

激光与光电子学进展

用于太阳矢量确定的太阳能电池片在轨性能分析

夏喜旺^{1,2*}, 杜涵^{3**}, 张科科^{1,2}¹中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;²中国科学院大学, 北京 100049;³上海宇航系统工程研究所, 上海 210019

摘要 太阳能电池片可用作粗太阳敏感器(粗太敏),多个等规格粗太敏相互配合可实现太阳矢量的全天域获取;粗太敏的在轨性能决定了其获得太阳矢量的精度。本文基于TZ-1(天智一号)卫星长时间跨度的大量在轨数据,以差分式太阳敏感器确定的太阳矢量为基准,分析粗太敏所确定太阳矢量的角度偏差;对粗太敏输出进行反演,分析其安装偏差及性能衰减情况;并综合多片粗太敏输出,对三结砷化镓太阳能电池片对应的凯利余弦曲线进行拟合。分析结果表明,粗太敏安装偏差较小,其所确定的太阳矢量偏差小于 5° ,性能衰减速率约为 0.0621 V/a ,可实现一定精度范围内太阳矢量的全天域获取。

关键词 光电子学;粗太阳敏感器;太阳能电池片;凯利余弦曲线;最小二乘法数据拟合

中图分类号 O432.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230516

Analysis of On-Orbit Performance of Solar Cells for Sun Vector Determination

Xia Xiwang^{1,2*}, Du Han^{3**}, Zhang Keke^{1,2}¹Innovation Academy of Microsatellites, Chinese Academy of Science, Shanghai 201203, China;²University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;³Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 210019, China

Abstract Solar cells can be used as coarse sun sensors, and sun vectors can be determined for the entire sky by combining several coarse sun sensors of the same specification. The accuracy of the sun vector is determined based on the on-orbit performance of the coarse sun sensors. On the basis of a large amount of on-orbit data of TZ-1 (TianZhi-1) satellite over an extended period, this study analyzed the angle error between sun vectors determined using coarse sun sensors and differential sun sensor. The output of the coarse sensors was inverted, and the installation angle error and performance attenuation of the coarse sensors were analyzed. The Kelly cosine curve corresponding to the triple junction GaAs solar cell was fitted by combining the output of the multiple coarse sensors. The analysis results show that the installation error of the coarse sensor is slight, the obtained sun vector error is smaller than 5° , and the performance attenuation rate is approximately 0.0621 V/a . The proposed sensor can achieve the all-sky acquisition of the sun vector within a specific accuracy range.

Key words optoelectronics; coarse sun sensor; solar cell; Kelly cosine curve; least-square-based data fitting

1 引言

太阳敏感器(太敏)是航天器中应用广泛的定姿单机^[1],主要用于测量太阳矢量相对于星体的空间方位。差分式太敏的测量是通过将4片太阳片输出的电流进行处理^[2-5],确定出太阳矢量;粗太阳敏感器即

粗太敏(电池片^[6]或光电二极管^[7])对三个相互垂直布局的等规格电池片的电流输出进行测量,进而根据矢量与平面的三角几何关系来实现太阳矢量的确定。

天智一号(TZ-1)卫星于2018年11月20日成功进入降交点地方时为6:00 AM的500 km太阳同步轨道。

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-02-16; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 上海自然科学基金(19ZR1453200)

通信作者: *x_xiawang@163.com; **hedydu@163.com

卫星在轨安全运行三年半,姿控系统工作状态始终良好。在太阳矢量获取方面,根据 TZ-1 卫星的轨道特征,遵循全天域覆盖、宽视场详查的设计原则,在星体-Y 侧安装了两台差分太敏,另外在星体各体面安装等规格的太阳电池片若干。其采用的差分太敏可保证 1° 的太阳矢量确定精度,而采用若干等规格太阳电池片所确定的太阳矢量的精度约为 2°~4°。

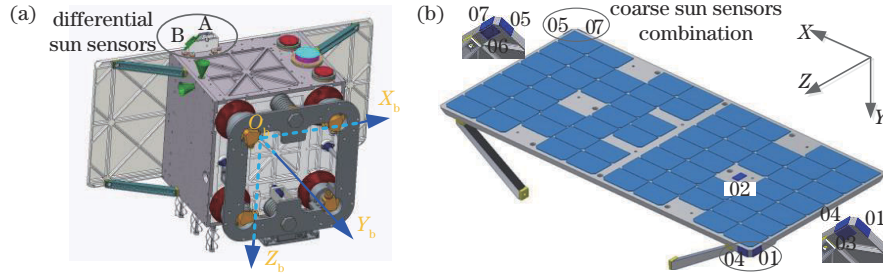


图 1 (a)差分太敏及(b)粗太敏布局示意图

Fig. 1 Layout diagram of (a) differential sun sensors and (b) coarse sun sensors

2.2 粗太敏定姿机理

卫星太阳帆板边缘共安装 7 个等规格太阳电池片(粗太敏),以保证星体各面均可敏感太阳光,其中第 3 和第 6 个粗太敏部署在太阳帆板背面两对角处,保证 +Y 面受晒时粗太敏恒有输出。各粗太敏通过组合的方式可实现太阳矢量的全天域测量。粗太敏安装向量分别为

$$C_{+X} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_{+Y1} = C_{+Y2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C_{+Z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_{-X} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_{-Y} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, C_{-Z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

粗太敏的输出电压以 I 表示,取值范围为 $[0, +5]$ V。星体各体面粗太敏的输出分别记作 $I_{-X}, I_{-Y}, I_{+Y}, I_{+Z}, I_{+X}, I_{+Y}, I_{-Z}$,若星体三轴向输出之和 I_{sum} 大于设定的门限 I_{es_min} ,则粗太敏输出有效。粗太敏输出约正比于太阳入射角余弦值,根据其输出可确定太阳矢量为

$$\mathbf{S}_{bb} = \{ [1 + \text{sgn}(I_{+X} - I_{-X})] \cdot I_{+X} \cdot C_1 + [1 - \text{sgn}(I_{+X} - I_{-X})] \cdot I_{-X} \cdot C_4 \} / 2 + \{ [1 + \text{sgn}(I_{+Y} - I_{-Y})] \cdot I_{+Y} \cdot C_2 + [1 - \text{sgn}(I_{+Y} - I_{-Y})] \cdot I_{-Y} \cdot C_5 \} / 2 + \{ [1 + \text{sgn}(I_{+Z} - I_{-Z})] \cdot I_{+Z} \cdot C_3 + [1 - \text{sgn}(I_{+Z} - I_{-Z})] \cdot I_{-Z} \cdot C_6 \} / 2, \mathbf{S}_{bc} = \frac{\mathbf{S}_{bb}}{\|\mathbf{S}_{bb}\|}, \quad (2)$$

式中, \mathbf{S}_{bc} 即为粗太敏确定的太阳矢量。若 $\|\mathbf{S}_{bb}\| < 0.1$,则设置 $\mathbf{S}_{bc} = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。

2.3 粗太敏安装精度评估

各粗太敏在太阳直射时的电流输出偏差不超过 1%,各自的安装偏差一般小于 1°,须结合粗太敏与差

2 太敏布局及粗太敏定姿机理

2.1 差分太敏布局

两台差分太敏均部署在星体-Z 面上,太敏 A 的视场轴沿星体-Y 轴向星体-Z 轴偏转 30°,太敏 B 的视场轴先沿星体-Y 轴向星体-X 轴偏 40°,再向-Z 轴偏转 30°,如图 1 所示。

分太敏的输出进行评估。以粗太敏 2(在星体-Y 面)为例,其法向轴 \mathbf{n}_{CS2} 与其在水平面内投影的夹角及投影与星体-Y 轴的夹角分别记作 ϵ 和 δ (均为小量),如图 2 所示。粗太敏法向轴可描述为

$$\mathbf{n}_{CS2} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon \cdot \sin \delta \\ -\cos \epsilon \cdot \cos \delta \\ -\sin \epsilon \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \delta \\ -1 \\ -\epsilon \end{bmatrix}. \quad (3)$$

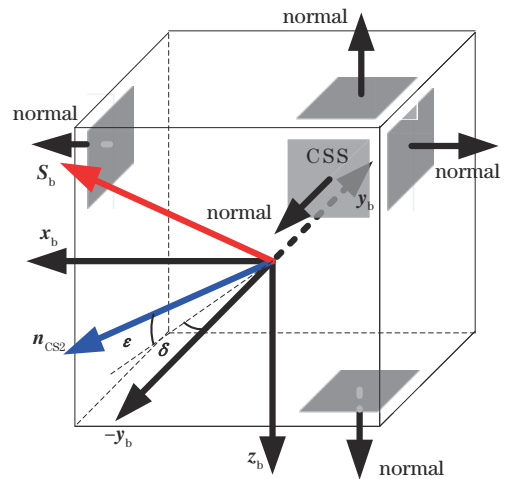


图 2 粗太敏法向轴方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of normal direction corresponding to coarse sun sensor (CSS)

以差分太敏输出作为评判基准。差分太敏的测量精度约为 1°,但其短期内的测量结果具有重复性,角度 δ 和 ϵ 包含了粗太敏的安装偏差和其测量误差。

矢量 \mathbf{S}_{bp} 在 X 向和 Z 向上的分量分别为 S_{bpx} 和 S_{bpz} 。粗太敏法向轴与太阳矢量交角余弦为

$$\cos \theta = \mathbf{n}_{CS2} \cdot \mathbf{S}_{bp} = S_{bpx} \delta - S_{bpz} \epsilon - S_{bpy} \epsilon. \quad (4)$$

根据多组测量数据对式(4)进行扩充,则有:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} S_{bpx}(1) & -S_{bpx}(1) \\ \vdots & \vdots \\ S_{bpx}(n) & -S_{bpx}(n) \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \delta \\ \epsilon \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \theta_1 + S_{bpy}(1) \\ \vdots \\ \cos \theta_n + S_{bpy}(n) \end{bmatrix}}_B, \quad (5)$$

求解式(5)可得:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B. \quad (6)$$

在分析其他粗太敏的安装时,可将式(4)中的 n_{CS2} 换成指定粗太敏的法矢量,并对式(5)中 A 和 B 矩阵的参数进行

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{bp} = \frac{\mathbf{z}_b \times \mathbf{S}_{bp}}{\|\mathbf{z}_b \times \mathbf{S}_{bp}\|}, & \mathbf{x}_{bc} = \frac{\mathbf{z}_b \times \mathbf{S}_{bc}}{\|\mathbf{z}_b \times \mathbf{S}_{bc}\|}, & \alpha = \cos^{-1}(\mathbf{x}_{bp} \cdot \mathbf{x}_{bc}) \\ \beta_p = \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{x}_{bp} \times \mathbf{z}_b}{\|\mathbf{x}_{bp} \times \mathbf{z}_b\|} \cdot \mathbf{S}_{bp}\right), & \beta_c = \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{x}_{bc} \times \mathbf{z}_b}{\|\mathbf{x}_{bc} \times \mathbf{z}_b\|} \cdot \mathbf{S}_{bc}\right) & \beta = \beta_p - \beta_c \end{cases}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{x}_{bp} 和 \mathbf{x}_{bc} 分别为 \mathbf{S}_{bp} 和 \mathbf{S}_{bc} 与 \mathbf{z}_b 轴所构成平面的单位法矢量; α 为 \mathbf{x}_{bp} 和 \mathbf{x}_{bc} 的夹角; β 则为 \mathbf{S}_{bp} 和 \mathbf{S}_{bc} 与各自在水平面上投影的夹角之差。

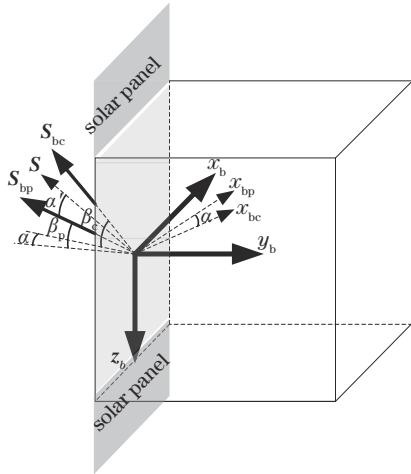


图3 不同太敏所确定太阳矢量偏差的角度表征示意图
Fig. 3 Schematic diagram of angle error between sun vector determined by different sun sensors

2.5 凯利余弦曲线补偿

式(2)默认电池片输出与太阳入射角余弦值成正比。事实上,常规太阳能电池片对应的为凯利余弦曲线^[8],如图4所示。太阳入射角小于50°时,凯利余弦曲线与余弦曲线基本一致,入射角大于50°时,二者偏差将随入射角的增大而变大;入射角达85°时,凯利余弦值降为0,即此时电池片不再有有效输出。

对凯利余弦曲线进行拟合,可得凯利余弦值 $k \cos \theta$ 与太阳光入射角 θ 的关系式为

$$k \cos \theta = 0.9964 \cdot \sin(1.084 \cdot \theta + 1.526), \quad (8)$$

通常有 $\theta > 0.0412375$ 。根据凯利余弦值求余弦值的公式应为

$$\cos \theta = \cos \left\{ \frac{1}{1.084} \left[\pi - 1.526 - \sin^{-1} \left(\frac{k \cos \theta}{0.9964} \right) \right] \right\}. \quad (9)$$

调整,仍可采用式(6)求解其对应的安装角度偏差。

2.4 定姿偏差分量分析

以差分太敏确定的太阳矢量 \mathbf{S}_{bp} 为基准,评判粗太敏所确定太阳矢量 \mathbf{S}_{bc} 相对于 \mathbf{S}_{bp} 的偏差。如图3所示,将 \mathbf{S}_{bp} 和 \mathbf{S}_{bc} 向水平面投影,投影间的夹角 α 为二矢量的方位角偏差,二太阳矢量与各自投影间的夹角之差为二者的高低角偏差。角度 α 和 β 用于表征 \mathbf{S}_{bp} 和 \mathbf{S}_{bc} 偏差在水平面内及铅垂方向上的分量,可描述为

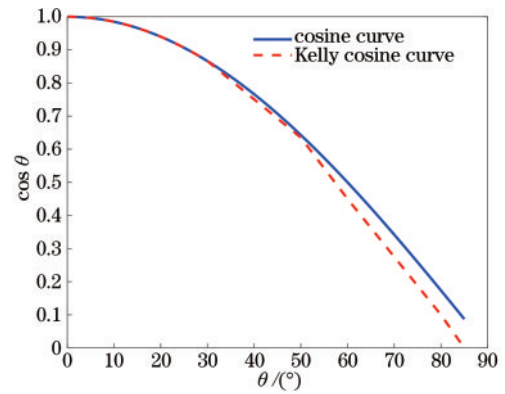


图4 余弦曲线与凯利余弦曲线
Fig. 4 Cosine curve and Kelly cosine curve

设真实的太阳矢量 \mathbf{S}_b 相对于星体 X 、 Y 和 Z 面法向的夹角分别为 α 、 β 和 γ , 并有 $\mathbf{S}_b = [\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma]$ 。根据太阳能电池的凯利余弦曲线特征,角度 α 、 β 和 γ 对应的凯利余弦值 $k \cos \alpha$ 、 $k \cos \beta$ 和 $k \cos \gamma$, 其所构建的矢量 $[k \cos \alpha, k \cos \beta, k \cos \gamma]$ 并非单位矢量,对其归一化则有: $\mathbf{S}_{bc} = [\cos \alpha', \cos \beta', \cos \gamma']$, 其中, α' 、 β' 、 γ' 可称为凯利余弦角。故 \mathbf{S}_{bc} 可写为

$$\mathbf{S}_{bc} = k_1 \begin{bmatrix} I_X \\ I_Y \\ I_Z \end{bmatrix} = k_2 \begin{bmatrix} k \cos \alpha \\ k \cos \beta \\ k \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha' \\ \cos \beta' \\ \cos \gamma' \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{S}_{bc} 为对粗太敏输出实施凯利修正的单位太阳矢量; I_X 、 I_Y 和 I_Z 分别为粗太敏沿星体三体轴的输出; 参数 k_1 和 k_2 为单位矢量对应的系数, 且 k_2 满足:

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{(k \cos \alpha)^2 + (k \cos \beta)^2 + (k \cos \gamma)^2}}. \quad (11)$$

对应于 \mathbf{S}_b 的凯利余弦角和余弦角均满足:

$$\begin{aligned} \cos \alpha^2 + \cos \beta^2 + \cos \gamma^2 &= \\ \cos \alpha'^2 + \cos \beta'^2 + \cos \gamma'^2 &= 1. \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(2)、式(11)和式(12)即可得到参数 k_2 , 进而由

式(10)获得三个凯利余弦值,最后由式(8)得到太阳矢量在星体三体面上的入射角 α 、 β 和 γ 。将该组角度与差分太敏所测得的 S_b 对应的入射角相比较,就可得到粗太敏对应的角度偏差。

3 太阳电池片输出分析

太阳光主要由 TZ-1 卫星轨道面负法向方向射入,在稳态对地指向情况下,星体 -Y 面电池片长期受晒,+Y 面电池片基本不受晒,±X、±Z 面的电池片各自周期性受晒,且 +X 向与 -X 向电池片不会同时受晒。将各电池片输出电流进行放大,即可得到相应的输出电压。

分析 2019 年 1 月 20 日卫星过境时的数据:-Y 向电池片始终有较大输出,+Y 向电池片输出始终在 0.09 V 以下(暗电流);+Z 向有较小电流输出,-Z 向未受晒。卫星降轨时,-X 向电池片受晒,而升轨时,+X 向电池片受晒。各粗太敏输出的变化曲线如图 5 所示。

卫星过境时还下行了粗太敏输出的延时数据,如图 6 所示。由图可知,卫星在轨运行时,±X 和 ±Z 向

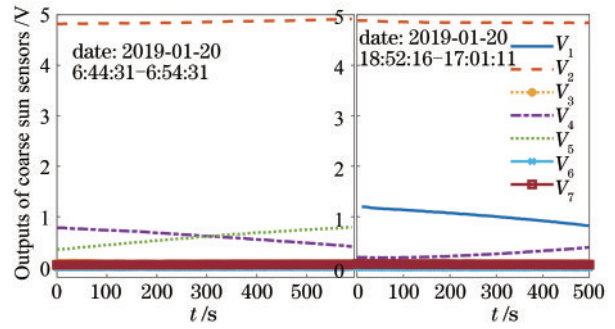


图 5 粗太敏电压输出实时下行数据曲线(2019 年 1 月 20 日)
Fig. 5 Real-time telemetry data corresponding to voltage outputs of coarse sun sensor (2019-01-20)

电池片交替受晒,-Y 向电池片持续受晒而 +Y 向电池片永不受晒。

对于晨昏轨道,太阳矢量与 ±X 和 ±Z 向电池片法向的夹角均较大,电池片输出因遵循凯利余弦曲线而偏小,式(2)所确定的太阳矢量将有较明显的偏差。另外,电池片的安装精度、老化程度都将导致粗太敏所确定的太阳矢量与真实太阳矢量之间存在偏差。

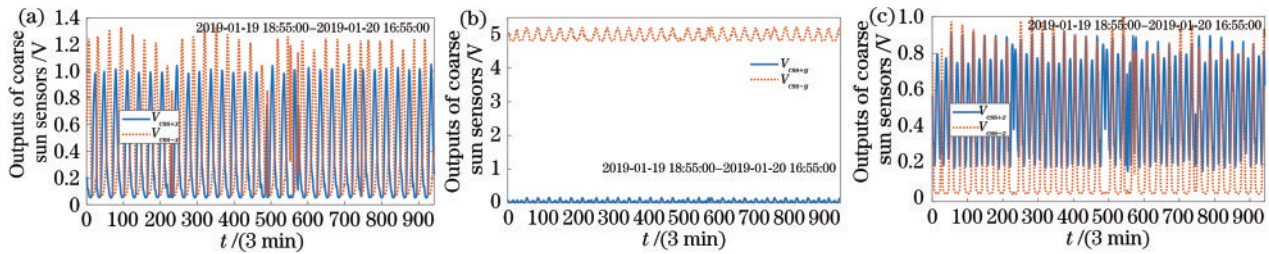


图 6 粗太敏输出延时下行数据曲线(2019 年 1 月 20 日)。(a) X 向粗太敏输出;(b) Y 向粗太敏输出;(c) Z 向粗太敏输出

Fig. 6 Delay telemetry data corresponding to outputs of coarse sun sensor (2019-01-20). (a) Outputs corresponding to +X/-X CSSs; (b) outputs corresponding to +Y/-Y CSSs; (c) outputs corresponding to +Z/-Z CSSs

4 在轨数据分析

下面分别针对卫星在轨的若干场景,以差分太敏为基准,分析粗太敏的在轨性能。

4.1 卫星入轨当日数据分析

入轨后首次遥测数据显示卫星已进入偏置稳定对地状态。星上差分太敏和粗太敏均有输出,处理输出数据

可得各自所确定的太阳矢量和太阳角变化曲线,如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知,卫星处于稳态对地指向时,粗太敏所确定的太阳矢量的 Y 向分量稳定在 -1 附近,其 X 向和 Z 向分量平滑连续;各分量及变化趋势均与差分太敏结果相似,符合实际情况。

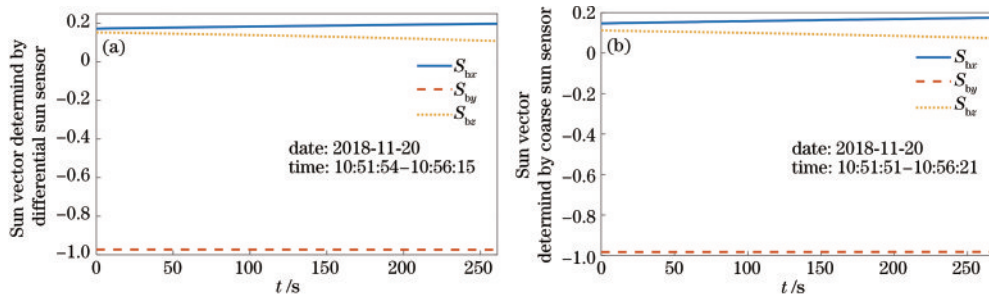


图 7 不同太敏确定的太阳矢量变化曲线(首圈实时遥测数据)。(a) 差分太敏;(b) 粗太敏

Fig. 7 Variation curves of sun vectors determined by different sun sensors (2018-11-20). (a) Differential sun sensor; (b) coarse sun sensor

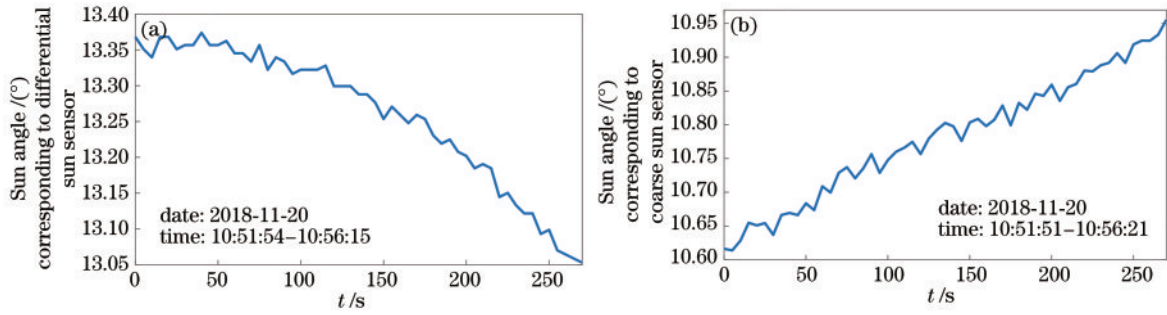


图 8 太阳角变化曲线(首圈实时遥测数据)。(a) 差分太敏;(b) 粗太敏

Fig. 8 Sun angle variation curves (2018-11-20). (a) Differential sun sensor; (b) coarse sun sensor

由图 8 可知,粗太敏确定的太阳矢量所对应的太阳角与对应于差分太敏的太阳角均在缓慢变化,二者变化趋势略有不同;在测控弧段内,二者偏差保持在 3°

范围内且有缩小趋势。粗太敏所确定太阳矢量 S_{bc} 相对于差分太敏所确定的太阳矢量 S_{bp} 的偏差如表 1 所示。

表 1 不同太敏确定的太阳矢量角度偏差(第 2 圈次实时遥测数据)

Table 1 Angle error between sun vectors determined by different sun sensors (2018-11-20)

No.	Time (2018-11-20)	Sun vector (from differential sun sensor)	Sun vector (from coarse sun sensor)	Sun vector (modified)	Error / (°)	α / (°)	β / (°)	Modified error / (°)
1	10:52:21	[0.1761 -0.9729 0.1494]	[0.1498 -0.9828 0.1078]	[0.2151 -0.9604 0.1774]	2.88	1.59	2.42	2.84
2	10:53:06	[0.1808 -0.9729 0.1436]	[0.1553 -0.9825 0.1029]	[0.2200 -0.9600 0.1730]	2.81	1.55	2.39	2.90
3	10:53:51	[0.1850 -0.9731 0.1367]	[0.1602 -0.9824 0.0965]	[0.2243 -0.9601 0.1672]	2.76	1.50	2.38	2.95
4	10:54:36	[0.1892 -0.9733 0.1292]	[0.1643 -0.9823 0.0902]	[0.2280 -0.9602 0.1616]	2.70	1.51	2.31	2.99
5	10:55:21	[0.1936 -0.9736 0.1207]	[0.1687 -0.9821 0.0837]	[0.2320 -0.9602 0.1558]	2.60	1.50	2.14	3.08
6	10:56:06	[0.1973 -0.9740 0.1105]	[0.1736 -0.9819 0.0760]	[0.2364 -0.9602 0.1489]	2.44	1.43	2.05	3.24

由表 1 可知,测控期间 S_{bp} 与 S_{bc} 的夹角约为 2.6°,二者偏差在高低方向和方位方向上的分量分别约为 2.3°和 1.6°,各角均呈渐减趋势。 S_{bc} 相对于 S_{bp} 略偏向朝天及星体 +X 方向。

卫星在稳态对地指向模式下(太阳角约为 13°), ±X 和 ±Z 向电池片对应的太阳入射角较大,可根据式(8)进行凯利余弦修正。由表 1 可知,实施凯利

余弦修正后,对应的太阳矢量偏差更大:Y 分量降低明显,X 向和 Z 向分量有所增大。这是由于凯利余弦模型不够精确所致。

4.2 入轨 3 年后遥测数据分析

卫星入轨 3 年后,轨道面偏转不明显,太阳角约为 15°~17°。 S_{bp} 与 S_{bc} 的变化曲线如图 9 所示。由图可见,二者变化趋势一致且变化量级相近。

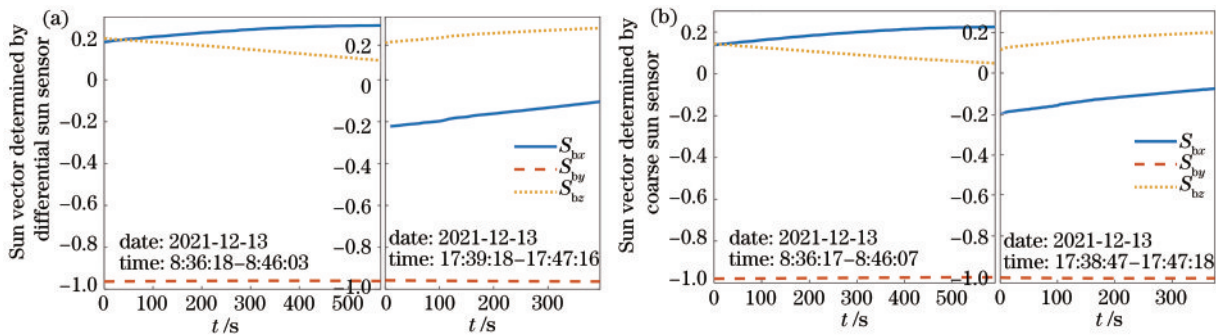


图 9 不同太敏确定的太阳矢量变化曲线(入轨 3 年后实时遥测数据)。(a) 差分太敏;(b) 粗太敏

Fig. 9 Variation curves sun vectors determined by different sun sensors (2021-12-13). (a) Differential sun sensor; (b) coarse sun sensor

S_{bp} 与 S_{bc} 的角度偏差如表 2 所示。由表 2 可知,该卫星降轨过境时,二太阳矢量方位角方向偏差自 -2.56° 逐渐减至 -2.13°,高低角偏差自 3.19° 降至 2.53°,各偏差分量整体呈现降低趋势;在升轨过境时,

方位角偏差由 2.56° 降至 2.13°,高低角偏差由 3° 渐变至 2.84°。对粗太敏输出实施凯利余弦修正后,太阳矢量 S_{bc} 的 Y 分量有所降低,与 S_{bp} 的 Y 分量较接近(此时凯利余弦值与余弦值相当);X 向和 Z 向分量有所增

表 2 不同太敏确定的太阳矢量角度偏差(入轨 3 年后实时遥测数据)

Table 2 Angle error between sun vectors determined by different sun sensors (2021-12-13)

No.	Time (2021-12-13)	Sun vector (from differential sun sensor)	Sun vector (from coarse sun sensor)	Sun vector (modified)	Error / (°)	α / (°)	β / (°)	Modified error / (°)
1	8:36:27	[0.1830 -0.9634 0.1958]	[0.1411 -0.9799 0.1435]	[0.2070 -0.9557 0.2091]	3.95	-2.56	3.19	1.63
2	8:37:12	[0.1937 -0.9626 0.1893]	[0.1519 -0.9794 0.1332]	[0.2167 -0.9555 0.2000]	4.12	-2.56	3.27	1.51
3	8:37:57	[0.2030 -0.9620 0.1820]	[0.1620 -0.9788 0.1250]	[0.2257 -0.9550 0.1926]	4.14	-2.52	3.32	1.49
4	8:38:42	[0.2115 -0.9615 0.1750]	[0.1712 -0.9782 0.1180]	[0.2339 -0.9542 0.1863]	4.11	-2.48	3.36	1.50
5	8:39:27	[0.2202 -0.9609 0.1675]	[0.1806 -0.9774 0.1102]	[0.2423 -0.9535 0.1793]	4.10	-2.44	3.36	1.50
6	8:40:12	[0.2280 -0.9604 0.1594]	[0.1887 -0.9767 0.1027]	[0.2495 -0.9529 0.1726]	4.06	-2.42	3.35	1.51
7	8:40:57	[0.2348 -0.9600 0.1519]	[0.1958 -0.9760 0.0954]	[0.2559 -0.9523 0.1661]	4.04	-2.40	3.30	1.52
8	8:41:42	[0.2409 -0.9598 0.1439]	[0.2034 -0.9751 0.0881]	[0.2627 -0.9516 0.1596]	3.95	-2.31	3.21	1.61
9	8:42:27	[0.2466 -0.9596 0.1348]	[0.2090 -0.9746 0.0803]	[0.2678 -0.9513 0.1526]	3.89	-2.31	3.17	1.65
10	8:43:12	[0.2515 -0.9595 0.1263]	[0.2148 -0.9739 0.0734]	[0.2730 -0.9508 0.1465]	3.78	-2.25	3.09	1.76
11	8:43:57	[0.2549 -0.9598 0.1173]	[0.2187 -0.9735 0.0675]	[0.2764 -0.9506 0.1411]	3.61	-2.21	2.92	1.91
12	8:44:42	[0.2575 -0.9601 0.1083]	[0.2214 -0.9733 0.0608]	[0.2789 -0.9508 0.1351]	3.50	-2.20	2.79	2.04
13	8:45:27	[0.2588 -0.9608 0.0990]	[0.2236 -0.9731 0.0554]	[0.2810 -0.9508 0.1303]	3.29	-2.13	2.53	2.27
14	17:43:57	[-0.1623 -0.9614 0.2220]	[-0.1205 -0.9779 0.1710]	[-0.1885 -0.9539 0.2337]	3.90	2.56	3.00	1.70
15	17:44:42	[-0.1497 -0.9619 0.2286]	[-0.1088 -0.9780 0.1779]	[-0.1781 -0.9543 0.2399]	3.85	2.50	2.97	1.81
16	17:45:27	[-0.1368 -0.9624 0.2345]	[-0.0973 -0.9780 0.1845]	[-0.1679 -0.9546 0.2459]	3.76	2.41	2.94	1.95
17	17:46:12	[-0.1238 -0.9628 0.2399]	[-0.0861 -0.9778 0.1910]	[-0.1578 -0.9548 0.2517]	3.64	2.29	2.88	2.11
18	17:47:07	[-0.1074 -0.9633 0.2458]	[-0.0724 -0.9776 0.1975]	[-0.1456 -0.9552 0.2577]	3.52	2.13	2.84	2.34

大,但与 S_{bp} 各分量接近; S_{bc} 与 S_{bp} 的偏差约为 2° ,明显小于修正前的数据。

4.3 入轨 3.5 年后遥测数据分析

卫星入轨 3.5 年后,太阳角约为 30° ,如图 10 所示。此时 X 向和 Z 向粗太敏的太阳入射角均不至于过大,凯利余弦函数与余弦函数存在偏差但偏差相对较小。由于各面粗太敏所对应的太阳入射角均未过大,凯利余弦特性对粗太敏所确定的太阳矢量精度的影响不会太大。

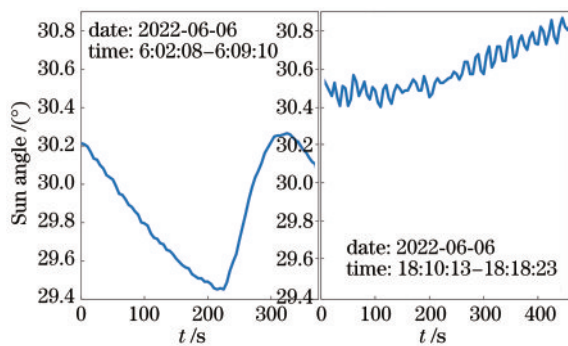


图 10 太阳角变化曲线(入轨 3.5 年后实时遥测数据)

Fig. 10 Sun angle variation curves (2022-06-06)

粗太敏与差分太敏所确定太阳矢量的变化曲线如图 11 所示。二者所确定太阳矢量的角度偏差如表 3 所示。

由表 3 可知,卫星降轨过境时,二太阳矢量方位角偏差自 2.09° 渐变至 0.33° ,高低角偏差自 2.55° 渐变至

2.80° ,两偏差分量总体呈单调变化趋势,但细节仍有波动。另外,对粗太敏输出实施凯利余弦修正后, S_{bp} 与 S_{bc} 的 Y 向分量较为接近,X 向及 Z 向分量也相差不大,二者夹角为 $0.85^\circ \sim 3.01^\circ$,明显小于修正前的数据,即凯利余弦函数修正效果明显。

4.4 粗太敏安装精度分析

下面根据 2019 年 1 月 20 日和 2022 年 6 月 6 日的的数据,分析 -Y 面粗太敏(CSS-2)的安装偏差。太阳光照射到粗太敏时,其固定胶整体受热,热胀冷缩引起的法向轴变化可以忽略。采用粗太敏输出除以太阳入射角余弦值,对其结果求平均即得粗太敏的最大输出,如表 4 所示。

表 4 中包括一组降轨数据和一组升轨数据。仅分析降轨数据,根据式(6)可求得角 δ 和 ϵ 分别为 6.61° 和 5.8° (粗太敏直射输出均值 $D=4.9933$ V);若仅分析升轨数据,则可知两个角度分别为 -2.52° 和 7.4° (对应的 $D=5.0025$ V)。这主要是因为,X 向和 Z 向粗太敏对应的太阳入射角较大,其输出较小,凯利余弦曲线在大太阳入射角情况下的数值偏差将导致所确定的太阳矢量有较明显的偏差。卫星降轨过境和升轨过境时,X 向工作的粗太敏分别为 +X 向和 -X 向粗太敏,其所引入的定姿偏差方向不同。综合分析上述两轨数据,则对应的 δ 和 ϵ 分别为 -0.13° 和 0.43° (对应的 $D=4.9975$ V)。

再以 2022 年 6 月 6 日的遥测数据为例进行分析,如表 5 所示。

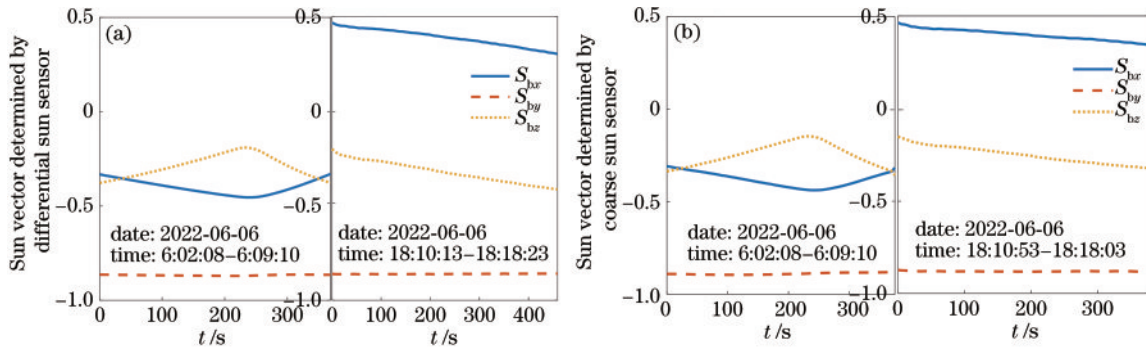


图 11 不同太敏确定的太阳矢量变化曲线(入轨 3.5 年后实时遥测数据)。(a) 差分太敏;(b) 粗太敏
 Fig. 11 Variation curves of sun vectors determined by different sun sensors (2022-06-06). (a) Differential sun sensor;
 (b) coarse sun sensor

表 3 不同太敏确定的太阳矢量角度偏差(入轨 3.5 年后实时遥测数据)
 Table 3 Angle error between sun vectors determined by different sun sensors (2022-06-06)

No.	Time (2022-06-06)	Sun vector (from differential sun sensor)	Sun vector (from coarse sun sensor)	Sun vector (modified)	Error / (°)	α / (°)	β / (°)	Modified Error / (°)
1	6:02:43	[-0.3541 -0.8653 -0.3546]	[-0.3274 -0.8917 -0.3126]	[-0.3677 -0.8596 -0.3548]	3.23	2.09	2.55	0.85
2	6:03:28	[-0.3806 -0.867 -0.3214]	[-0.3509 -0.8943 -0.2777]	[-0.3884 -0.8624 -0.3246]	3.41	2.28	2.63	0.55
3	6:04:13	[-0.4054 -0.8686 -0.2846]	[-0.3773 -0.8948 -0.2387]	[-0.4117 -0.8637 -0.2907]	3.43	2.16	2.73	0.58
4	6:04:58	[-0.4285 -0.8698 -0.2443]	[-0.4047 -0.8932 -0.1974]	[-0.4360 -0.8632 -0.2547]	3.30	1.85	2.76	0.83
5	6:05:43	[-0.4489 -0.8707 0.2005]	[-0.4285 -0.8876 0.1691]	[-0.4572 -0.8591 0.2300]	2.35	1.50	1.83	1.25
6	6:06:28	[-0.4479 -0.8673 -0.2168]	[-0.4337 -0.8849 -0.1700]	[-0.4617 -0.8565 -0.2307]	2.98	1.20	2.73	1.28
7	6:07:13	[-0.4074 -0.8638 -0.2961]	[-0.4000 -0.8827 -0.2468]	[-0.4310 -0.8519 -0.2975]	3.06	0.87	2.94	1.52
8	6:07:58	[-0.3537 -0.8644 -0.3571]	[-0.3549 -0.8816 -0.3111]	[-0.3914 -0.8497 -0.3532]	2.82	0.33	2.80	2.33
9	18:10:13	[0.4675 -0.8608 -0.2006]	[0.4637 -0.8730 -0.1511]	[0.4880 -0.8462 -0.2141]	2.93	-0.53	2.88	2.88
10	18:10:58	[0.4510 -0.8619 -0.2313]	[0.4420 -0.8789 -0.1795]	[0.4686 -0.8505 -0.2390]	3.17	-0.92	3.03	1.28
11	18:11:43	[0.4391 -0.861 -0.2565]	[0.4302 -0.8794 -0.2037]	[0.4579 -0.8501 -0.2600]	3.24	-0.95	3.11	1.26
12	18:12:28	[0.4296 -0.8622 -0.2679]	[0.4216 -0.8810 -0.2146]	[0.4502 -0.8513 -0.2695]	3.27	-0.91	3.15	1.34
13	18:13:13	[0.4172 -0.8618 -0.2882]	[0.4102 -0.8614 -0.2344]	[0.4462 -0.8465 -0.2902]	2.97	-0.37	2.95	1.88
14	18:13:58	[0.4046 -0.8614 -0.3067]	[0.3987 -0.8815 -0.2530]	[0.4298 -0.8506 -0.3029]	3.30	-0.82	3.21	1.59
15	18:14:43	[0.3863 -0.8611 -0.3304]	[0.3839 -0.8810 -0.2767]	[0.4167 -0.8496 -0.3233]	3.28	-0.62	3.23	1.91
16	18:15:28	[0.3732 -0.8602 -0.3474]	[0.3755 -0.8795 -0.2925]	[0.4093 -0.8479 -0.3370]	3.34	-0.33	3.32	2.26
17	18:16:13	[0.3566 -0.8597 -0.3656]	[0.3629 -0.8794 -0.3081]	[0.3982 -0.8477 -0.3506]	3.50	-0.10	3.50	2.63
18	18:16:58	[0.3386 -0.8596 -0.3825]	[0.3443 -0.8820 -0.3217]	[0.3821 -0.8501 -0.3625]	3.73	-0.18	3.72	2.80
19	18:17:43	[0.3174 -0.8591 -0.4014]	[0.3220 -0.8847 -0.3371]	[0.3628 -0.8527 -0.3759]	3.97	-0.28	3.97	3.01

表 5 还包括一组降轨数据和一组升轨数据。仅分析降轨数据,根据式(6)可求得角 δ 和 ϵ 分别为 -0.75° 和 1.23° (粗太敏直射输出均值 $D=5.0196\text{ V}$);若仅分析升轨数据,则可知两个角度分别为 0.09° 和 -0.12° (对应的 $D=4.9968\text{ V}$)。表 5 数据分析结果较表 4 结果略好,这与考查的时间有关。在 6 月份,卫星降轨过境时,其刚从地影区进入阳照区, $-X$ 向粗太敏工作;升轨过境时卫星刚从阳照区进入地影区, $+X$ 向粗太敏工作。由表 5 数据可知,太阳矢量 X 向和 Z 向的分量较大,相应粗太敏对应的太阳入射角约为 $60^\circ\sim 80^\circ$,此时对应的凯利余弦值与余弦值的偏差较小,式(2)所确定的太阳矢量偏差较小。综合分析两轨数据可以部

分抵消太阳光入射光过大引起的太阳矢量确定偏差, δ 和 ϵ 分别为 -0.28° 和 -0.12° (对应的 $D=5.0064\text{ V}$)。

结合表 4 和表 5 数据分析,可知 δ 和 ϵ 分别为 -0.28° 和 0.16° ($D=5.0044\text{ V}$),该角度显然小于差分太敏的定姿偏差,即在使用粗太敏数据时,可以忽略粗太敏的角度安装偏差。采用类似方法分析其他几个粗太敏的安装角度偏差,可以得到类似的结论。

4.5 电池片性能变化分析

随着太阳光长时间照射及照射的周期性变化,粗太敏的性能也逐渐发生变化。下面针对部署在星体 $-Y$ 面的粗太敏 2(CSS-2)和 $+X$ 面的粗太敏 5(CSS-5),

表 4 粗太敏输出数据分析(2019年1月20日)

Table 4 Data analysis of outputs of coarse sun sensors (2019-01-20)

No.	Time (2019-01-20)	Sun vector (from differential sun sensor)	Outputs of 7 coarse sun sensors (CSSs) /V	Maximum output of CSS-2 /V
1	6:44:56	[0.1041 -0.9732 0.2046]	[0.0862 4.8229 0.0813 0.7710 0.3639 -0.0066 0.0487]	4.9557
2	6:45:41	[0.1129 -0.9731 0.2003]	[0.0838 4.8272 0.0755 0.0752 0.4076 -0.0093 0.0511]	4.9606
3	6:46:26	[0.1224 -0.9729 0.1957]	[0.0813 4.8299 0.0630 0.7280 0.4497 -0.0081 0.0508]	4.9644
4	6:47:11	[0.1309 -0.9729 0.1903]	[0.0822 4.8348 0.0581 0.7109 0.4887 -0.0084 0.0465]	4.9695
5	6:47:56	[0.1397 -0.9727 0.1850]	[0.0813 4.8372 0.0533 0.6783 0.5272 -0.0093 0.0484]	4.9730
6	6:48:41	[0.1470 -0.9727 0.1791]	[0.0786 4.8437 0.0526 0.6517 0.5675 -0.0102 0.0505]	4.9796
7	6:49:26	[0.1541 -0.9728 0.1729]	[0.0783 4.8571 0.0505 0.6203 0.6056 -0.0090 0.0499]	4.9929
8	6:50:11	[0.1606 -0.9727 0.1669]	[0.0783 4.8653 0.0462 0.5931 0.6401 -0.0099 0.0517]	5.0019
9	6:50:56	[0.1658 -0.9727 0.1608]	[0.0771 4.8736 0.0362 0.5641 0.6673 -0.0072 0.0548]	5.0104
10	6:51:41	[0.1712 -0.9731 0.1536]	[0.0777 4.8802 0.0285 0.5336 0.6935 -0.0035 0.0514]	5.0151
11	6:52:26	[0.1762 -0.9734 0.1461]	[0.0819 4.8840 0.0249 0.5013 0.7259 -0.0084 0.0526]	5.0175
12	6:53:11	[0.1808 -0.9736 0.1386]	[0.0792 4.8968 0.0203 0.4720 0.7500 -0.0121 0.0523]	5.0296
13	6:53:56	[0.1845 -0.9741 0.1302]	[0.0822 4.9123 0.0175 0.4396 0.7710 -0.0102 0.0526]	5.0429
14	18:52:26	[-0.2537 -0.9667 0.0333]	[1.1876 4.8840 0.0157 0.1930 0.0663 -0.0087 0.0627]	5.0522
15	18:53:56	[-0.2487 -0.9673 0.0479]	[1.1519 4.8666 0.0124 0.1912 0.0627 -0.0130 0.0618]	5.0311
16	18:54:41	[-0.2447 -0.9680 0.0552]	[1.1269 4.8559 0.0175 0.1936 0.0627 -0.0151 0.0560]	5.0164
17	18:55:26	[-0.2413 -0.9683 0.0629]	[1.1015 4.8495 0.0139 0.2055 0.0594 -0.0124 0.0563]	5.0083
18	18:56:11	[-0.2365 -0.9690 0.0701]	[1.0707 4.8458 0.01389 0.2202 0.0624 -0.009 0.0587]	5.0008
19	18:56:56	[-0.2311 -0.9697 0.0782]	[1.0390 4.8449 0.0136 0.2391 0.0597 -0.0145 0.0548]	4.9963
20	18:57:41	[-0.2253 -0.9704 0.0858]	[1.0069 4.8452 0.0175 0.2617 0.0563 -0.0136 0.0514]	4.9930
21	18:58:26	[-0.2192 -0.9711 0.0939]	[0.9682 4.8461 0.0203 0.2858 0.0587 -0.0124 0.0529]	4.9903
22	18:59:11	[-0.2127 -0.9717 0.1023]	[0.9325 4.8412 0.0179 0.3130 0.0542 -0.0096 0.0490]	4.9822
23	18:59:56	[-0.2053 -0.9724 0.1102]	[0.8922 4.8428 0.0169 0.3429 0.0590 -0.0096 0.0536]	4.9803
24	19:00:41	[-0.1978 -0.9730 0.1185]	[0.8543 4.8418 0.0145 0.3691 0.0584 -0.0160 0.0487]	4.9762

表 5 粗太敏输出数据分析(2022年6月6日)

Table 5 Data analysis of outputs of coarse sun sensors (2022-06-06)

No.	Time (2022-06-06)	Sun vector (from differential sun sensor)	Outputs of 7 coarse sun sensors (CSSs) /V	Maximum output of CSS-2 /V
1	6:02:43	[-0.3541 -0.8653 -0.3546]	[1.5679 4.2699 0.1692 0.5684 0.3706 0.0008 1.4968]	4.9346
2	6:03:28	[-0.3806 -0.8670 -0.3214]	[1.6988 4.3294 0.1930 0.7411 0.4259 0.2425 1.3442]	4.9935
3	6:04:13	[-0.4054 -0.8686 -0.2846]	[1.8517 4.3911 0.2016 0.8748 0.4283 0.2367 1.1711]	5.0554
4	6:04:58	[-0.4285 -0.8698 -0.2443]	[1.9990 4.4189 0.1866 0.9084 0.3926 0.2168 0.9767]	5.0804
5	6:05:43	[-0.4489 -0.8707 0.2005]	[2.1242 4.4005 0.1701 0.8385 0.3429 0.1930 0.7695]	5.0540
6	6:06:28	[-0.4479 -0.8673 -0.2168]	[2.1370 4.3600 0.1588 0.7454 0.2773 0.1698 0.8376]	5.0271
7	6:07:13	[-0.4074 -0.8638 -0.2961]	[1.9658 4.3380 0.1509 0.6862 0.2007 0.1369 1.2129]	5.0220
8	6:07:58	[-0.3537 -0.8644 -0.3571]	[1.7363 4.3130 0.1448 0.6191 0.0975 0.1102 1.5218]	4.9896
9	18:10:13	[0.4675 -0.8608 -0.2006]	[0.0868 4.3188 0.0475 0.4332 2.2942 0.060 0.7472]	5.0172
10	18:10:58	[0.4510 -0.8619 -0.2313]	[0.1225 4.338 0.0618 0.4558 2.1816 0.0682 0.8861]	5.0331
11	18:11:43	[0.4391 -0.8610 -0.2565]	[0.1427 4.3206 0.0645 0.4176 2.1138 0.0685 1.0008]	5.0181
12	18:12:28	[0.4296 -0.8622 -0.2679]	[0.1439 4.3084 0.0728 0.4039 2.0616 0.0768 1.0494]	4.9970
13	18:13:13	[0.4172 -0.8618 -0.2882]	[0.1433 4.2977 0.0832 0.4128 2.0000 0.0902 1.1427]	4.9869
14	18:13:58	[0.4046 -0.8614 -0.3067]	[0.1472 4.2757 0.0969 0.4210 1.9338 0.1033 1.2273]	4.9637
15	18:14:43	[0.3863 -0.8611 -0.3304]	[0.1534 4.2559 0.1134 0.4338 1.8547 0.1180 1.3365]	4.9424
16	18:15:28	[0.3732 -0.8602 -0.3474]	[0.1607 4.2504 0.1262 0.4735 1.8148 0.1265 1.4137]	4.9412
17	18:16:13	[0.3566 -0.8597 -0.3656]	[0.1692 4.2708 0.1332 0.5330 1.7623 0.1317 1.4965]	4.9678
18	18:16:58	[0.3386 -0.8596 -0.3825]	[0.1805 4.3185 0.1411 0.612 1.6857 0.13600 1.5752]	5.0238
19	18:17:43	[0.3174 -0.8591 -0.4014]	[0.2055 4.3584 0.1527 0.6694 1.5862 0.1482 1.6606]	5.0732

分析其在轨 3.5 年来几个时间节点的降轨数据,反演其在太阳直射下的输出值。相关数据如表 6 所示。

由表 6 可知,卫星入轨 3.5 年内,太阳角变化较小,对应的余弦值比较稳定,根据粗太敏输出反推其在太

表 6 CSS-2和 CSS-5的最大输出数据
Table 6 Maximum outputs corresponding to CSS-2 and CSS-5

No.	Time	Sun angle / (°) (CSS-2)	Maximum output of CSS-2 / V	Sun angle / (°) (CSS-5)	Maximum output of CSS-5 / V
1	2018-11-20	13-13.5	5.0405	78.5-80	7.0715
2	2019-01-20	13-15	4.9933	79.5-84	8.4682
3	2019-06-04	27-30	4.9946	62.5-64.5	5.8074
4	2020-06-05	27-30.5	4.9573	60.5-64.5	5.5123
5	2020-12-10	13-15	4.8634	75.5-79.5	5.7639
6	2021-06-06	28-30.5	4.8619	60.5-64.5	5.3128
7	2021-12-13	15-17	4.8409	75-79.5	5.6440
8	2022-06-06	29-31	5.0064	62-71.5	5.5937

阳直射时的输出时,余弦值偏差引入计算误差较小。根据太阳同步轨道的特点,在冬至附近,卫星太阳角均较小,而在夏至附近时,其太阳角均较大。

随着粗太敏的逐渐老化,其光电转换效率将会越来越低。表6中,卫星入轨3.5年时计算所得的CSS-2直射输出明显偏大,这主要跟差分太敏的测量精度有关。当差分太敏所确定的太阳矢量有明显偏差、使得太阳入射角余弦值偏小时,余弦值作为除数将会引入较大的计算偏差,使得粗太敏的最大输出结果明显偏大。再分析2022年6月5日和6月9日的数据可知,太阳入射角较稳定,CSS-2最大输出变化不大,但其所对应的最大输出分别为5.0289 V和4.9929 V,这进一步印证了差分太敏定姿偏差加强了粗太敏性能计算结果的偏差。

另外,单从卫星入轨3年的数据可见,粗太敏确实出现了老化现象,电池片性能有所衰减,如图12所示。采用直线拟合方式,粗太敏性能参数衰减速率约为0.005275 V/month,或为0.0621 V/a。

另外,由表6可见,CSS-5对应的太阳入射角均较

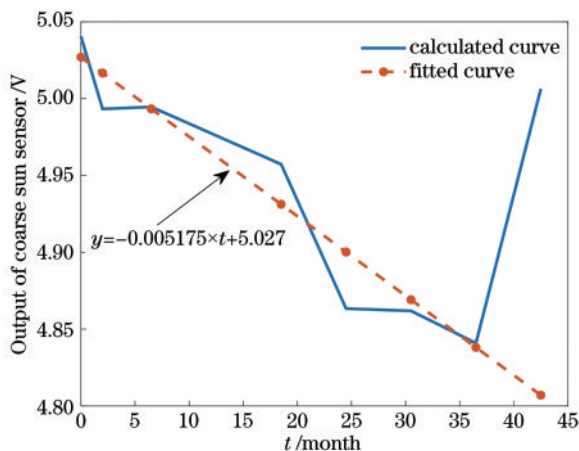


图 12 CSS-2太阳直射最大输出变化曲线(入轨3年)
Fig. 12 Maximum output variation curves corresponding to CSS-2 (2021-12-13)

大,太阳角在夏至附近约为65°,在冬至附近则约为80°;此时根据余弦值采用式(8)确定凯利余弦值时,结果明显偏小,导致所确定的粗太敏5太阳光直射输出偏大。考虑到式(8)由晶硅电池数据拟合而得,故有必要针对三结砷化镓电池片对凯利余弦函数进行拟合修正。

4.6 凯利余弦函数拟合修正

据前分析,以差分太敏输出为基准,在太阳入射角大于82°时,粗太敏所确定的太阳矢量偏差约为2.5°,采用式(9)实施凯利余弦修正后,偏差约为3°;而若太阳入射角小于82°,则对粗太敏输出实施凯利余弦修正后所确定的太阳矢量偏差约为1°。显然,式(9)所示的凯利余弦函数在太阳入射角较大时的拟合值不正确。

各粗太敏性能相同、指标相近,但在轨受晒情况不同,下面将综合多个粗太敏的在轨数据修正凯利余弦函数:小太阳角工况采用-Y向粗太敏数据,大太阳角工况采用±X和±Z向粗太敏的输出。粗太敏的输出除以其峰值输出(太阳直射时的输出),即得凯利余弦值。

基于在轨数据,采用最小二乘法可求得凯利余弦函数y关于余弦值x的幂多项式函数为

$$y = -0.0152 + 0.7791x + 0.4445x^2 + 0.8211x^3 - 2.0464x^4 + 1.0152x^5, \quad (13)$$

将之拟合三角函数,则为

$$y = 0.9923 \cdot \sin(1.064 \cdot \arccos x + 1.511). \quad (14)$$

余弦曲线、式(8)对应的凯利余弦曲线、多项式拟合曲线及根据在轨数据拟合的凯利余弦曲线如图13所示。

由图13可见,在太阳入射角较大时,根据在轨数据拟合的凯利余弦曲线较文献中的凯利余弦曲线略偏高,这与大太阳入射角时式(9)对应的凯利余弦值明显偏低的结论一致,式(14)显然比式(9)更接近真实情况。

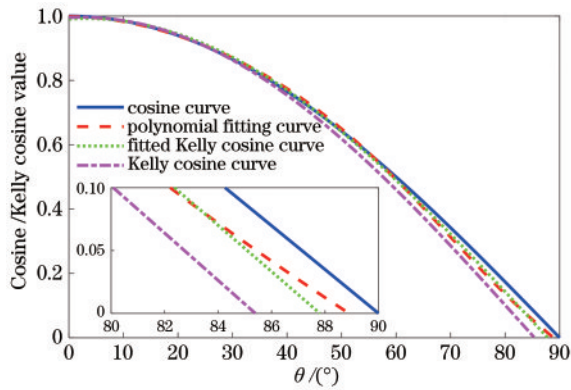


图 13 余弦曲线、凯利余弦曲线、多项式拟合曲线及拟合凯利余弦曲线示意图

Fig. 13 Schematic diagram of cosine curve, Kelly cosine curve, polynomial fitting curve, and fitted Kelly cosine curve

5 结 论

分析 TZ-1 卫星长期在轨数据可知, 设定太阳电池片输出符合余弦定律, 可以组合使用其输出确定太阳矢量, 所确定的太阳矢量偏差约小于 5° , 太阳入射方向对太阳矢量确定偏差有所影响, 夏至附近偏差略大, 冬至附近偏差略小。多轨次数据综合分析可知, 粗太敏安装精度小于 0.5° , 但单独分析升轨或单独分析降轨数据所得的太阳矢量将存在较大的角度偏差。太阳电池片的性能随时间而衰减, 衰减速率约为 0.0621 V/a 。综合分析多个粗太敏的输出数据, 可得到粗太敏的全角度输出, 进而完成对三结砷化镓电池输出进行凯利余弦曲线的拟合, 在大太阳入射角情况下, 该凯利余弦曲线明显高于已报道文献中提到的基于晶硅光伏电池的曲线。相关结论为太阳电池片用于太阳矢量的确定提供了指导。

参 考 文 献

[1] 王峰, 牛诗博, 岳程斐, 等. 阿斯图微卫星姿态控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2192-2202.
Wang F, Niu S B, Yue C F, et al. Design of attitude control system for ASRTU microsatellite[J]. Optics and

Precision Engineering, 2020, 28(10): 2192-2202.

- [2] 常晔, 张建福, 王伟华, 等. 一种用于对日观测载荷的高精度高更新率太阳敏感器[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(6): 53-59.
Chang Y, Zhang J F, Wang W H, et al. A Sun sensor with high accuracy and high update rate for payload of solar observation[J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(6): 53-59.
- [3] 马霁壮, 王睿, 康博南, 等. 立方星用太阳敏感器的设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(2): 173-177.
Ma J Z, Wang R, Kang B N, et al. Design of Sun sensor for CubeSats[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2021, 39(2): 173-177.
- [4] 冯邈, 于晓洲, 白博, 等. 低成本小型无线自动太阳敏感器设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(8): 1852-1857.
Feng M, Yu X Z, Bai B, et al. Design and realization of low-cost micro wireless automatic Sun sensor[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(8): 1852-1857.
- [5] 查杨生, 陆正亮, 张翔, 等. 立方星用微型太阳敏感器设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(11): 1647-1651.
Zha Y S, Lu Z L, Zhang X, et al. Design of miniaturized Sun sensor for CubeSat[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(11): 1647-1651.
- [6] 张银, 韩冬, 胡迪. 基于多重UKF的粗太阳敏感器标定算法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(3): 59-63, 70.
Zhang Y, Han D, Hu D. Research on calibration algorithm of coarse Sun sensor based on multiple UKF [J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(3): 59-63, 70.
- [7] Kataoka J, Sato R, Ikagawa T, et al. An active gain-control system for Avalanche photo-diodes under moderate temperature variations[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 564(1): 300-307.
- [8] 殷桂梁, 杨丽君, 王珺. 分布式发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Yin G L, Yang L J, Wang J. Distributed power generation technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.