

文章编号: 1672-8785(2019)11-0001-06

地球同步轨道空间相机的可见光通道 地球反照杂散光研究

陆 强^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 地球同步轨道空间相机的观测视场受到杂散光的严重影响, 因此需要对其进行定量化分析。针对该相机的可见光通道, 对地球反照杂散光进行了研究。采用等效面源积分法计算了可见光通道观测 6.5 等星时的信杂比, 并将其与实验室及在轨实测数据进行了对比(平均误差小于 15%)。结果表明, 仿真计算的精度较高。

关键词: 杂散光; 在轨测试; 点源透过率; 地球反照; 信杂比

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.11.001

Study on Earth-Reflected Stray Light in Visible Channel of Space Camera in Geosynchronous Orbit

LU Qiang^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The observation field of view of space camera in geosynchronous orbit is seriously affected by stray light, so it needs to be quantitatively analyzed. Aiming at the visible channel of the camera, the earth-reflected stray light is studied. The equivalent surface-source integration method is used to calculate the signal-to-noise ratio when observing the 6.5-magnitude star in the visible channel, and the calculation result is compared with the laboratory and on-orbit test data (the average error is less than 15%). The results show that the accuracy of the simulation calculation is high.

Key words: stray light; on-orbit test; point source transmittance; earth albedo; signal-to-noise ratio

0 引言

自 20 世纪 70 年代以来, 随着海洋、环境、地质、测绘等各领域对高性能空间相机的

需求的日益增长, 高精度和定量化已经成为空间相机的重要指标。对于工作在三轴稳定静止轨道卫星平台上的空间相机来说, 其观测视场

收稿日期: 2019-07-26

作者简介: 陆强(1985-), 男, 江苏淮阴人, 博士, 副研究员, 主要从事光学设计、装校及测试方面的研究。E-mail: luqiangac@126.com

受到太阳和地球的共同影响。由于太阳、相机、卫星平台之间的位置存在季节和昼夜周期变化,相机仪器自身的探测能力也会出现周期变化。因此,杂散光是地球同步轨道空间相机能否实现高精度和量化的重要因素。

杂散光会减小光学系统的调制传递函数,使整个画面的层次减少,清晰度变差;严重时还会形成杂散光斑点,甚至导致整个系统失效^[1-2]。例如,风云二号(FY-2)辐射计的可见光、红外和水汽通道图像均出现了不同程度的杂光信号饱和^[3];美国的 GOES-8 地球同步业务环境卫星在午夜成像时出现了严重的杂散光问题^[4],并由此关机。如今几乎所有的光学遥感相机都进行了杂光抑制设计。比如即将发射的欧洲空间局(ESA)木星冰卫探测器(JUICE)太空任务的 JANUS 相机进行了杂光系数计算(约 1%)^[5];美国詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)采用划分天区的方法计算了天空半球对相机的杂散光辐射^[6];美国 3.5 m 地基望远镜通过采用主镜遮光罩和窗口狭缝来提高杂散光抑制能力^[7];ESA 的欧几里得(EUCLID)暗物质探测相机进行了杂散光计算,其鬼像杂散光能量仅为目标能量的 10^{-7} ^[8];高分四号卫星相机的可见光通道采用杂光抑制设计后,杂光系数为 1.1%^[9];实践九号卫星采用了基于杂散光空间分布特征函数的图像消杂光方法^[10]。

地球反照杂散光对相机观星的影响研究少有报道。本文针对某地球同步轨道空间相机的可见光通道,采用等效面源积分法计算一天内由可见光通道观测 6.5 等星时地球反

照杂散光的影响,并通过对实验室测试和在轨实测数据进行对比分析来验证仿真模型的精度。

1 相机光学结构概述

针对此地球同步轨道空间相机的可见光通道,运用 TracePro 软件来分析地球反照杂散光对该通道的影响。相机的光学模型采用“指向镜+离轴三反+多谱段后光路”结构(见图 1)。平行光照射到指向镜并被反射后,经过孔径光阑依次照射到主镜、次镜和三镜。在次镜与三镜之间的一次像面处,设置了视场光阑。后光路采用分色片分光的方式,通过分色片 1 和分色片 2 实现了通道 1、通道 2 和通道 3 的分光。其中,通道 1 即为可见光通道。

图 2 所示为该相机的工作模式。其中,实线区域内是相机的工作视场,O 点为星下点,A 点、B 点和 C 点分别是工作视场的北极限、西北极限和南极限。通过转动指向镜可以实现工作视场内的大范围探测。若要观测恒星,相机的指向镜可从星下点移至工作视场边缘(如 A 点、B 点或 C 点)。我们选取 6.5 等星进行观测。

2 地球反照杂散光的仿真计算结果

正午时地球会被太阳照亮,其照亮部分会将太阳杂散光反照至相机,进而影响可见光通道的观星探测能力。因此,本节通过对地球反照杂散光进行仿真来计算其对可见光通道观星的影响。

该相机采用了离轴三反的结构形式。由于东西对称、南北非对称,首先需计算点源透过

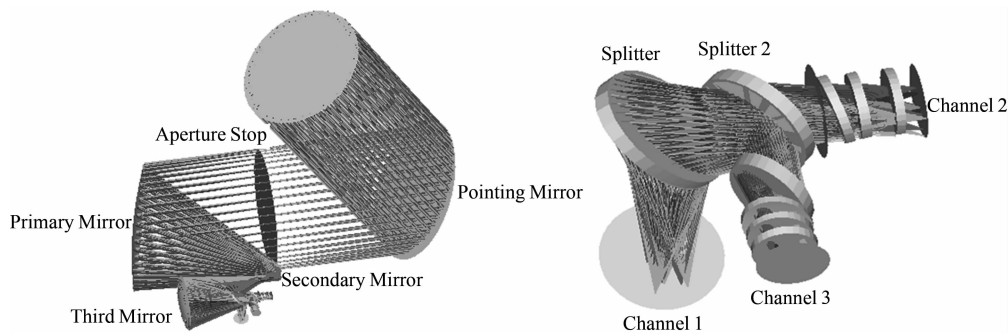


图 1 空间相机的光路示意图

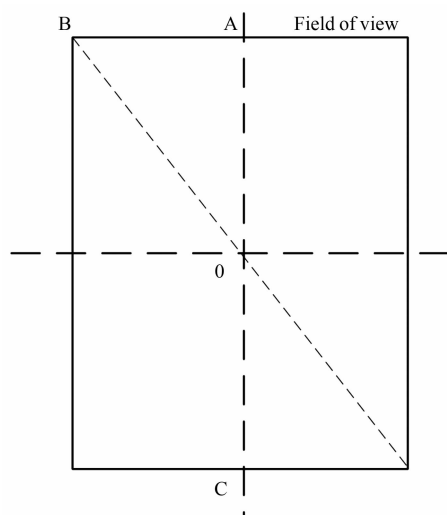


图 2 空间相机的工作模式

率(Point Source Transmittance, PST)函数, 分析图 2 中南北方向、东西方向和斜轴方向上的三条曲线。不同离轴角度的 PST 值仅取决于像面上的辐照强度与入口处辐照度的比值。

如图 3 所示, 对于地球同步轨道空间相机来说, 太阳光对地入射方向与相机观测方向的夹角 θ 在一天内是作周期变化的。该变化周期等于地球自转周期, 每小时变化的角度为 15° 。 θ 为 0° 时是正午时刻, 相机观测到的地球圆盘都被太阳照亮, 均可将太阳光反照至相机; θ 为 180° 时是午夜时刻, 相机观测到的地球圆盘没被太阳照亮, 此时没有太阳光通过地球反照进入相机。

为了获得地球反照的太阳光在相机可见光通道探测器上所产生的辐照度, 需要知道相机观测的地球圆盘上被太阳光照亮部分的面积

(图 3 中 AB 部分所对应的面积)、AB 区域在太阳直射方向上的地球大圆盘内的投影面积 S_1 、AB 区域在相机观测的地球圆盘内的投影面积 S_2 以及 AB 区域的反照太阳光的等效辐射能通量密度 E 。设地球对太阳光的反照率为 ρ , 太阳光在地球表面上的辐照度(可见光波段)为 H_1 , 则

$$E = \frac{\rho H_1 S_1}{S_2} \quad (1)$$

对于地球反照的太阳可见光波段的杂散辐射, 应按照面源来处理, 故需要在相机观测的地球圆盘上对所计算的 PST 值进行积分。本文采用了等效面源积分法。首先, 将对地高度为 I 的相机所观测到的地球圆盘划分成有限的面元(各面元相对于观测位置的离轴角不同); 然后计算离散的离轴角处的 PST 值, 并采用数值方法对各离轴角进行积分, 得到 S_2 区域内各面元的 $PST(\theta)$; 通过对 $PST(\theta)$ 进行加权平均来得到 $PST(S_2)$, 最终算得地球反照太阳光在可见光通道探测器上的辐照度:

$$M = \frac{ES_2}{\pi I^2} PST(S_2) \quad (2)$$

通过 TracePro 软件仿真, 得到指向镜指向北极限 A 点和西北极限 B 点时, 南北、东西和斜轴三个方向上的 PST 曲线(见图 4 和图 5)。由于观测视场关于 B 点不对称, 当指向镜指向 B 点时, 追迹了西北向和东北向两条斜轴方向。利用图 4 和图 5 中指向镜指向 A 点和 B

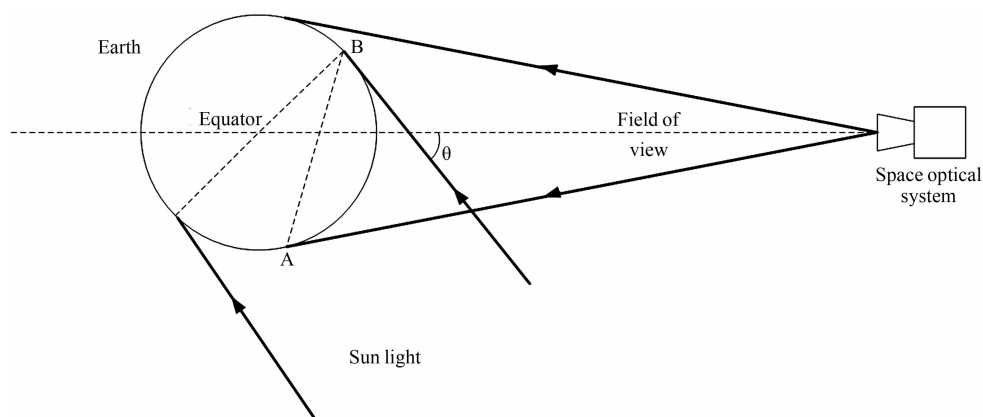


图 3 太阳入射方向与相机观测方向的示意图

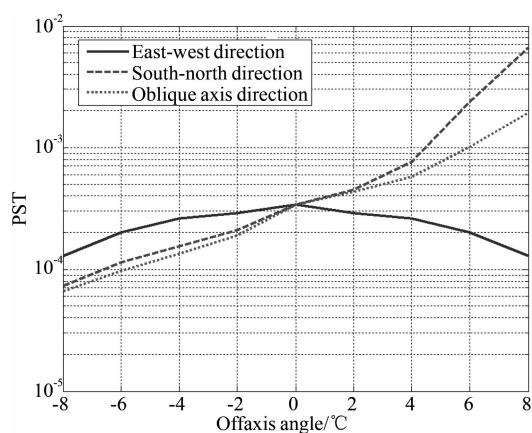


图 4 相机指向镜指向 A 点处可见光通道的 PST(θ) 曲线

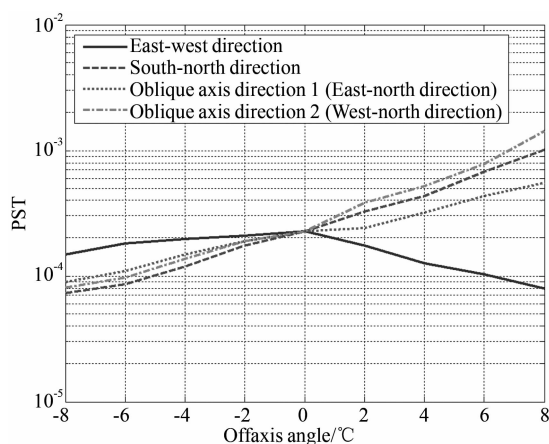


图 5 相机指向镜指向 B 点处可见光通道的 PST(θ) 曲线

点的 PST 曲线, 通过式(2)即可算得地球反照光在可见光通道探测器上的辐照度。

两颗星等分别为 m_1 和 m_2 的恒星在地球表面上的辐照度 E_1 和 E_2 的关系式为

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{(m_2 - m_1)/2.512} \quad (3)$$

已知太阳的视星等为 -26.8 等, 太阳光在地球表面上的辐照度(可见光波段)为 300 W/m^2 , 因此 6.5 等星在地球表面上的辐照度(可见光波段)为 $H_{6.5} = 1.66 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2$, 则 6.5 等星在相机可见光通道探测器的一个像元上所产生的辐照度为

$$H_0 = H_{6.5} \cdot \frac{\pi D^2}{4a^2} \cdot \tau_0 \cdot E_{nc} \quad (4)$$

式中, D 为相机口径; a 为探测器的像元尺寸; τ_0 为光学效率; E_{nc} 为能量集中度。通过计算可得到 $H_0 = 7.34 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 。

图 6 和图 7 所示为一天不同时刻下相机可见光探测器观测 6.5 等星时的信杂比曲线。可以看出, 当太阳位于北 10° 的午夜时, 太阳光直接进入相机的观测视场, 观星信杂比趋于 0; 当太阳位于北 0° 的午夜时, 相机进入地球阴影区, 观星信杂比趋于 ∞ 。

3 实验室测试结果

根据相机的在轨工作模式, 我们对正午时刻的相机观星信杂比进行实验验证。采用大口径积分球模拟相机在正午时刻观星时的地球反照杂散光; 采用小口径积分球+平行光管+遮挡遮光罩来模拟 6.5 等星。

3.1 地球反照杂散光的模拟

将 $\phi 550 \text{ mm}$ 积分球放置在相机前方, 令

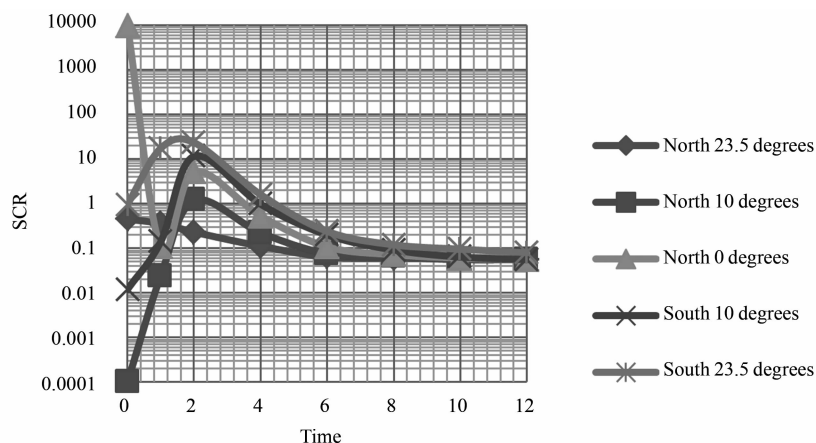


图 6 相机指向镜指向 A 点时, 一天内可见光通道观测 6.5 等星的信杂比曲线

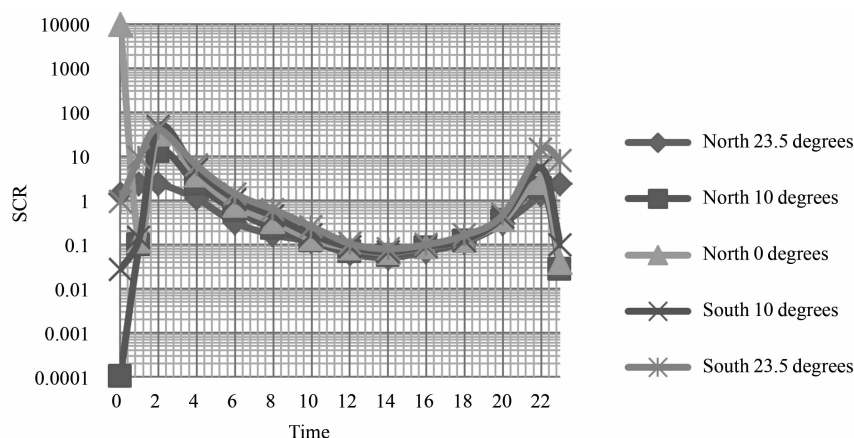


图 7 指向镜指向 B 点时, 一天内可见光通道观测 6.5 等星的信杂比曲线

它相当于约一个太阳常数的光强(其开口相对相机的张角约为 17°), 然后综合评价相机对地球反照杂散光的抑制能力。当积分球亮度为 1 个太阳常数时, 分别测试星下点、A、B、C、D、E、F 七个点的探测器响应(见图 8 及表 1), 进而得到相机对地球反照杂散光的抑制能力。

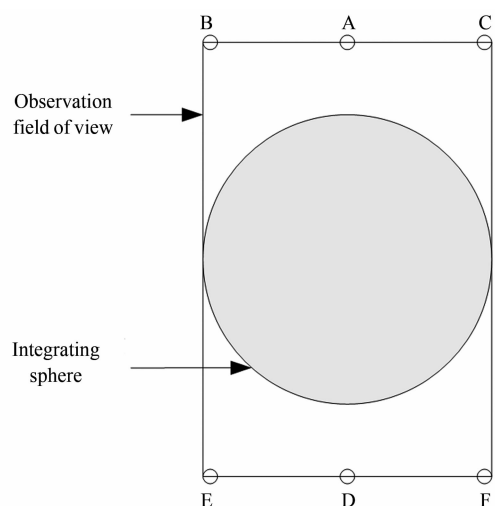


图 8 积分球测试的工况示意图

3.2 6.5 等星模拟

在实验室内利用基于积分球+平行光管+遮挡遮光罩模拟地面目标的方法来对 6.5 等星进行定标, 如图 9 所示。其中采用 SYSTEM-150 可见积分球以及口径为 700 mm 的平行光管。将积分球放置在平行光管的焦面上, 并将相机置于平行光管的出口处。通过调整相机位置和指向镜使相机光轴与平行光管光轴重合, 然后将积分球的电流调至对应于 1 个太阳常数的水平。

对于口径为 700 mm 的平行光管来说, 要模拟 6.5 等星, 需将遮光罩口径遮挡为 22.0 mm^2 。6.5 等星所对应的探测器 DN 值为 553.24。计算指向镜分别指向 A 点和 B 点以及观测 6.5 等星时地球反照杂散光对其的影响(结果见表 2)。

4 在轨测试结果

在轨观星时, 获取所需分析时次的可见光通道观星图像数据、相应时间的卫星部分状态

表 1 积分球测试数据

积分球亮度	指向镜位置	积分时间/ μs	减背景后的 DN 值
1 个太阳常数	星下点	74	3543.72
	A	5896	2148.45
	B	5896	1930.32
	C	5896	1948.53
	D	5896	2158.12
	E	5896	1950.68
	F	5896	1980.34

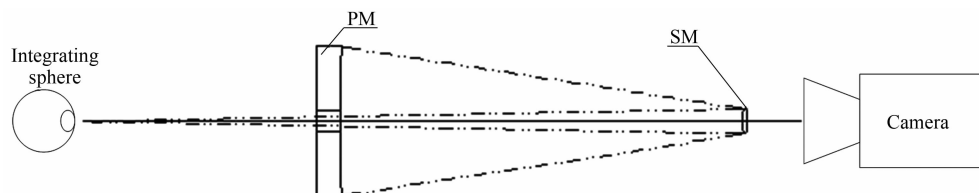


图 9 6.5 等星模拟的示意图

表 2 可见光通道观星杂散光影响实验室测试结果

指向镜位置	积分时间/ms	6.5 等星 DN 值	地球反照杂散光的等效 DN 值	信杂比(实验室测试)	信杂比(仿真)	仿真误差
A	29.9	553.24	10895.29	0.051	0.056	9.80%
B	29.9	553.24	9787.1	0.057	0.067	17.54%

表 3 可见光通道观星时受杂散光影响情况的在轨测试结果

序号	观测时刻	星等	信号 DN 值	背景平均 DN 值	信杂比	等效 6.5 等星信杂比	信杂比(仿真)	仿真误差
1	4:33:00	5.05	746	46	16.22	4.293	3.98	7.29%
2	8:49:49	5.75	377	415	0.91	0.457	0.398	12.91%
3	8:49:49	6.35	208	450	0.46	0.403	0.398	1.24%
4	9:23:00	4.4	1860	895	2.08	0.303	0.249	17.82%
5	9:23:00	7.75	86	895	0.1	0.302	0.249	17.55%
6	10:30:40	6.139	515	2190	0.235	0.169	0.131	22.49%
7	12:31:00	6.8	110	1834	0.06	0.063	0.076	20.63%
8	16:31:00	6.48	204	2017	0.1	0.099	0.083	16.16%
9	18:30:17	5.2	780	1606	0.48	0.14	0.162	15.71%
10	21:00:00	6.45	105	43	2.44	2.332	1.99	14.67%
11	21:00:00	5.65	206	43	4.79	2.198	1.99	9.46%
平均仿真误差								14.18%

信息。统计分析可见光通道观星的信号光强度以及背景的杂散均值，并对其分布情况进行观察。表 3 列出了测试结果。可以看出，可见光通道观测等效 6.5 等星时的信杂比在正午最低，一天的观星信杂比范围在 0.06~4.3 之间。通过将在轨测试结果和仿真计算结果进行对比，可知平均误差小于 15%。

5 结束语

本文分析了空间相机可见光通道观星时受地球反照杂散光的影响情况。通过建立模型进行仿真，并利用等效面源积分法计算一天不同

时刻下地球反照杂散光在可见光探测器上的辐照度，进而计算出观星的信杂比。然后将其与实验室及在轨实测的观星信杂比进行了对比（平均误差小于 15%）。结果表明，该模型建立准确，仿真计算的精度较高。

参考文献

- [1] 张凯, 何欣, 刘强. 空间可见光相机的杂散光分析与抑制 [J]. 红外, 2014, 35(9): 10-14.
- [2] 陈醒, 胡春晖, 颜昌翔. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制 [J]. 中国光学, 2019, 12(3): 678-685.

(下转第 48 页)