  等分,  $\varphi$  的取值范围  $M$  等分, 若每个  $\alpha$  取一小份、每个  $\varphi$  取一小份的中值, 进行均匀采样, 则每个

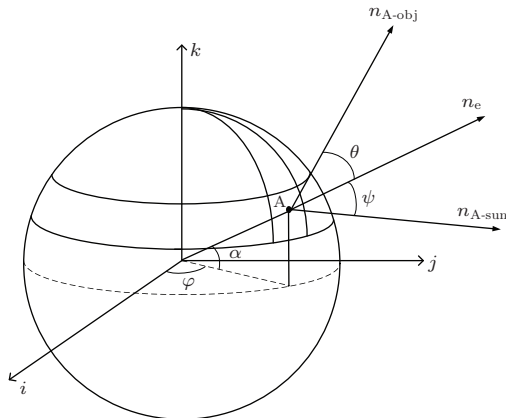


图5 J2000.0 惯性坐标系

Fig. 5. J2000.0 inertial frame.

$\alpha$  分别对应  $M$  个  $\varphi$ , 同样每个  $\varphi$  对应  $N$  个  $\alpha$ . 图 5 给出每个地表面元的划分. 从图中可以看出, 面元的大小并不是恒定的, 而是与  $\cos \alpha$  成正比的, 即

$$dA_e = R_{\text{earth}} \cdot R_{\text{earth}} \cdot \cos \alpha d\alpha \cdot d\varphi. \quad (9)$$

#### 2.3.2 各中间量的表示

坐标系建立后, 需要知道太阳、地球以及空间目标的位置矢量来进一步确定积分表达式. 关于位置矢量的计算, 文献 [3, 4, 7—9] 采用坐标转换的方法, 将各量在 J2000.0 中的坐标转换到目标本体坐标中. 然而这种转换方法没有包含卫星的姿态矩阵 [26,27], 只考虑坐标轴的反向变换矩阵, 其准确性有待验证. 由于卫星运动方程是非线性的, 而实际运动又受到诸多摄动因素的影响, 对卫星轨道运动的高精度数值求解并不容易. 本文在建立好 J2000.0 惯性坐标系后, 借助 Satellite tool kit (STK) 卫星工具软件, 在 STK 中设置相应的空间目标轨道参数和约束条件, 通过其中的 Report 工具, 生成任意时刻在 J2000.0 惯性坐标系中太阳的坐标  $P_{\text{sun}} = (x_{\text{sun}}, y_{\text{sun}}, z_{\text{sun}})$  和目标卫星的坐标  $P_{\text{sat}} = (x_{\text{sat}}, y_{\text{sat}}, z_{\text{sat}})$ , 如图 6 所示. 这种借助专业软件获得坐标的方法省去了烦琐的矩阵相乘和坐标转换过程, 得到的结果也更精确.

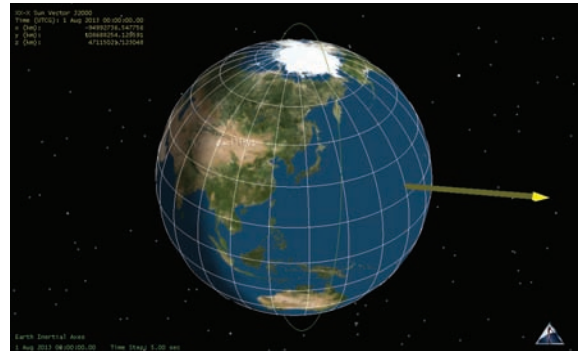


图6 (网刊彩色) STK 演示图

Fig. 6. (color online) Sketch map of STK.

在某一时刻, 地球表面  $A$  点法线的方向矢量可以通过该点的坐标表示为

$$n_e = P_A / |P_A|; \quad (10)$$

太阳-地球连线的方向矢量可以通过获取的坐标表示为

$$n_{A-\text{sun}} = (P_{\text{sun}} - P_A) / |P_{\text{sun}} - P_A|; \quad (11)$$

目标-地球连线的方向矢量可以表示为

$$n_{A-\text{sat}} = (P_{\text{sat}} - P_A) / |P_{\text{sat}} - P_A|. \quad (12)$$

于是有

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \frac{n_{A-\text{sun}} \cdot n_e}{|n_{A-\text{sun}}| |n_e|} \\ &= \frac{(P_{\text{sun}} - P_A) \cdot P_A}{|P_{\text{sun}} - P_A| |P_A|}, \\ \cos \psi &> 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{n_{A-\text{sat}} \cdot n_e}{|n_{A-\text{sat}}| |n_e|} \\ &= \frac{(P_{\text{sat}} - P_A) \cdot P_A}{|P_{\text{sat}} - P_A| |P_A|}, \\ \cos \theta &> 0, \end{aligned} \quad (14)$$

目标与 A 点的距离

$$D = |P_{\text{sat}} - P_A|. \quad (15)$$

则某一时刻地球反照在空间目标表面产生的辐照度

$$\begin{aligned} \omega_{\text{alb}} &= \frac{E_{\text{sun}} \cdot \rho_{\text{top}}}{\pi} \int_0^{A_e} \frac{\cos \psi \cdot \cos \theta}{D^2} dA_e \\ &= \frac{E_{\text{sun}} \cdot \rho_{\text{top}} \cdot R_{\text{earth}}^2}{\pi} \\ &\quad \times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{D^2} d\alpha \\ &\quad \times \int_0^{2\pi} \frac{\cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{D^2} d\varphi. \end{aligned} \quad (16)$$

将 (6) 式代入 (16) 式, 产生的关于  $(\alpha, \varphi)$  的计算函数非常复杂, 是一个不可积分函数. 由于表达式的不可积性, 考虑数值积分的方法: 微元  $dA_e$  是在地球表面均匀采样的, 因此每一微元应该对应不同的  $\alpha, \varphi, \theta, \psi$  和  $D$ . 只要微元数达到一定数目, 就可以通过数值积分的方法, 模拟出整个有效地表反照区域在空间目标位置处产生的辐照度:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{alb}} &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{2\pi E_{\text{sun}} \cdot \rho_{\text{top}} \cdot R_{\text{earth}}^2}{N} \\ &\quad \times \sum_{i=1}^N \frac{\cos \psi_i \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i}{\pi D_i^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

### 3 仿真计算

以某天基成像任务中某太阳同步轨道卫星为例, 进行地表反照光对空间目标表面的光照影响特性仿真计算. 该卫星在发射之前, 根据在轨对卫星成像任务规划, 预先在地面开展仿真成像试验, 模拟在轨拍摄位置、姿态、光照条件, 确认在轨拍摄成像效果, 为在轨任务规划提供支撑数据. 在地面仿真成像试验中, 出现了卫星底部圆柱天线反光较强

烈, 且底部无法被照亮、拍摄不到细节等问题. 这将严重影响在轨探测的准确性和可靠性. 因此提出利用地表反照光作为辅助照明的方案.

#### 3.1 特性参数确定

通过 STK 软件得到太阳、目标卫星的实时坐标时, 需要输入该目标卫星的轨道参数: 轨道半长轴  $a_{\text{obj}} = 7008.137 \text{ km}$ ; 偏心率  $e_{\text{obj}} = 0$ , 轨道倾角  $i_{\text{obj}} = 97.911^\circ$ , 升交点赤经  $\Omega_{\text{obj}} = 97.911^\circ$ , 近地点辐角  $\omega_{\text{obj}} = 0^\circ$ ; 降交点地方时 6 : 30.

通过 STK 软件仿真可知, 从 2013 年 8 月 1 日 0 时 0 分 0 秒—2013 年 8 月 15 日 0 时 0 分 0 秒, 卫星经过北极圈上空时其星下点轨迹均为可见弧段 (白天). 由于该卫星为太阳同步轨道卫星, 若不考虑 J2 摄动, 卫星通过同一地面目标的情况基本相同. 冰雪覆盖的北极地表反射率也较高, 因此考虑当目标卫星经过北极上空时利用地球反照光来照明.

北半球高纬度地区的地球表观反射率为 0.3—0.5, 而地面覆盖物为冰雪的地表反射率可达 0.69 [28]. 然而, 在 8 月份由于北极的气温上升, 北极的冰雪有部分融化. 融化的冰雪从两个方式上会影响反射率: 首先冰雪融化减少了海冰的覆盖面积, 原本反射光的海冰被吸收光的海水取代; 其次冰雪融化后, 积雪从干燥变成湿润, 虽然这时还是反射光的海冰, 但反射率已经低于干燥的雪冰, 相比干燥的冰雪已经暗了许多. 图 7 为 2010 年 8 月份的北极圈卫星地图, 红色圆圈表示北极圈. 综合考虑后在计算中地球表观反射率  $\rho_{\text{top}}$  取 0.35.

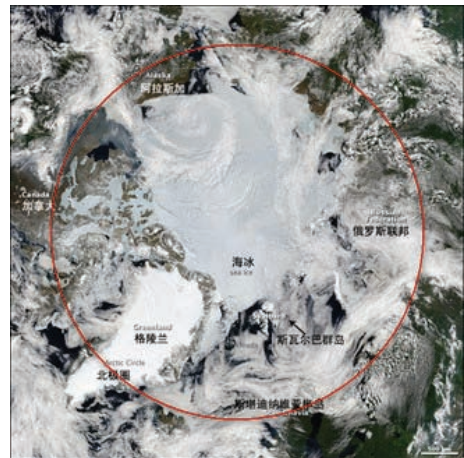


图 7 (网刊彩色) 2010 年 8 月北极圈卫星地图  
Fig. 7. (color online) Satellite map of the Arctic Circle in August, 2010.

### 3.2 仿真结果

对地表区域进行均匀采样, 采样值分别设置为  $3.6 \times 10^6$  ( $\alpha$  取样 1000,  $\varphi$  取样 3600) 和采样值设置为  $3.6 \times 10^8$  ( $\alpha$  取样 10000,  $\varphi$  设置 36000), 误差在  $10^{-1}$  量级, 不影响计算结果的精度, 因此在最终的计算中采样值设置为  $3.6 \times 10^6$ .

2013年8月1号到8月15号, 目标卫星每一天中有15次经过北极上空, 每次持续时间约为810 s, 在这810 s的时间段中时间间隔取1 min, 分析对应的15个时间点的照度情况. 仿真结果显示, 每天的15个时间段内, 辐照度曲线变化趋势基本一致, 都是从1—6 min 辐照度呈上升趋势, 在8 min左右达到最大值, 约为  $45 \text{ W/m}^2$ , 10—16 min 辐照度开始下降. 图8给出了2013年8月7号卫星经过北极上空的第一个时间段00:36:21—00:49:43和第八个时间段12:05:05—12:18:27内, 地表反射光在目标卫星表面处的辐照度随时间变化的曲线.

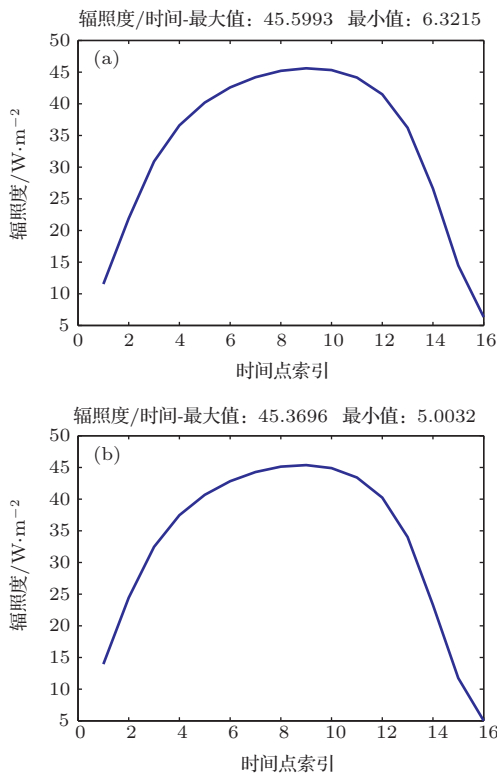


图8 2013年8月7号地表反射光在目标卫星表面处的辐照度曲线 (a) 第一个时间段内; (b) 第八个时间段内  
Fig. 8. Earth's reflective irradiance curves at target surface on 2013-08-07: (a) in the first period of time; (b) in the eighth period of time.

由图8可以看出, 8月7号地表反射光在目标卫星表面处的最大辐照度值为  $45.5993 \text{ W/m}^2$ , 辐

照度在  $40 \text{ W/m}^2$  以上持续时间约6 min, 足以作为天基探测的辅助照明光源. 该目标卫星发射后, 在轨成像过程在8月7日北极上空进行, 得到的最终成像结果表明, 在轨成像获得的目标卫星底部的信息更多, 从而使得在轨拍摄的图像较地面仿真图像细节更丰富这也充分表明: 经过某些地球表面反射率较大的地表区域上空, 完全可以借助地表反射光的辅助照明作用, 使在轨成像效果更佳. 由此可以说明在天基观测中利用地表反射光作为辅助照明光源是切实可行的.

### 4 结 论

本文以实际的天基空间目标成像任务为依托, 提出了在天基目标成像中研究地表反射光作为辅助照明光源的必要性, 并对可行性进行了研究, 对空间目标位置处地表反射光产生的照度大小进行了仿真计算, 给出了理论建模方法. 最终的计算结果和实际的在轨成像图像充分验证了地表反射光可以作为天基成像的辅助照明光源这一结论. 研究过程中采用与目前可查阅文献中完全不同的矢量坐标提取方法, 根据目标卫星的轨道参数等输入条件, 利用STK软件方便准确地提取到坐标, 计算出各中间量. 以某天基成像任务中的太阳同步轨道卫星为例, 进行了地表反射光在空间目标表面产生的照度计算. 最终的在轨成像结果充分验证了对地球表面进行网格划分和均匀采样及建模条件判断等仿真方法的正确性, 以及仿真结果的可信性.

### 参考文献

- [1] Niu Z G, Yu X H 2006 *J. Acad. Equip. Comm. Technol.* **17** 38 (in Chinese) [牛子刚, 于小红 2006 装备指挥技术学院学报 **17** 38]
- [2] Zeng D X, Du X P 2008 *J. Syst. Simul.* **20** 209 (in Chinese) [曾德贤, 杜小平 2008 系统仿真学报 **20** 209]
- [3] Sun C M, Yuan Y, Zhang X B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7523 (in Chinese) [孙成明, 袁艳, 张修宝 2010 物理学报 **59** 7523]
- [4] Yuan Y, Sun C M, Huang F Z, Zhao H J, Wang Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 089501 (in Chinese) [袁艳, 孙成明, 黄锋振, 赵慧洁, 王潜 2011 物理学报 **60** 089501]
- [5] Xia X L, Ai Q, Ren D P 2007 *J. Infrared Millim. Waves.* **26** 174 (in Chinese) [夏新林, 艾青, 任德鹏 2007 红外与毫米波学报 **26** 174]
- [6] Joseph C L 1997 *Proc. SPIE* **2999** 244

- [7] Cox R J, Strickland D J, Evans J S, Wright K C, Paxton L J 1994 *Proc. SPIE* **2282** 261
- [8] Mende S B, Fuselier S A 1993 *Opt. Eng.* **32** 3139
- [9] Schuehle U H, Hochedez J E, Pau J L, Rivera C, Munoz E 2004 *Proc. SPIE* **5171** 231
- [10] Sun C M, Zhao F, Yuan Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034202 (in Chinese) [孙成明, 赵飞, 袁艳 2015 物理学报 **64** 034202]
- [11] Sun X 2010 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of The Chinese Academy of Science) (in Chinese) [孙鑫 2010 博士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [12] Yu J H, Su Z L 2006 *J. Spacecraft TT & C Tech.* **25** 52 (in Chinese) [余建慧, 苏增立 2006 飞行器测控学报 **25** 52]
- [13] Chen R L, Han L, Che C C, Ma Z, Fan X W 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 1438 (in Chinese) [陈荣利, 韩乐, 车驰骋, 马臻, 樊学武 2005 光子学报 **34** 1438]
- [14] Peng H F, Chen J, Zhang B 2006 *Opto-Electronic Eng.* **33** 9 (in Chinese) [彭华锋, 陈鲸, 张彬 2006 光电工程 **33** 9]
- [15] Xiao X G, Wang Z H, Bai J G, Liu X B 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 375 (in Chinese) [肖相国, 王忠厚, 白加光, 刘学斌 2009 光子学报 **38** 375]
- [16] Hossein R, Edwin R H 2002 *IEEE Trans. ICIP* **2** 553
- [17] Jan J K, Andrea J D 2001 *Proc. SPIE* **4299** 312
- [18] Stokcs G H, Vigh H E, Kent P J 1996 *Int. Telem. Con.* **32** 477
- [19] Wu Y, Yang L, Fan J Y, Wang Y, Wu Y, Wang C J 2009 *J. HUST* **14** 82 (in Chinese) [吴英, 杨玲, 范剑英, 王洋, 吴岩, 王长劲 2009 哈尔滨理工大学学报 **14** 82]
- [20] Wang H Y, Zhang W, Wang Z L 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 593 (in Chinese) [汪洪源, 张伟, 王治乐 2008 光学学报 **28** 593]
- [21] Zhang W, Wang H Y, Wang Z L, Sun C M 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 2462 (in Chinese) [张伟, 汪洪源, 王治乐, 孙成明 2008 光子学报 **37** 2462]
- [22] Sun C M, Zhang W, Wang Z L 2008 *Opt. Tech.* **34** 750 (in Chinese) [孙成明, 张伟, 王治乐 2008 光学技术 **34** 750]
- [23] Flatley T W, Moore W A 1994 *NASA Technical Memorandum* **104596** 31
- [24] Vermote E, Tanré D, Deuzé J L, Herman M, Morcrette J J, Kotchenova S Y 1997 *6S User Guide Version 2* (France: Laboratoire d'Optique Atmosphérique) p41
- [25] Xi X N, Wang W, Gao Y D 2003 *Fundamentals of Near-Earth Spacecraft Orbit* (Changsha: National University of Defense Technology Press) p11 (in Chinese) [郗晓宁, 王威, 高玉东 2003 近地航天器轨道基础 (长沙: 国防科学技术大学出版社) 第11页]
- [26] Wang F G, Zhang W, Wang H Y 2011 *Opto-Electronic Eng.* **38** 6 (in Chinese) [王付刚, 张伟, 汪洪源 2011 光电工程 **38** 6]
- [27] Zhang Q, Ye X, Fang W 2011 *J. GUCAS* **28** 310 (in Chinese) [张乾, 叶新, 方伟 2011 中国科学院研究生院学报 **28** 310]
- [28] Jiang X 2006 *J. Glaciol. Geocryol.* **28** 728 (in Chinese) [蒋熹 2006 冰川冻土 **28** 728]

# Influence of earth's reflective radiation on space target for space based imaging

Yan Pei-Pei<sup>1)2)†</sup> Ma Cai-Wen<sup>1)</sup> She Wen-Ji<sup>1)</sup>

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 10 February 2015; revised manuscript received 8 April 2015 )

## Abstract

The space-based surveillance, which would mainly use the space-based visible, has great value for civil and military applications currently and for a fairly long future period. In space-based surveillance, the visible and near-infrared radiation characteristics of the space target are influenced by its attitude variation. This influence is especially prominent in space-based imaging. In some ways, solar radiation cannot arrive at the surface of the space target, or the arriving radiation is not uniformly distributed because of the space target's strong reflection at a particular position. In order to solve these problems, the visible and near-infrared illumination characteristics of the space target surface are analyzed. Moreover, a notion that earth's reflective radiation can be used as illumination for space target imaging is given, and an accurate modeling method is proposed. Firstly, based on diffuse reflectance model, a method of mathematically calculating the illumination at space target's position from earth's reflective radiation is established. And a formula for calculating illumination is derived. Secondly, the coordinates of sun and space target at any time can be obtained by the Satellite tool kit software, in which the complicated multiplying matrix and coordinate transformation algorithm introduced in some references are avoided. Thirdly, the method of estimating earth's reflective radiation region at arbitrary moment is introduced. The grid division method is generated and the uniform sampling is used in each small area. Fourthly, the position of a surface cell is transformed from the sphere reference frame into the J2000.0 inertial frame. The earth's reflective radiation can be calculated through numerical integration. Finally, the illumination from earth's reflective radiation to a sun synchronous orbit satellite in an imaging mission based on space is calculated by the given parameters. The results show that the earth's reflective radiation is luminous enough for space target imaging when the satellite passes through arctic. When the satellite moves on the orbit, we can obtain more detailed information about target satellites' bottom than the ground simulation imaging. The on-orbit imaging results demonstrate the validity of the modeling method, which could support the foundation of our space-based surveillance system theoretically and technically and could be used as a reference of space-based orbit measurement and determination in deep space exploration.

**Keywords:** space optics, space-based imaging, earth's reflective radiation, modeling and simulation

**PACS:** 95.30.Jx, 02.60.Jh, 95.55.Fw, 78.20.Bh

**DOI:** [10.7498/aps.64.169501](https://doi.org/10.7498/aps.64.169501)

---

† Corresponding author. E-mail: [yppoptics@163.com](mailto:yppoptics@163.com)