

## 航天 TDI 推扫式光学遥感器机动成像质量

汪巧萍, 齐文雯, 谭 伟

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 从分辨率和辐亮度两个角度出发, 对 TDI 推扫相机机动成像模式下的成像质量进行了分析。首先, 提出了视轴追迹法分析计算 TDI 和线阵两个方向的分辨率, 通过构建侧摆和星下点之间的坐标转换矩阵, 得到不同机动角度下 TDI 和线阵方向的单位矢量, 随后计算出这两个方向的单位矢量沿着视轴方向在地面的投影矢量, 结合相机的参数和轨道高度、地球半径等计算出地面像元分辨率。同时根据卫星在地面的投影速率得到不同视场的积分时间, 并分析以中心视场为积分时间基准下, 边缘视场在不同 TDI 级数下的 MTF 退化情况。以某遥感型号为例进行了具体的分析计算, 并根据 MTF 的退化情况对侧摆角度提出了要求, 计算结果表明, 边缘谱段在大侧摆下 TDI 级数为 60 时, MTF 已下降为 0, 在轨使用时要慎重选用级数。然后, 结合理论计算和在轨图像分析了不同侧摆角度下大气对图像对比度的影响, 通过分析表明侧摆会改变大气传输路径, 从而影响目标的对比度, 分析结果可以为后期的图像校正提供参考。

**关键词:** 航天光学遥感; 机动成像质量; 视场边缘 MTF; 视轴追迹; 大气对比度

**中图分类号:** V445.8      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20220094

## Maneuvering imaging quality of space TDI push scan optical remote sensor

Wang Qiaoping, Qi Wenwen, Tan Wei

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The imaging quality of TDI push broom camera in maneuvering imaging mode is analyzed from the perspectives of resolution and radiance. Firstly, the Los tracking method is proposed to analyze and calculate the resolution of TDI and linear array directions. By constructing the coordinate conversion matrix between sidesway and satellite points, the unit vectors of TDI and linear array in different maneuver angles are obtained. Then, the projection vectors of the unit vectors in two directions on the ground are calculated along the Los direction, the ground pixel resolution is calculated, combined with the parameters of the camera, the orbital height and the earth radius. At the same time, the integration time of different fields of view are obtained according to the projection rate of the satellite on the ground, and the MTF degradation of edge fields of view under different TDI stages is analyzed with the reference integration time of central field of view. Taking a remote sensing model as an example, the specific analysis and calculation are carried out, and the requirements for the yaw angle are put forward according to the degradation of MTF. The calculated results show that the MTF of the edge spectrum section has decreased to 0 when the TDI series is 60 under the large side sway, so the TDI stage should be selected carefully in orbit. Then, combined with the theoretical calculation and on orbit image, the influence of the atmosphere on the image contrast under different side or yaw angles is analyzed. The analysis shows that the yaw will change the atmospheric transmission path, thus affecting the target contrast. The analysis results can provide a reference for the later image correction.

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (42050202)

作者简介: 汪巧萍, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天光学遥感器设计相关方面的研究。

**Key words:** space optical remote sensing; maneuvering imaging quality image; MTF of edge field; Los tracking method; atmospheric contrast

## 0 引言

机动成像是减小遥感卫星重访周期,进行应急观测的主要成像模式。卫星机动成像会引起大气传输路径、分辨率等发生变化<sup>[1-2]</sup>,不仅导致大气对比度变化,对于 TDI 推扫式传感器,还会引起不同视场的积分时间差异,从而引起在轨调制传递函数(MTF)的变化<sup>[3]</sup>,下面主要从分辨率和辐亮度两个方面分析机动模式对 TDI 推扫相机的成像质量影响。

TDI(Time Delay Integration)推扫成像是目前中低轨高分辨率光学遥感器的主要成像方式,主要以模拟或数字信号的累计方式进行时间延迟积分,提高了图像传感器的 SNR(Signal Noise Ratio)和灵敏度。TDI 推扫成像要求不同级的同一像元对同一目标成像,才能保证最终的成像质量,因此对积分时间同步性提出了严格的要求。理想的积分时间是地物在焦面成的像移动一行(级)TDICCD 所需要的时间,当满足理想积分时间条件时,像的移动速度和 TDICCD 电荷转移速度相同,没有像移;否则会导致像移,系统 MTF 下降。

## 1 机动模式对 TDI 推扫传感器的成像质量分析

在轨成像时,相机的积分时间与卫星的机动角度有关。星下点成像时,线阵各点的像速度可以认为相同,积分时间也相同;机动成像时,线阵各点像速度不相同,且差异随着机动角度和视场角的增大而变大。如果全视场采用相同的积分时间,会引入积分时间误差,从而导致图像的 MTF 下降<sup>[4-5]</sup>。

同时,侧摆还会引起大气传输路径的改变,其影响主要体现在同样的地物目标经过不同的传输路径到达相机后,大气对其产生的影响不同,这会导致不同侧摆角度下相机的入瞳辐亮度发生变化,同时背景和目标的对比度变化还会对图像的对比度产生影响。

## 2 机动成像对成像质量的计算分析过程

### 2.1 不同视场分辨率的计算流程

分辨率计算采用各视场点视轴追迹方法,分析各矢量沿着不同视场的视轴在地面的投影矢量。首先根据卫星星下点成像的坐标系和侧摆坐标系之间的关系构建坐标系转换矩阵,建立不同视场的视轴矢量随侧摆或俯仰角度的变化函数,然后根据沿轨和垂轨方向的像方矢量分别得到在地面投影的矢量,根据以上矢量得到地面像元分辨率,同时计算卫星飞行速度在地面像元的投影速率,从而分析出不同视场的积分时间随侧摆角度变化的函数。此外,还通过影像坐标转换关系对视轴追迹方法进行了验证<sup>[6-9]</sup>。

分辨率计算具体实现步骤如下:

(1) 设定参数

$P$ : 像元尺寸;  $f$ : 相机焦距;  $h$ : 轨道高度;  $R$ : 地球半径;  $\theta$ : 侧摆角度;  $\varphi$ : 俯仰角度

(2) 设定星下点坐标系  $C1$

+ $X$ : 卫星飞行方向 [1 0 0]; + $Z$ : 卫星指向星下点 [0 0 1]; + $Y$ : 线阵方向,根据  $X$  和  $Z$  右手螺旋定则规定 [0 1 0]

(3) 根据相机不同视场角计算观测视轴在相机本体坐标系中单位矢量  $r_{sz}$ :

$$r_{sz} = [\tan(\theta_x) \tan(\theta_y) \ 1] / |\tan(\theta_x) \tan(\theta_y) \ 1| \quad (1)$$

式中:  $\theta_x$  表示  $X$  方向的视场角;  $\theta_y$  表示  $Y$  方向的视场角;  $||$  表示取模(后同),表示对矢量进行归一化。

(4) 计算卫星侧摆或俯仰后,相机视轴、沿轨( $X$ 方向)和垂轨( $Y$ 方向)的单位矢量在星下点坐标系中的矢量,假定相机先绕滚动轴旋转  $\theta$ 、再绕俯仰轴旋转  $\phi$ 。

视轴方向单位矢量  $r_{sz}$  为:

$$r_{sz} = \frac{\begin{bmatrix} \tan(fovx) & \tan(fovy) & 1 \\ \tan(fovx) & \tan(fovy) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \tan(fovx) \cos\varphi - \tan(fovy) \sin\theta \sin\varphi + \cos\theta \sin\varphi \tan(fovy) \cos\theta + \sin\theta \\ -\tan(fovx) \sin\varphi - \tan(fovy) \sin\theta \cos\varphi + \cos\theta \cos\varphi \end{bmatrix}} \quad (2)$$

沿轨方向单位矢量 $r_{yg}$ 为:

$$r_{yg} = [1 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} = [\cos \phi \ 0 \ -\sin \phi] \quad (3)$$

垂轨方向单位矢量 $r_{cg}$ 为:

$$r_{cg} = [0 \ 1 \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} = [-\sin \theta \sin \phi \ \cos \theta \ -\sin \theta \cos \phi] \quad (4)$$

(4) 计算机动后, 视轴到地面之间的距离

视轴与 Z 轴之间的夹角 $\delta$ 为:

$$\delta = \arccos \left( \frac{-\tan(\theta_x) \sin \phi - \tan(\theta_y) \sin \theta \cos \phi + \cos \theta \cos \phi}{|\tan(\theta_x) \tan(\theta_y) \ 1|} \right) \quad (5)$$

则中心到地面的距离:

$$L = \cos(\delta) \times (R + h) - \frac{\sqrt{4(\cos(\delta))^2 \times (R + h)^2 - 4h^2 - 8Rh}}{2} \quad (6)$$

(5) 计算机动后, 沿轨和垂轨两个方向单位矢量在地面的投影矢量 $r_{ygy}$ 和 $r_{cgy}$

首先引入地面点的法向矢量 $r_{fx}$ 为:

$$r_{fx} = (R + h) \times [0 \ 0 \ 1] - L \times s_{zsl} \quad (7)$$

沿轨方向在地面的投影矢量 $r_{ygy} = r_{sz} \times k_1$ ( $k_1$ 为视轴方向上的部分沿轨矢量系数), 垂轨方向在地面的投影矢量 $r_{cgy} = r_{cg} + r_{sz} \times k_2$ ( $k_2$ 为视轴方向上的部分垂轨矢量系数), 根据地面法向矢量与地面任意矢量垂直的法则, 得到:

$$\begin{aligned} (r_{yg} + r_{sz} \times k_1) * r_{fx} &= 0 \\ (r_{cg} + r_{sz} \times k_2) * r_{fx} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

得到:

$$\begin{aligned} k_1 &= -\frac{r_{yg} * r_{fx}'}{r_{sz} * r_{fx}'} \\ k_2 &= -\frac{r_{cg} * r_{fx}'}{r_{sz} * r_{fx}'} \end{aligned} \quad (9)$$

矢量示意图如图 1 所示。

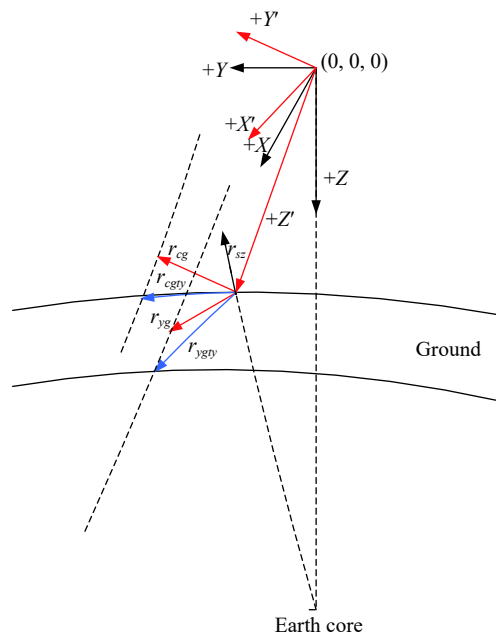


图 1 矢量示意图  
Fig.1 Vector diagram

(6) 计算沿轨和垂轨两个方向的分辨率 $S_{yg}$ 和 $S_{cg}$

$$S_{yg} = \frac{L \times p}{f} \times |r_{ygy}| \quad (10)$$

$$S_{cg} = \frac{L \times p}{f} \times |r_{cgy}| \quad (11)$$

(7) 计算卫星飞行速度在地面的投影速度分量  
根据万有引力定律和向心力运动定律, 得到:

$$V_{ty} = \sqrt{\frac{G \times M \times R}{(R + h)^3}} \quad (12)$$

式中:  $G$  为外有引力常数;  $M$  为地球质量;  $R$  为地球半径, 与经纬度有关;  $h$  为轨道高度, 与经纬度有关。

(8) 根据不同视场角度分别计算得到两个方向的 GSD, 然后以中心视场为积分时间设置基准, 其余视场由于积分时间不同步造成的 MTF 下降情况。

$$MTF(f) = \frac{\sin(f \times \Delta d \times \pi \times N)}{N \times \sin(f \times \Delta d \times \pi)} \Delta d = \left| \frac{S1 \times V2}{S2 \times V1} - 1 \right| \quad (13)$$

式中:  $\Delta d$  为单级积分时间内的不同步率;  $S1$  为当前视场的分辨率;  $S2$  为基准视场的分辨率;  $V1$  为当前视场地面投影速度;  $V2$  为基准视场地面投影速度。

## 2.2 辐亮度影响分析

机动成像时辐亮度影响主要体现在大气对比度变化和镜面反射两方面, 大气对比度会引起图像

MTF 的变化,主要表现在地面景物目标经过大气后到达相机入瞳处的对比度发生变化<sup>[10-13]</sup>。地面景物的对比度定义为:

$$C_1 = \frac{\rho_{\text{目标}} - \rho_{\text{背景}}}{\rho_{\text{目标}} + \rho_{\text{背景}}} \quad (14)$$

式中:  $\rho_{\text{目标}}$  和  $\rho_{\text{背景}}$  分别为地面目标和背景的反射率。

地面景物经过大气到达相机入瞳处的辐亮度对比度定义为:

$$C_2 = \frac{L_{\text{目标}} - L_{\text{背景}}}{L_{\text{目标}} + L_{\text{背景}}} \quad (15)$$

式中:  $L_{\text{目标}}$  和  $L_{\text{背景}}$  分别为地面目标和背景到达相机入瞳处的辐亮度。

用大气传递函数来表示地面景物经过大气后到达相机入瞳处的对比度变化因子,即:

$$K = \frac{C_2}{C_1} \quad (16)$$

同时在机动成像过程中,还要考虑不同角度的镜面反射现象,即对表面比较光亮的物体成像,某些角度可能会形成镜面反射(类似逆光成像)。某卫星在多角度成像时,对同一条河流成像过程中,前俯仰、星下点和后俯仰成像时输出亮度的差别较大<sup>[14-16]</sup>。

### 3 机动成像质量分析结果

#### 3.1 分辨率计算结果

根据 2.1 节分析过程对某九谱段相机载荷的在轨分辨率和 MTF 进行分析。相机输入参数如表 1 所示。

表 1 相机参数

Tab.1 Camera parameters

Parameters name	Result
Camera focus/mm	1 120
Pixel size	B1-B8: 28 P: 7
Orbit height/km	782
Roll angle/(°)	[-30,30]
Pitch angle/(°)	[-25,+25]

首先根据探测器在焦面上的布局分别得到 9 个谱段中心和边缘在相机视场中的位置,如表 2 所示。相机九谱段之间的成像示意如图 2 所示。

表 2 不同谱段相机视场

Tab.2 Camera field of different bands

Band	Field/(°)		
	0	+2.24	-2.24
B1	(+123.65, 0)	(+123.65, +43.8)	(+123.65, -43.8)
B4	(+129.78, 0)	(+129.78, +43.8)	(+129.78, -43.8)
B6	(+133.56, 0)	(+133.56, +43.8)	(+133.56, -43.8)
B8	(+137.31, 0)	(+137.31, +43.8)	(+137.31, -43.8)
B2	(+123.65, 0)	(+123.65, +43.8)	(+123.65, -43.8)
B3	(+127.77, 0)	(+127.77, +43.8)	(+127.77, -43.8)
B5	(+131.55, 0)	(+131.55, +43.8)	(+131.55, -43.8)
B7	(+134.65, 0)	(+134.65, +43.8)	(+134.65, -43.8)
P	(+137.76, 0)	(+137.76, +43.8)	(+137.76, -43.8)

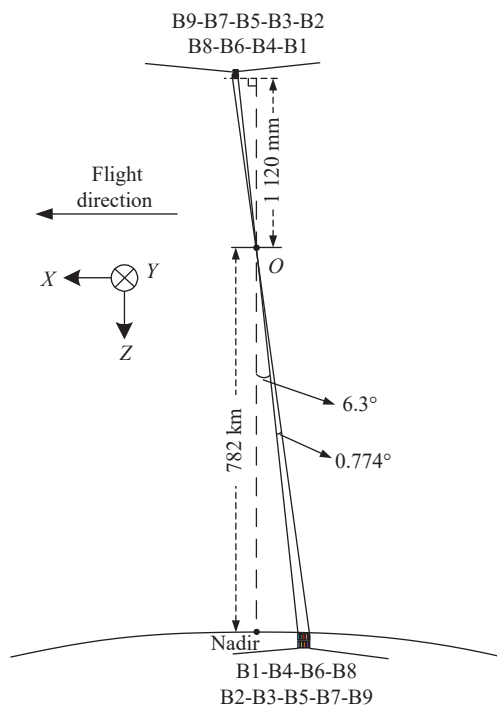


图 2 九谱段成像示意图

Fig.2 Imaging diagram of nine bands

根据 2.1 节的方法,计算各视场点在 TDI 方向和线阵方向的分辨率,由于 TDI 方向的分辨率变化会导致积分时间不同步,引起 MTF 下降,所以这里只给出 TDI 方向的分辨率,如表 3、表 4 所示(表 3、表 4 只给出了最靠近中心视场的 B1 谱段和距离中心视场最远的 P 谱段的分辨率,并且由于正负侧摆呈对称关系,所以只给出了一个方向侧摆的结果)。

表 3 相机 B1 谱段不同视场分辨率

Tab.3 GSD of different fields in B1 spectrum band

Roll angle/(°)	GSD of B1@0 field/m								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	20.83	19.98	19.53	19.45	19.72	20.37	21.45	23.06	25.38
10	21.2	20.33	19.87	19.78	20.06	20.73	21.84	23.49	25.87
20	22.39	21.45	20.96	20.87	21.17	21.88	23.08	24.87	27.46
30	24.69	23.61	23.04	22.94	23.28	24.1	25.49	27.58	30.62
Roll angle/(°)	GSD of B1@+2.24° field/m								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	20.85	20	19.55	19.46	19.73	20.38	21.47	23.09	25.4
10	21.41	20.52	20.05	19.96	20.24	20.92	22.05	23.75	26.19
20	22.84	21.85	21.33	21.23	21.54	22.28	23.54	25.43	28.16
30	25.51	24.33	23.7	23.58	23.94	24.83	26.32	28.59	31.93
Roll angle/(°)	GSD of B1@-2.24° field/m								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	20.85	20	19.55	19.46	19.73	20.38	21.47	23.09	25.4
10	21.03	20.18	19.73	19.65	19.92	20.58	21.67	23.29	25.61
20	22	21.11	20.64	20.55	20.84	21.53	22.68	24.4	26.86
30	23.98	22.99	22.46	22.37	22.69	23.47	24.76	26.69	29.49

表 4 相机 P 谱段不同视场分辨率

Tab.4 GSD of different fields in P spectrum band

Roll angle/(°)	GSD of P@0 field/m								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	5.16	4.97	4.87	4.86	4.94	5.12	5.4	5.83	6.44
10	5.25	5.05	4.95	4.94	5.03	5.21	5.5	5.94	6.56
20	5.55	5.33	5.22	5.21	5.3	5.5	5.82	6.29	6.97
30	6.12	5.87	5.74	5.73	5.83	6.06	6.43	6.98	7.78
Roll angle/(°)	GSD of P@+2.24 field/m								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-20	-5	-20	5	-20	15	-20
0	5.17	4.97	4.87	4.86	4.94	5.12	5.41	5.83	6.44
10	5.31	5.1	5	4.99	5.07	5.25	5.56	6	6.64
20	5.66	5.43	5.31	5.3	5.4	5.6	5.93	6.43	7.15
30	6.32	6.04	5.91	5.89	6	6.24	6.64	7.24	8.12
Roll angle/(°)	GSD of P@-2.24 field/m								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-20	-5	-20	5	-20	15	-20
0	5.17	4.97	4.87	4.86	4.94	5.12	5.41	5.83	6.44
10	5.21	5.02	4.92	4.91	4.99	5.17	5.46	5.88	6.49
20	5.45	5.25	5.14	5.14	5.22	5.41	5.71	6.17	6.81
30	5.94	5.71	5.6	5.59	5.69	5.9	6.24	6.75	7.48

从表 3 和表 4 可以看出: 机动成像后, 边缘视场与中心视场分辨率发生了变化, 导致整个视场范围内

的理想积分时间不同。在轨一般以全色 P 谱段中心视场积分时间为基准, 这种情况下会引起其他谱段积

分时间的不同步,且距离 P 谱段越远,不同步率越高。下面给出距离 P 谱段最远的 B1 谱段在不同 TDI 级数下,各视场由于积分时间不同步影响的 MTF。从表 5 和表 6 可以看出,如果以 P 谱段为积分时

表 5 相机 B1 谱段不同视场 MTF

Tab.5 MTF of different fields in B1 spectrum band

Roll angle/(°)	MTF of 0° field(TDI stage=60)								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	0.894	0.950	0.985	1.000	0.994	0.968	0.918	0.841	0.730
10	0.893	0.950	0.985	1.000	0.994	0.967	0.916	0.838	0.725
20	0.889	0.949	0.985	1.000	0.993	0.965	0.912	0.829	0.710
30	0.881	0.945	0.984	1.000	0.992	0.961	0.902	0.809	0.674
Roll angle/(°)	MTF of +2.24° field(TDI stage=60)								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	0.869	0.934	0.976	0.997	0.998	0.978	0.936	0.867	0.766
10	0.556	0.692	0.799	0.878	0.935	0.972	0.993	1.000	0.993
20	0.141	0.314	0.466	0.589	0.685	0.754	0.803	0.835	0.851
30	0	0	0.041	0.161	0.255	0.314	0.333	0.310	0.238
Roll angle/(°)	MTF of -2.24° field(TDI stage=60)								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
0	0.869	0.934	0.976	0.997	0.998	0.978	0.936	0.867	0.766
10	0.999	0.997	0.980	0.944	0.886	0.802	0.685	0.532	0.340
20	0.892	0.853	0.797	0.718	0.611	0.473	0.303	0.109	0
30	0.510	0.484	0.424	0.332	0.208	0.060	0	0	0

表 6 相机 P 谱段不同视场 MTF

Tab.6 MTF of different fields in P spectrum band

Roll angle/(°)	MTF of 0° field(TDI stage=60)								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-20	-5	-20	5	-20	15	-20
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Roll angle/(°)	MTF of +2.24° field(TDI stage=60)								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-20	-5	-20	5	-20	15	-20
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.977	0.980	0.982	0.983	0.982	0.980	0.977	0.972	0.964
20	0.909	0.922	0.929	0.931	0.929	0.921	0.908	0.885	0.850
30	0.766	0.800	0.819	0.825	0.818	0.798	0.761	0.700	0.606
Roll angle/(°)	MTF of -2.24° field(TDI stage=60)								
	Pitch angle/(°)								
	-20	-15	-20	-5	-20	5	-20	15	-20
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.986	0.988	0.989	0.989	0.989	0.988	0.985	0.982	0.976
20	0.932	0.941	0.946	0.948	0.946	0.940	0.930	0.913	0.887
30	0.820	0.844	0.858	0.862	0.857	0.841	0.813	0.768	0.699



间计算基准, B1 谱段在选择 TDI 级数为 60 级时, 边缘视场的奈频处 MTF 在大俯仰角度下奈频处 MTF 已退化到 0, 因此在选择侧摆成像时需要降低 TDI 级数使用。

### 3.2 大气对比度理论分析结果

以目标反射率为 0.1, 背景反射率为 0.2 为例(亮背景下的暗目标), 计算侧摆对图像背景调制度的影

响, 如表 7 所示。

从表 7 可以看出: 在卫星侧摆成像时, 其大气程辐射增加, 邻近像元辐亮度也增加, 即在侧摆时大气对成像质量的影响程度增加; 从调制度计算结果可以看出, 在侧摆成像时, 目标调制度减小, 即在侧摆时相机获得的原始图像的对比度会下降。

表 7 不同侧摆角下目标与背景辐亮度变化

Tab.7 Radiance variation between target and background with different roll angles

Radiance name		Roll angle=0°	Roll angle=30°
Background	Aero radiance/W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	12.521	19.328
	Adjacent pixel radiance/W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	7.868	8.942
	Total radiance/W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	59.045	64.521
Target	Aero radiance/W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	12.521	19.328
	Adjacent pixel radiance/W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	7.856	8.932
	Total radiance/W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	39.704	46.385
Modulation		0.196	0.164

注: 表中, 图像背景调制度=(目标总辐亮度-目标大气程辐亮度-目标邻近像元辐亮度)/(背景总辐亮度+目标总辐亮度)

### 3.3 某卫星在轨不同机动角度成像的图像背景差异

某型号对水面成像时, 同一区域输出 DN 值差异

较大, 正向俯仰输出 DN 达到 400 多 (10 bit 量化), 而无俯仰和反向俯仰小于 100 DN。成像条件如表 8 所示。

表 8 相机不同成像模式的观测角度 (单位: (°))

Tab.8 Pitch and side angles with different imaging modes(Unit: (°))

View mode	Side angle	Pitch angle	Sun elevation	Sun azimuth	Satellite zenith	Satellite azimuth
Forward pitch	13.39	30.39	62.75	162	32.95	-13.52
No pitch	13.16	0.27	62.8	162.85	13.16	98.00
Backwark pitch	13.40	-30.01	62.9	163.3	32.61	29.83

注: 正向俯仰指相机视轴在 XOZ 平面投影在第一象限, 即卫星降交点成像时向南俯仰; 反向俯仰指相机视轴在 XOZ 平面投影在第二象限, 即卫星降交点成像时向北俯仰; 无俯仰指俯仰角度小于 1°

上表中的侧摆角、俯仰角、太阳高度角和太阳方位角是从卫星下传辅助数据中得到的, 卫星天顶角和方位角是根据侧摆和俯仰角度计算的。从表格中的数据可以看出: 正向俯仰时, 卫星在目标的西北边, 而太阳恰好在目标的东南边, 卫星的天顶角和太阳天顶角接近, 方位角近似在一条直线上, 且水面又属于镜面目标, 以上条件导致成像接近镜面反射时, 此时水面目标的反射能量大于漫反射成像时的能量, 因此输出 DN 值偏高。而反向俯仰和无俯仰不满足镜面反射的条件, 水面按照漫反射目标成像。

## 4 结 论

文中主要从分辨率和辐亮度两个方面对侧摆成像模式下的成像质量进行了分析, 分析结果表明: 侧摆模式会导致不同试场的分辨率不一致, 侧摆角度越大, 不一致性越明显, 进而导致不同试场的理想积分时间不一致, 如果统一采用中心试场积分时间, 会影响边缘的不一致性。文中以某九谱段相机载荷为例分析了不同谱段在不同侧摆角度下由于积分时间误差导致的边缘试场 MTF 下降情况, 为在轨参数调整提供了理论依据。

同时,文中还对不同侧摆条件下的图像对比度以及多角度成像时图像亮度进行了分析,为后期的图像校正和成像质量分析提供了理论参考。

#### 参考文献:

- [1] Holst G C. CCD Arrays, Cameras, and Displays[M]. 2<sup>nd</sup> ed. USA: JCD Publishing, 1998.
- [2] Wang D J, Zhang T, Kuang P. Clocking smear analysis and reduction for multi phase TDI CCD in remote sensing system [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4868-4880.
- [3] Ma Tianbo, Guo Yongfei, Li Yunfei. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [4] Liu Liangyun, Zhang Boxi, Li Yingcai. Analysis of the MTF and image quality of TDI-CCD camera [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(6): 481-483. (in Chinese)
- [5] Wang Dejiang, Dong Bin, Li Wenming, et al. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2500-2505. (in Chinese)
- [6] Li Weixiong, Yan Dejie, Wang Dong. Image motion compensation method of high resolution space camera's imaging with pitch angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2442-2448. (in Chinese)
- [7] Qu Hongfeng, Wang Xiaodong, Xu Shuyan, et al. Antijamming design for multi-velocity imaging mode of multiple TDI CCDs mosaic remote camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1026-1032. (in Chinese)
- [8] Gong Dapeng, Guo Jiang, Liu Jinguo, et al. Outdoor stereoscopic imaging of mapping camera with long focus off-axis three-mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 137-143. (in Chinese)
- [9] Xu Yongsheng. Analysis of image motion compensation accuracy for aerial push-broom sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 453-459. (in Chinese)
- [10] Yan Dejie. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(9): 2224-2229. (in Chinese)
- [11] Yan Dejie, Xu Shuyan, Han Chengshan. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [12] Zhao Guijun, Chen Changzheng, Wan Zhi, et al. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)
- [13] Wang Yu, Wang Xiaoyong, Gao Yuting. Radiation scattering effects in the processing of optical quantitative remote sensing data [J]. *Remote Sensing Letters*, 2021, 12(9): 921-931.
- [14] Miller B M, Rubinovich E Y. Image motion compensation at charge-coupled device photographing in delay-integration mode [J]. *Automation and Remote Control*, 2007, 68(3): 564-571.
- [15] Curtis H D. Orbital Mechanics For Engineering Students[M]. Zhou Jianhua, Xu Bo, Feng Quansheng, Translated. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [16] 何红艳. 一种应用于立体测绘相机的参数设置和调整方法: 中国, 92214985.2[P]. 2015-11-04.