

天基数字成像链路数理模型构建方法

李亚茹^{1,2}, 周亮^{1*}, 刘朝晖¹, 折文集¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对数字化装备构建需求, 以天基数字成像系统为研究对象, 提出成像链路数理模型构建方法。建立相机、目标光学观测可见性模型和目标几何与光学特性模型, 并通过路径追踪全局光照算法及光线重要性采样方法构建成像辐射传输模型, 经过光电能量转换及成像调制模型输出空间目标数字成像结果。基于成像平台和空间目标的轨道参数, 对比 Satellite tool kit (STK) 二体轨道模型 15 d 内的可见性仿真结果, 验证了提出的可见性模型的正确性。在时间间隔 3 s, 距离 70~200 km 的条件下, 对姿态对地定向目标进行成像仿真, 结果表明, 该成像链路数理模型可以有效生成在满足轨道监测条件下的目标序列图像, 同时文中模型对天基装备数字系统建设也具有一定参考价值。

关键词: 天基成像; 数理模型; 全局光照; 空间目标

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230351

0 引言

随着数字化、智能化设备建设的快速发展, 构建可用于模拟空间成像的天基数字成像系统尤为重要。系统地研究数字成像系统可为后续数字孪生技术的应用提供先期的理论模型。

国外对天基数字成像链路的研究起步较早, 目前已有的工程化仿真软件包括美国 Satellite tool kit (STK)^[1]、Digital imaging and remote sensing image generation (DIRSIG)^[2]、Time-domain analysis simulation for advanced tracking (TASAT)^[3]、法国 Synthetic environment workbench (SE-Workbench)^[4]、德国 Software environment for the simulation of optical remote sensing systems (SENSOR)^[5] 等, 且均已应用于军事项目实践。中国在该领域的研究起步较晚, 例如解放军信息工程大学蓝朝桢^[6]采用 Geometry behavior model language (GBML) 进行复杂目标光学特性建模, 结合 Open graphics library (OpenGL) 实现空间目标的数字成像过

程; 天津大学杨晋生等^[7]、中国科学院大学许兴星^[8]均采用 STK 与 OpenGL 局部光照算法结合的方法进行星载可见光相机仿真成像; 华中科技大学杨长才等^[9]通过 STK、3D Studio Max 及全局光照光线跟踪算法实现目标表面微面元传递到电荷耦合器件 (CCD) 镜头处能量值的计算; 北京理工大学王昊等^[10]采用 Optix 并行图形处理器 (GPU) 光线跟踪引擎进行大场景红外成像仿真; 北京航天飞行控制中心以天宫二号伴星对组合体的观测任务为需求^[11], 将 Visual C++和 OpenGL 相结合计算辐射量完成像素着色。文献 [12-14] 在空间目标成像中采用全局光照算法进行目标辐亮度传输, 但并未涉及目标与相机的轨道及姿态特性研究。由此可见, 国内大多数研究均是基于国外现有仿真软件的二次开发或特定简化模型的应用性分析, 未建立起数字成像链路的系统性分析体系。

文中以相机与目标的轨道参数为基础, 在满足目标可见性观测条件下, 光线从光源出发, 经空间目标反射通过空间传输到相机入瞳面, 最后由光电转换及

收稿日期: 2023-06-08; 修订日期: 2023-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61805275)

作者简介: 李亚茹, 女, 博士生, 主要从事空间目标成像仿真方面的研究。

导师简介: 刘朝晖, 男, 研究员, 主要从事光电跟踪测量仪器总体技术方面的研究。

通讯作者: 周亮, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电跟踪与测量技术方面的研究。

成像调制生成最终探测器输出图像。文中针对整个成像环节构建空间目标成像链路模型,进行天基相机数字化系统设计与集成。通过对可视时间段内目标成像结果的分析,验证了数字成像系统的正确性。该成像链路数理模型的构建对空间目标数字成像技术的发展具有重要的参考价值。

1 数理模型构建方法

文中构建的数理模型主要包括相机与目标光学观测可见性模型、目标几何与光学特性模型、成像辐射传输模型、光电成像转换模型及成像调制模型。主要技术框图如图 1 所示,几何传输路径中通过观测可见性模型确定目标相对相机的位姿及可视时间段;能量传输路径通过目标几何与光学特性模型、成像辐射传输模型、光电能量转换及成像调制模型确定目标在相机像元面的成像灰度值。

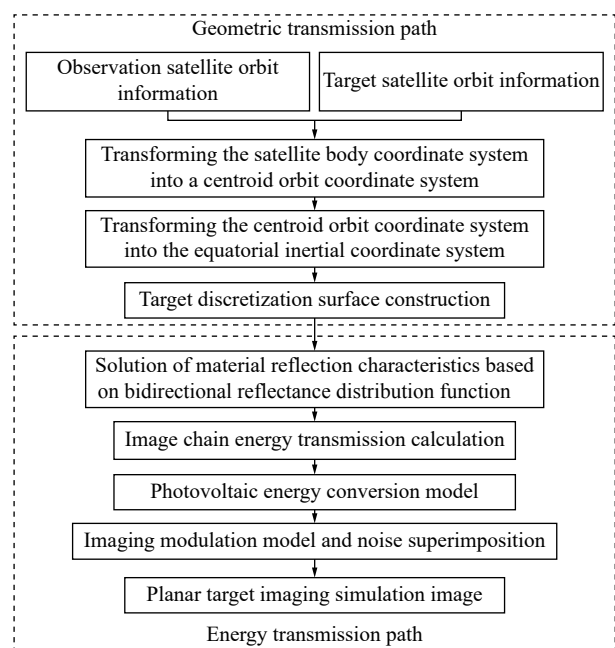


图 1 空间目标数字成像系统技术框图

Fig.1 Technical diagram of the space-based digital imaging system for planar targets

1.1 相机、目标可见性模型构建

1.1.1 相机、目标位姿模型

卫星位姿解算的前提是确定各坐标系之间的数学关联。文中以地心赤道惯性坐标系 O_iXYZ ($J2000.0$) 作为基准坐标系构建目标、相机及太阳的位置关系。

通过公式 (1) 将轨道六根数转换为目标 $J2000.0$ 坐标系下的位置矢量。 $J2000.0$ 和质心轨道坐标系 $OX_oY_oZ_o$ 的位置矢量转换关系如公式 (2) 所示。 $OX_o - Y_oZ_o$ 坐标系和卫星本体坐标系 $OX_bY_bZ_b$ 的位置矢量转换关系如公式 (3) 所示。 O_iXYZ 、 $OX_oY_oZ_o$ 和 $OX_bY_bZ_b$ 坐标系三者关系如图 2 所示。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{J2000} = R_z(-\Omega)R_x(-i)R_z(-\omega) \times r_{eo} \begin{bmatrix} \cos \xi \\ \sin \xi \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \xi} \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos u - \sin \Omega \sin u \cos i \\ \sin \Omega \cos u + \cos \Omega \sin u \cos i \\ \sin u \sin i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a 为轨道长半轴; e 为轨道偏心率; Ω 为升交点赤经; i 为轨道倾角; $u = \omega + \xi$; ω 为近地点幅角, ξ 为真近点角; $R_x(A)$ 、 $R_y(A)$ 和 $R_z(A)$ 分别为绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转 A 角 (逆时针为正) 的基元三维旋转矩阵^[6]; r_{eo} 为卫星到地心的距离。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{OX_oY_oZ_o} = T_{eo} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{J2000} + L_{eo} \quad (2)$$

式中: $T_{eo} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} R_z(u)R_x(i)R_z(\Omega)$, 为惯性坐标系 $J2000.0$ 到质心轨道坐标系 $OX_oY_oZ_o$ 的坐标旋转矩阵; $L_{eo} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{eo} \end{bmatrix}^T$ 。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{OX_bY_bZ_b} = R_y(\theta)R_x(\varphi)R_z(\psi) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{OX_oY_oZ_o} \quad (3)$$

式中: θ 为俯仰角; φ 为滚动角; ψ 为偏航角。

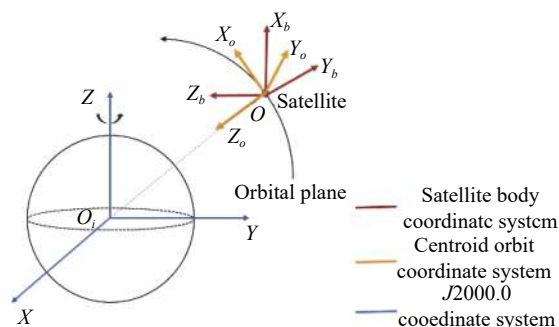


图 2 坐标位置关系示意图

Fig.2 Illustration of coordinate position relationships

1.1.2 太阳位置及辐照度模型

太阳相对于地球呈椭圆轨道运动,计算太阳平均轨道要素如表 1 所示。

表 1 太阳平均轨道六要素

Tab.1 Average orbital elements of the Sun

| Parameter | Method of calculation |
|-------------------------|---|
| Semimajor axis/km | $a = 149\,597\,870$ |
| Eccentricity | $e = 0.016\,708\,62 - 0.000\,420\,4T - 0.000\,001\,24T^2$ |
| Inclination/(°) | $i = 23^\circ 26' 21''.448 - 46''.8150 - 0''.000\,597T^2 + 0''.001\,813T^3$ |
| RAAN/(°) | $\Omega = 0$ |
| Argument of perigee/(°) | $\omega = 282^\circ 56' 14''.45 + 6190''.32T + 1''.6557T^2 + 0''.0127T^3$ |
| Mean anomaly/(°) | $M = 357^\circ 31' 44''.76 + 129\,596\,581''.04T - 0''.5627T^2 - 0''.0127T^3$ |

T is the Julian century number calculated from January 1, 2000, 12:00.

首先将太阳轨道根数通过公式 (1) 转换到 $J2000.0$ 坐标 x_1, y_1, z_1 , 再经公式 (4) 计算太阳平赤经 α_s 和平赤纬 δ_s 。

$$\alpha_s = \arctan(y_1/x_1)$$

$$\delta_s = \arctan(z_1/\sqrt{x_1^2 + y_1^2}) \quad (4)$$

根据黑体辐射理论, 太阳在波长 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 内的辐射出射度 M_e 为:

$$M_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T_0} - 1)^{-1} d\lambda \quad (5)$$

式中: $c_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为第一黑体辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二黑体辐射常数。通常太阳辐射可认为是温度为 $T_0 = 5\,900 \text{ K}$ 的黑体辐射。

假设太阳在空间各个方向上均匀辐射能量, 根据距离平方反比定律, 波长 450~850 nm 范围内太阳在

空间目标距离处的辐照度 E_0 为:

$$E_0 = I/r^2 = (\Phi/4\pi)/r^2 = (4\pi R_s^2 M/4\pi)/r^2 = R_s^2 M/r^2 = 634.64 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

式中: I 为太阳的发光强度; Φ 为太阳的辐射总通量; $R_s = 6.9599 \times 10^8 \text{ m}$ 为太阳半径; r 为太阳与空间目标的距离, 由于目标与太阳的距离相对目标与地球的距离大的多, 因此可将其视为地日距离 $r = 1.521 \times 10^{11} \text{ m}$ 。

1.1.3 目标可见性分析

空间目标的可视条件包括地球遮挡与地光可见 G_{Earth} 、地影可见 $G_{Eclipse}$ 、日光可见 G_{sun} 、相机设备可见 G_p 等, 其几何通视关系如图 3 所示。

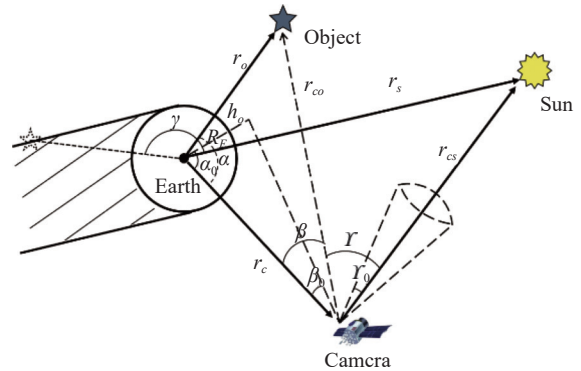


图 3 通视位置关系示意图

Fig.3 Diagram illustrating line-of-sight position relationships

探测器的实际可观测区域为 $G_{view} = G_{Earth} \cap G_{Eclipse} \cap G_{sun} \cap G_p$, 各区域计算如表 2 所示。

表 2 可视区域求解方法

Tab.2 Methods for solving the visible area

| Area | Solution method |
|---------------|---|
| G_{Earth} | $\{r_c, R_E, r_o, h_0, r_{co} \beta > \beta_0 \text{ or } (\beta < \beta_0 \text{ and } \alpha < \alpha_0)\}$ $= \left\{ \left(r_c, R_E, r_o, h_0, r_{co} \arccos\left(\frac{-r_c \cdot r_{co}}{ r_c \cdot r_{co} }\right) > \arccos\frac{\sqrt{ r_c ^2 - (h_0 + R_E)^2}}{ r_c } \text{ or } \left(\arccos\left(\frac{-r_c \cdot r_{co}}{ r_c \cdot r_{co} }\right) < \arccos\frac{\sqrt{ r_c ^2 - (h_0 + R_E)^2}}{ r_c } \right) \text{ and } \left(\arccos\left(\frac{r_o \cdot r_c}{ r_o \cdot r_c }\right) < \arccos\frac{\sqrt{ r_c ^2 - (h_0 + R_E)^2}}{ r_c } \right) \right\}$ |
| $G_{Eclipse}$ | $\{r_o, r_s \gamma \leq \pi/2 \text{ or } r_o \sin \gamma > R_E\} = \left\{ r_o, r_s \frac{r_o \cdot r_s}{ r_o \cdot r_s } \geq 0 \text{ or } r_o \sin(\arccos(\frac{r_o \cdot r_s}{ r_o \cdot r_s })) \geq R_E \right\}$ <p>γ is the angle between r_o and r_s.</p> |
| G_{sun} | $\{r_{co}, r_{cs} \gamma' > \gamma'_0\} = \left\{ r_{co}, r_{cs} \frac{r_{co} \cdot r_{cs}}{ r_{co} \cdot r_{cs} } < \cos \gamma'_0 \right\}$ <p>r_{cs} is the distance from the sun to the camera; γ'_0 is the critical angle of the solar apparent circular plane.</p> |
| G_p | Determined by factors such as the field of view angle, detection distance, and signal-to-noise ratio of the detector. |

1.2 目标几何和光学特性模型构建

1.2.1 目标三维几何及网格划分

对于天基成像场景,光与目标的相互作用仅发生在物体表面,同时考虑数据兼容性问题,文中研究主要通过点表、面表的多边形表示法构建三维物体的几何信息和拓扑信息,即 obj 文件表示法,并且该格式表示法有利于编程中对几何形体的解析。

成像系统空间分辨率指标对目标模型的空间颗粒度提出要求,同时空间目标表面结构、包覆材料等特性复杂,一般较难给出其表面准确的反射率表示。因此目标三维几何结构属性采用离散化网格三角面元几何模型表示。

文中研究针对距离函数表示的圆滑曲面几何边界,首先进行概率筛选布点,通过 Delaunay 构建三角网格,基于桁架结构力平衡原理的均匀化光顺算法^[15]将边界外的点通过梯度函数拉回边界。针对分段表示的几何形体,通过“从外向内”推进波前技术^[16],采用最小角优先生成原则,解决距离函数进行剖分时棱边脚点不收敛的问题,不同几何表面网格划分结果如图 4 所示。

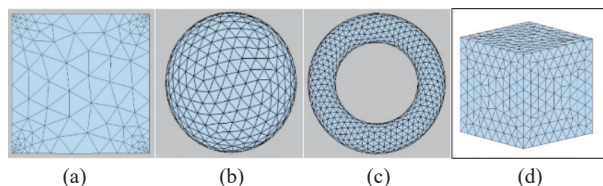


图 4 不同距离函数几何表面网格划分情况。(a) 正方形; (b) 球体; (c) 圆环; (d) 立方体

Fig.4 Partitioning of geometric surface mesh based on different distance functions. (a) Square; (b) Sphere; (c) Circular ring; (d) Cube

1.2.2 目标材料光学特性

目标材料光学特性是影响成像速度和成像质量的重要因素,目前主要采用基于双向反射分布函数(BRDF)来表征其光学散射特性。文中目标材质采用的微表面五参量 BRDF 模型如下:

$$f_r = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha_r}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha_r} \exp[b_r(1 - \cos \gamma_r)^{a_r}] \times \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \quad (7)$$

式中: α_r 为微平面法线与平均法线夹角; γ_r 为入射光矢量与微平面法线夹角; $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽函数; $k_b, k_d, k_r,$

a_r, b_r 为待定参数,不同材质拟合参数不同,参量详细说明见文献^[17]。

常见的空间目标表面主要由太阳能电池板和聚酰亚胺包覆层组成,其中包覆层材质表现为褶皱的微表面几何特性,并非符合漫反射或者镜面反射。表 3 给出文中使用的硅电池板材质和聚酰亚胺包覆层针对五参数模型的拟合参数值^[7]。

表 3 卫星表面材料 BRDF 拟合参数值

Tab.3 Fitted parameter values for satellite surface material BRDF

| Material | a_r | b_r | k_b | k_d | k_r |
|---------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Silicon solar panel | 0.557 | -261.6 | 15.42 | 0.047 | 0.717 |
| Polyimide | 0.458 | -51.90 | 28.38 | 0.077 | 1.865 |

1.3 成像辐射传输模型

由上述 1.1 节可得目标、相机及光源在 J2000.0 坐标系下的位置,通过矩阵 T_{ec} 将其转换到相机坐标系。相机像素与目标表面点的位置由相机焦距、像元尺寸及目标位姿决定,通过矩阵 T_{ep} 将目标在相机坐标系下的空间点映射到像素坐标。

$$T_{ec} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_x \cos \Theta_z & \sin \Theta_x \cos \Theta_z & -\sin \Theta_z & -R_x \\ -\sin \Theta_x & \cos \Theta_x & 0 & -R_y \\ \cos \Theta_x \sin \Theta_z & \sin \Theta_x \sin \Theta_z & \cos \Theta_z & -R_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: R_x, R_y, R_z 为光源或目标在 J2000.0 坐标系下的位置; $\Theta_x = \arccos(\mathbf{r}_x / \sqrt{\mathbf{r}_x^2 + \mathbf{r}_y^2}) \cdot \text{sign}(\mathbf{r}_y)$; $\Theta_z = \arccos(\mathbf{r}_z / \sqrt{\mathbf{r}_x^2 + \mathbf{r}_y^2 + \mathbf{r}_z^2})$, $(\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z)$ 为目标相对于相机的方向矢量。

$$T_{ep} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{f}{Z'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{Z'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: (u_0, v_0) 为图像中心点对应的像素坐标; dx, dy 像素大小; f 相机焦距; Z' 物点距离。

由渲染公式 (10) 可知,基于 BRDF 的渲染方程属于困难积分,无法精确计算其原函数,因此为获得更加逼真的目标图像,文中采用基于蒙特卡洛路径追踪算法的全局光照技术。在不考虑自发辐射的前提下,可将渲染方程改写成公式 (11)。

$$L(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_{\Omega} f(p, \omega_i, \omega_o) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (10)$$

式中: $L(p, \omega_o)$ 为 p 点沿 ω_o 方向出射的辐射亮度; ω_i 为入射光方向; ω_o 为出射方向; f 表示为 BRDF 的值; θ_i 为入射方向和表面法线的夹角; $L_e(p, \omega_o)$ 为 p 点指向 ω_o 方向的自发辐射亮度, 在天基成像场景中可忽略; $L_i(p, \omega_i)$ 为 p 点沿 ω_i 方向入射的辐射亮度。

$$L(p, \omega_o) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f(p, \omega_i, \omega_o) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i}{PDF(\omega_i)} \quad (11)$$

式中: N 为单个像元的采样频率; $PDF(\omega_i)$ 为入射光线概率密度函数。

对于简单随机路径追踪, 从相机出发的光线经多次弹射后由于随机采样未击中光源面, 则该路径对入瞳面的辐亮度无贡献, 计算效率低。因此对光源方向进行重要性采样以提高图像渲染速度, 其辐射传输路径如图 5 所示。

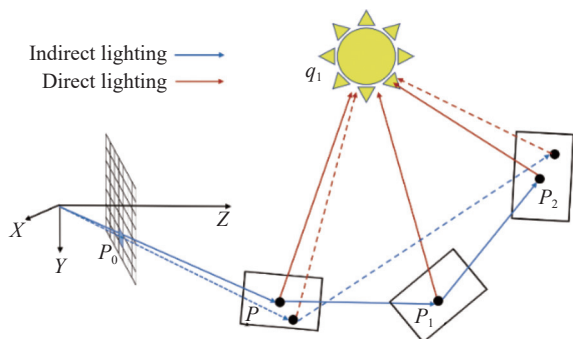


图 5 光源重要性采样光线辐射传输路径示意图

Fig.5 Schematic diagram of light source importance sampling for radiative transfer path

针对天基成像场景, 因目标和光源距离较远, 可将太阳及地反光源视为方向光源。在光源方向检查可见性, 将渲染方程改为直接光照与间接光的集合, 如公式 (12) 所示:

$$L(p, \omega_o) = L_{dir}(p, \omega_o) + L_{indir}(p, \omega_o) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{m=1}^M f_r(p, \omega_m, \omega_o) L_m V(p, q_m) + \frac{f_r(p, \omega_i, \omega_o) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i}{PDF(\omega_i)} \right) \quad (12)$$

式中: M 为成像场景中的光源数; $V(p, q_m)$ 为点 p 和光源 q_m 的可见函数, 由光线碰撞检测计算得到, 两点可见时为 1, 否则为 0。

路径追踪过程中光线和大多数三角形不相交, 使

用层次包围盒 (BVH) 根据光线和场景的三维空间关系减少冗余求交。其时间复杂度为 $O(\log_2 n)$, 图 (6) 所示为不同递归深度包围盒数量差异。

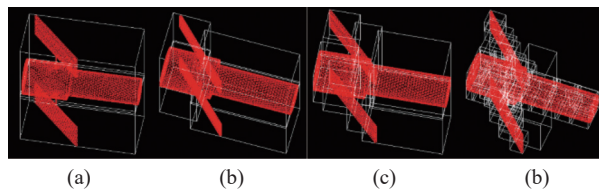


图 6 不同层深对应包围盒数量示意图。(a) 层深 1; (b) 层深 2; (c) 层深 4; (d) 层深 6

Fig.6 Illustration of the number of bounding boxes for different layer depths. (a) Layer depth 1; (b) Layer depth 2; (c) Layer depth 4; (d) Layer depth 6

由于太阳能电池板和聚酰亚胺包覆层反射能量主要集中在镜面反射方向 $\pm 15^\circ$ 范围内^[7], 为了提高收敛速度, 光线击中点的反射方向需在该抽样区间进行采样。采样方向的概率密度函数为 $f(\omega) = 1/(2\pi(1 - \cos \theta_1))$, 将其转换到球面坐标得 (θ, ϕ) 的联合密度概率函数为 $f(\theta, \phi) = \sin \theta / (2\pi(1 - \cos \theta_1))$, $\theta_1 = 15^\circ$ 。根据边缘及条件概率密度函数 $f(\phi), f(\theta|\phi)$ 可得 θ, ϕ 在球面坐标下的采样。最后通过逆分布函数获得抽样方向的三维坐标如公式 (14) 所示。

$$\begin{cases} f(\phi) = \frac{1}{2\pi} \\ f(\theta|\phi) = \frac{f(\theta, \phi)}{f(\phi)} = \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta_1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x = \sin \theta \cos \phi = \sqrt{1 - (1 - \varepsilon_2/w)^2} \cos(2\pi\varepsilon_1) \\ y = \sin \theta \sin \phi = \sqrt{1 - (1 - \varepsilon_2/w)^2} \sin(2\pi\varepsilon_1) \\ z = \cos \theta = 1 - \varepsilon_2/w \end{cases} \quad (14)$$

式中: $w = 1/(1 - \cos \theta_1)$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。

1.4 光电能量转换及成像调制模型

由 1.3 节计算可得面目标在相机入瞳处的辐亮度 L , 根据公式 (15) 计算到达像面的光子数 N_{o-} 。

$$N_{o-} = \frac{1}{h\nu} \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot L \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \cdot \tau_0 \cdot T \cdot S \quad (15)$$

式中: D/f' 为相机的相对孔径; T 为曝光时间; τ_0 为光学系统透过率; S 为单个像素像元面积; h 为普朗克常量; ν 为光波频率。

经光电转换和量化像元的灰度值表示为 $G_{gray} = (N_o - \eta / N_{full}) \times 2^{GRD}$, N_{full} 为饱和电子数, GRD 为量化位数, η 为量子效率。文中选取的成像仿真参数如表 4 所示。

成像系统的空间调制传递特性在最终成像结果上主要表现为图像模糊, 主要的空间调制效应包括相机的像差、离焦, 成像平台的线性运动及高频、随机抖动, 探测器的采样频率等。根据线性滤波理论, 光电成像链路系统可视为线性时空不变系统^[18-19], 分别建立系统各环节的传递函数模型并在频域进行级联相乘可得到系统整体传函, 即各效应对成像结果的影响可表示为调制传递函数 (MTF) 在频域上对二维图像的乘积。成像过程中的噪声主要包括光子噪声、暗电流噪声、探测背景噪声、读出噪声、量化噪声等, 各噪声对成像的影响可看作泊松和高斯分布函数在频域上的叠加。加性噪声及线性 MTF 对成像链路的影响如图 7 所示。

由傅里叶变换原理及表 4 参数可知, 频域采样间

隔 Δd 及截止频率 f_c 分别为如下式所示:

$$\Delta d = \frac{1}{N_s F_s} = 0.1502 \text{ lp/mm} \quad (16)$$

式中: N_s 为时域信号采样点数; F_s 为时域信号的采样频率。

$$f_c = \pm \frac{1}{2F_s} = \pm \frac{1}{2 \times 6.5 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} = 76.92 \text{ lp/mm} \quad (17)$$

表 4 镜头及探测器成像仿真参数

Tab.4 Parameters for lens and detector imaging simulation

| Item | Value | Item | Value |
|------------------------------|------------|--------------------|---------------|
| Focal length | 4.5 m | Number of pixels | 1024×1024 |
| Simulation band | 450-850 nm | Pixel size | 6.5 μm×6.5 μm |
| Camera aperture | 0.36 m | Quantum efficiency | 55% |
| Lens transmission efficiency | ≥ 0.7 | Full well charge | 30 K |
| Quantization bits | 11 | Readout noise | 2 e- |
| Number of pixel samples | 50 | Dark current noise | 35 e-/s |

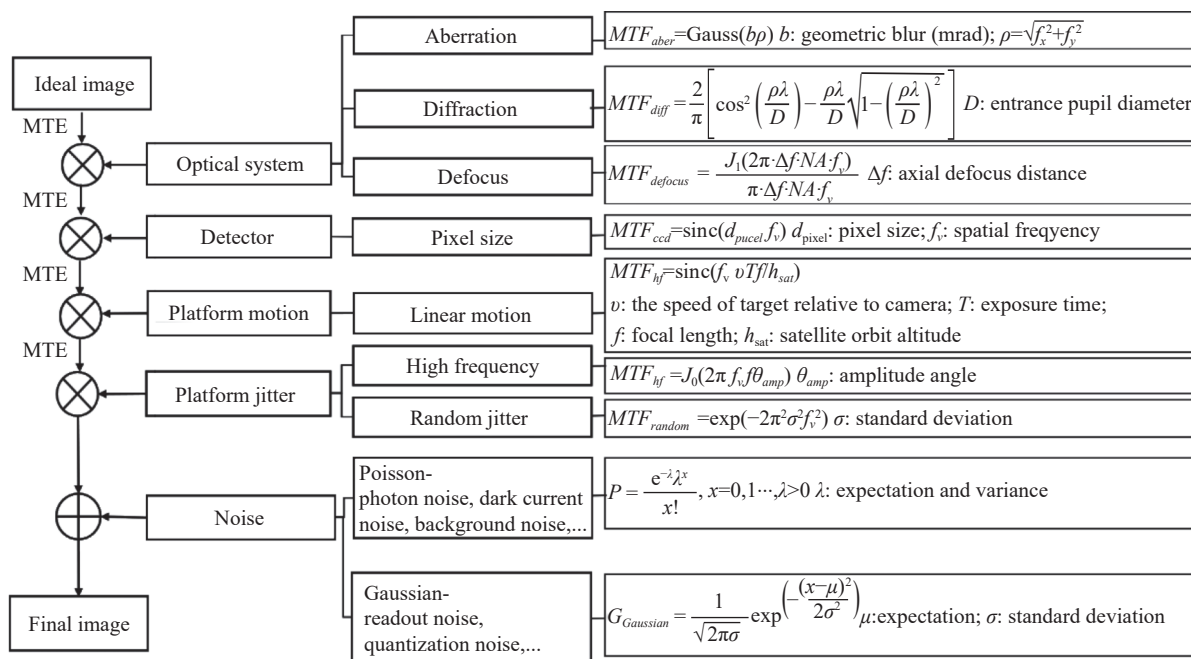


图 7 成像过程调制传递函数和噪声数学表示

Fig.7 Modulation transfer function and mathematical representation of noise in imaging process

2 仿真试验与结果分析

文中天基数字成像系统由 Visual Studio 2022 开

发, 主要用于实现对天基面目标的模拟成像。首先输入成像平台和目标的轨道六参数, 通过光学观测可见性模型获取目标的成像时间段; 其次导入目标三维

几何和 BRDF 材质拟合参数, 经成像辐射传输模型计算相机入瞳处辐亮度; 基于输入的镜头及探测器参数, 根据光电能量转换及成像调制模型, 最终输出空间面目标的数字成像结果。

2.1 相机、目标及太阳位置验证

文中通过 1.1 节可见性模型构建方法, 由表 5 给出的轨道六根数计算相机及目标在 J2000.0 坐标系下的位置矢量, 与 STK 中 Two Body 模式仿真结果对比如图 8 所示。24 h 及 15 d 内位置误差在 ± 0.005 m、 ± 0.02 m 的波动范围。

根据太阳位置计算模型, 获取 2022 年 1~6 月 1 日零时太阳位置, 与天文年历表结果对比如表 6 所示, 可得太阳位置的误差在秒量级。

表 5 在轨相机与目标轨道参数

Tab.5 On orbit camera and target orbit parameters

| Orbital | a/km | e | i |
|-----------|---------------|-----------|----------|
| Camera | 6868.8546 | 0.0066917 | 97.4154 |
| Satellite | 6796.7142 | 0.0006096 | 51.6417 |
| Orbital | ω | Ω | M |
| Camera | 140.0776 | 200.0074 | 183.0867 |
| Satellite | 117.6201 | 40.2943 | 7.3764 |

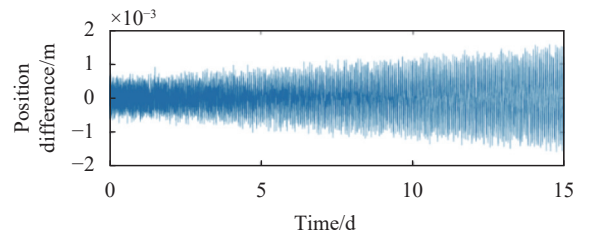
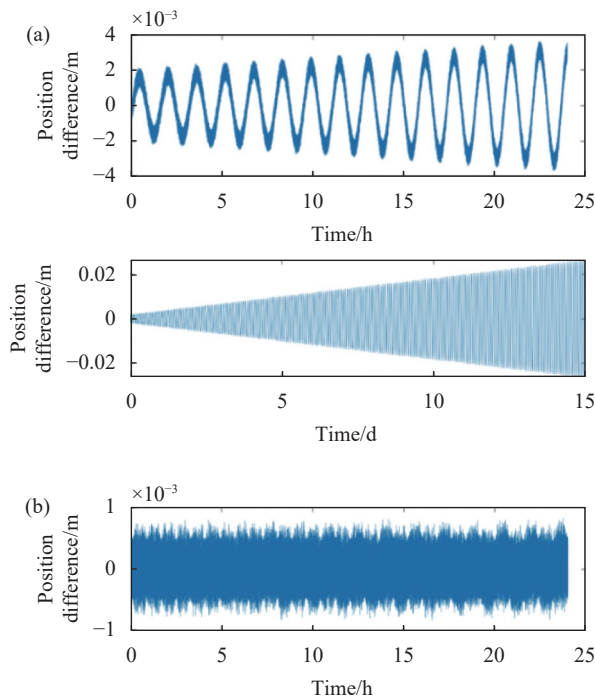


图 8 (a)、(b) 分别为相机、目标 24 h 及 15 d 内本数理模型计算结果与 STK 仿真结果的位置误差值

Fig.8 (a), (b) Represent the position error values between the calculated results of the camera and target for 24 hours and 15 days, respectively, using the mathematical model, and the simulated results from STK

表 6 2022 年 1~6 月 1 日零时太阳位置计算及参照表
Tab.6 Calculation and reference table for the position of the Sun at 00:00 on January 1st to June 1st, 2022

| Date | Calculation results | |
|----------|--|---|
| | Solar apparent right ascension/h m s | Solar apparent declination/(°)(')('') |
| Jan. 1st | 18 45 52 | -23 01 03 |
| Feb. 1st | 20 58 15 | -17 09 46 |
| Mar. 1st | 22 47 34 | -07 40 21 |
| Apr. 1st | 00 41 24 | 04 27 11 |
| May 1st | 02 32 49 | 15 00 32 |
| Jun. 1st | 04 35 39 | 22 01 18 |
| Date | Astronomical calendar query results | |
| | Solar geocentric right ascension/h m s | Solar geocentric declination/(°)(')('') |
| Jan. 1st | 18 45 48 | -23 01 13 |
| Feb. 1st | 20 58 12 | -17 10 07 |
| Mar. 1st | 22 47 31 | -07 40 25 |
| Apr. 1st | 00 41 21 | 04 26 54 |
| May 1st | 02 32 47 | 15 00 24 |
| Jun. 1st | 04 35 38 | 22 01 20 |

2.2 目标可视时间段验证

对目标进行几何通视、地影、探测距离 (300 km 内) 条件下 15 d 可见性分析并与 STK 仿真结果进行对

比,由图 9 可知,可视时间段无误差。由以上分析可知,相机、目标可见性模型构建过程中坐标转换及位置计算方法正确。

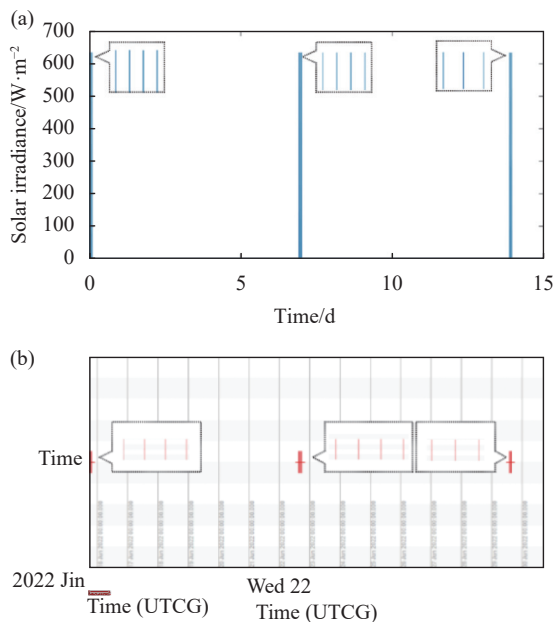


图 9 15 d 内目标可视时间段结果。(a) 可见性模型计算结果;
(b) STK 仿真结果
Fig.9 Results of target visibility time periods within 15 days. (a)
Visibility model calculation result; (b) STK simulation result

2.3 成像场景目标辐亮度仿真

根据表 5、6 所示的轨道及成像参数设置,在可见时间段内对空间目标进行数字成像。目标姿态为对地定向,光源设置为太阳光和地反光。太阳辐照度计算如 1.1.2 节所示,设地球为反射率为 0.3 的反射体,计算得地球的反射辐照度为 190.39 W/m²。

在可视时间段内每间隔 3 s 的成像结果如图 10 所示。由图可知,可见时间段内目标的相对位置、姿态及像元辐亮度表现符合真实空间场景成像过程。为观察成像阴影投射的准确性,调整目标的成像距离,不同姿态、不同光照下的成像结果如图 11 所示,由图中红色框图可以看出成像阴影显示正确,黄色框图体现出全局光照算法的多次弹射结果。

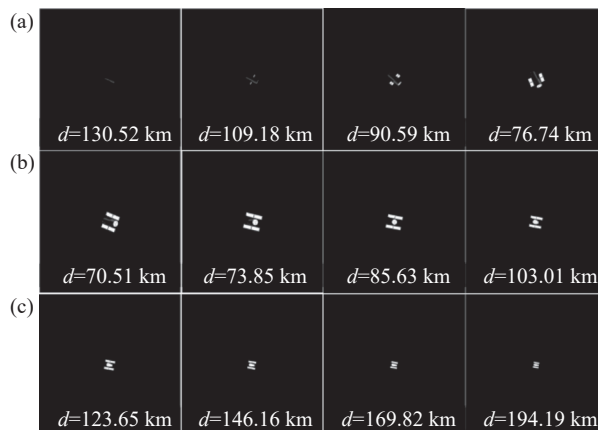


图 10 可见时间段内不同距离成像结果
Fig.10 Imaging results at different distances within the visible time period

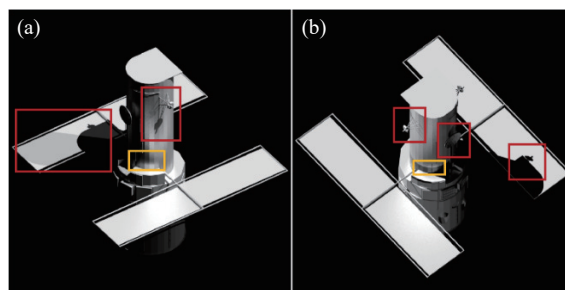


图 11 不同姿态及光照方向下成像结果
Fig.11 Imaging results under different poses and lighting directions

2.4 图像质量退化仿真

通过辐射传输模型获取目标辐亮度图像,根据 1.4 节中空间频率传递特性及噪声模型,对目标辐亮度图像进行处理生成最终的传感器输出图像。由图 7 可知导致图像质量退化的因素较多,以下给出成像平台高频振动及光子噪声对图像质量的影响分析及仿真结果。

成像平台高频振动 MTF 可看作零阶贝塞尔函数,其表达式如 (18) 所示,三维示意图及截止频率内的频谱图如图 12 所示。高频振动中不同振幅对 MTF 的影响如图 13 所示,由图可知振动频率越高,MTF 下降越快。图 14(b) 为高频振动作用后的成像结果。

$$MTF_{hf} = J_0(2\pi f_s A) \quad (18)$$

式中: f_s 为空间频率; A 为振幅。

光子噪声属于白噪声,服从泊松分布,其方差 $n_s = \sqrt{N_s}$,图 14(c)、(d) 分别为添加光子噪声及光子噪

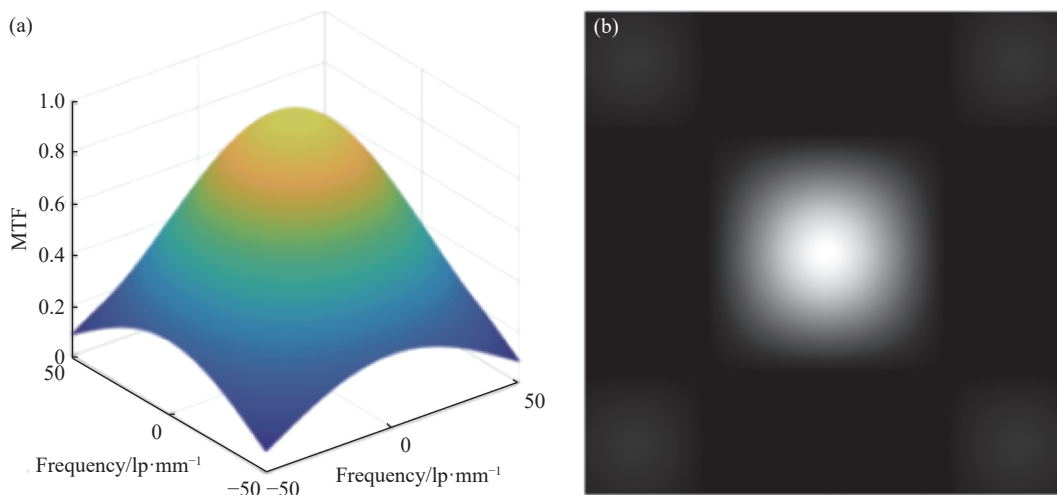


图 12 (a) 成像平台高频振动传递函数 MTF 三维示意图; (b) 截止频率内频谱图

Fig.12 (a) Three-dimensional schematic of the high-frequency vibration transfer function MTF for the imaging platform; (b) Spectrum plot within the cutoff frequency

声和 高频振动共同作用后的成像结果。

由添加高频振动及光子噪声后的成像结果可以看出,对目标辐亮度图像通过频域 MTF 乘积和时域噪声累加可以实现图像像质的退化。整个成像过程

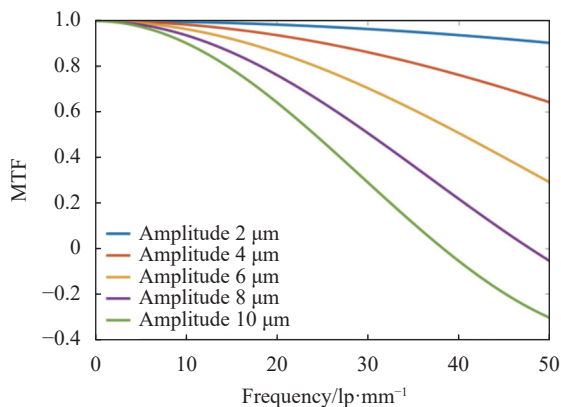


图 13 高频振动不同振幅对 MTF 的影响

Fig.13 The influence of different amplitudes of high-frequency vibrations on MTF

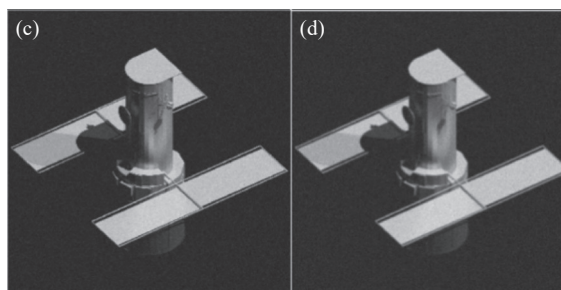


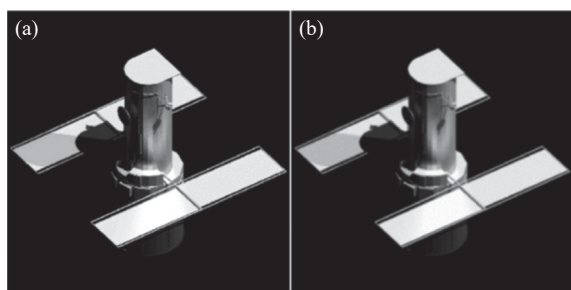
图 14 (a) 目标辐亮度图像; (b) 添加平台高频振动图像; (c) 添加光子噪声图像; (d) 高频振动及光子噪声共同作用图像

Fig.14 (a) Target radiance image; (b) Image with added high-frequency platform vibrations; (c) Image with added photon noise; (d) Image with the combined effects of high-frequency vibrations and photon noise

是多环节耦合的结果,尽可能全面的考虑各环节的 MTF 和噪声可使仿真结果更逼真。

3 结 论

文中从相机及目标的轨道参数出发,经相机及目标可见性模型、目标几何和光学特性模型、成像辐射传输模型、光电能量转换和成像调制模型,最终输出空间面目标数字成像结果。仿真结果表明:成像平台及目标 15 d 内的位置误差在 ± 0.02 m 波动范围,太阳位置误差为秒量级,通过对比 STK 可视时间段,验证了相机及目标可见性模型的准确性;模拟成像结果中目标姿态及像元辐亮度表现符合真实空间成像过程;目标成像阴影投射准确,符合光线多次弹射效果;通



过成像调制模型可模拟在轨成像中不同程度的像质退化效果。文中构建的成像链路数理模型可实现在不依赖于其他轨道及成像软件如 STK、OpenGL 前提下开展特定成像场景的数字化成像技术研究,为实体相机参数设计、探测器选型及地基成像数字孪生系统核心模块构建提供参考和依据。

后续可开展的工作包括:1) 进行空间背景模型构建,添加恒星库,计算相机视场内恒星的在探测像面的位置及灰度值;2) 研究无参图像质量评价算法,对仿真图像成像结果与实测图像进行客观质量评价。

参考文献:

- [1] Anderson R, Cantwell G. STK EOIR model description and validation[R]. US: Space Dynamics Lab, 2010.
- [2] Goodenough A A, Brown S D. DIRSIG 5: core design and implementation [C]//SPIE, 2012, 8390: 124-132.
- [3] Bush K, Crockett G, Barnard C. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: simulation predictions using the TASAT satellite model [C]//SPIE, 2002, 4481: 46-57.
- [4] Latger J, Cathala T, Douchin N, et al. Simulation of active and passive infrared images using the SE-WORKBENCH [C]//SPIE, 2007, 6543: 11-25.
- [5] Brner A, Wiest L, Keller P, et al. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 55(5): 299-312.
- [6] Lan Chaozhen. Modeling and detecting capability analysis of space-based space object optical observation system [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [7] Yang Jinsheng, Li Tiaojiao. Simulation of space-based space target scene imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0811004. (in Chinese)
- [8] Xu Xingxing. Space target spaceborne visible light camera imaging simulation[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [9] Yang Changcai, Tian Jinwen, Ye Jin, et al. Simulation of space targets imaging for a space based optical imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2410-2414. (in Chinese)
- [10] Wang Hao, Wang Xia, Liu Li, et al. Natural scene temperature field calculation and infrared radiation simulation based on OptiX [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 073101.
- [11] Han Yi, Chen Ming, Sun Huayan, et al. Imaging simulation method of TG-02 accompanying satellite's visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1218002. (in Chinese)
- [12] Li Shuxian. Simulation imaging calculation method of complex surface space target[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] Guo Biao. Physically-based imaging simulation for space target scenes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] Yu Kun. Research on key technologies of scene simulation and visual navigation for space target photoelectric detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [15] Chen Zhong, Duan Liming, Liu Lu. Feature-preserving uniform mesh smoothing algorithm [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(3): 461-467. (in Chinese)
- [16] Zhang Yize. Design and implementation of a new tetrahedron subdivision based on triangular grid[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [17] Zhang Hanlu, Wu Zhensen, Cao Yunhua, et al. Measurement and statistical modeling of BRDF of various samples [J]. *Optica Applicata*, 2010, 40(1): 197-208.
- [18] Xu Ningshan. Research on image quality assessment and improvement for visible remote sensing image[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences(The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [19] Zheng Yunda. Research on computational imaging technology of simple optical system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)

The construction method of space-based digital imaging link mathematical model

Li Yaru^{1,2}, Zhou Liang^{1*}, Liu Zhaohui¹, She Wenji¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Objective With the proposal of digital equipment construction, it is imperative to build space-based digital equipment that can simulate situational awareness capabilities. As one of the core equipment for space-based situational information acquisition, the optical imaging system is inevitably an integral part of the construction of space-based digital equipment systems. Establishing a scientifically and reasonably accurate model of space target imaging link is crucial for constructing a space-based digital imaging system. Additionally, due to the involvement of various scientific and technological fields, the construction of a space target imaging system is characterized by a large-scale system and a long development cycle. Traditional research methods are unable to meet the needs of key technology verification for space-based systems. Therefore, it is also necessary to construct this digital model. By using simulation and comprehensive integration, critical technologies of imaging systems can be validated. Additionally, it provides a demonstration environment for research on space target imaging technology and serves as an auxiliary tool for the design of space-based observation platforms.

Methods Based on Kepler's three laws and visibility analysis (Tab.2), this paper constructs a visible model for camera and target optical observations. Based on the uniform smoothing algorithm and advanced wavefront algorithm, the triangulated mesh division technique and the five-parameter bidirectional reflectance distribution function (BRDF) (Tab.3) are used to construct the geometric and optical characteristic model of the target. By employing path tracing and importance sampling of light rays, a global illumination algorithm (Fig.5) is used to construct the imaging radiative transfer model. Finally, the target radiance image undergoes optical-electric energy conversion and imaging modulation (Fig.7) to become the final output image of the sensor. This paper simulates target images satisfying visibility conditions using the Hubble Space Telescope as the imaging object, based on the given orbital parameters of imaging platform and space target.

Results and Discussions By comparing the visibility simulation results within 15 days of the two-body orbit model in Satellite Tool Kit (STK) (Fig.9), the correctness of the imaging visible model proposed in this paper is validated. The close-range imaging results of the target (Fig.11) demonstrate the accuracy of the global illumination algorithm in a multi-light source space-based imaging scenario. The quality degradation simulation results (Fig.14) indicate that the convolution of the frequency domain transfer function and the accumulation of temporal noise can simulate different levels of image quality degradation in on-orbit imaging. Under the conditions of a time interval of 3 seconds and a distance range of 70 to 200 km, imaging simulations were performed on the target with a Earth-oriented attitude. The imaging results (Fig.10) demonstrate that the imaging chain model can effectively generate target sequence images that satisfy the requirements of orbit monitoring conditions.

Conclusions This paper starts from the camera and target's orbital parameters and calculates the observable time

periods of the target under the condition of orbital flight using the camera and target visible model. Using the target geometry and optical characteristic model, the reflection of light source energy by targets with different materials and geometric shapes is described. The target radiance image is obtained by performing a rapid calculation of the visible parts of the target using the imaging radiative transfer model. Finally, the final sensor output image is generated through the process of photoelectric energy conversion and imaging modulation model. The imaging chain mathematical model constructed in this paper allows for the research of digital imaging technology in specific imaging scenarios without relying on other orbit and imaging software such as STK and OpenGL. It provides references and foundations for the design of physical cameras, detector selection, and the construction of core modules in the digital twin system for space-based imaging.

Key words: space-based imaging; mathematical model; global illumination; space target

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61805275)