

实现弱星提取及质心定位的帧间窗口移位灰度叠加法

高自谦¹,王海涌¹,高洪民²,秦天沐¹,李晶津¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院,北京 100191; 2. 北京理工大学 信息与电子学院,北京 100081)

摘要:星敏感器在动态跟踪模式下,移位星像的信噪比衰减,弱星难以提取,当探测星数降为 2 颗时,定姿误差加大。鉴于对齐灰度叠加不能显著提高动态星像的信噪比,故提出一种帧间窗口移位灰度叠加法。通过对备选弱星窗口灰度数据进行流水缓存并移位叠加,增强弱星灰度及信噪比,使其满足探测阈值条件,确保星敏感器视场中始终保持不少于 3 颗星。仿真结果表明:4 帧灰度叠加后弱星信噪比较单帧星图提高了 1 倍多,增加一颗观测星后定姿精度更高。

关键词:图像处理; 信噪比; 质心定位; 姿态确定; 帧间移位叠加

中图分类号: V448.22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0226001

Inter-frame shifted window gray superposition method of dim star image extraction and centroiding

Gao Ziqian¹, Wang Haiyong¹, Gao Hongmin², Qin Tianmu¹, Li Jingjin¹

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In the dynamic tracking mode of a star sensor, the signal noise ratio (SNR) of the shifted star image attenuates resulting in difficulty of dim star extraction. When the number of extracted stars drops to 2, attitude error increases. Obviously for the dynamic star image the aligned pixel gray superposition method was incapable of increasing its SNR remarkably, so a novel inter-frame shifted window gray superposition method was proposed instead. This novel method raised the gray level and the SNR of a dim star by means of superposing pixel gray of inter-frame window area, in a shifted style rather than an aligned one, during which the gray data of the shifted windows of several successive frames were stored into a cache in a pipeline mode. So the peak gray value of a dim star was enhanced and turned to be over the detecting threshold, and no less than 3 stars in the FOV can be finally guaranteed to be used in attitude calculation. The simulation results manifest that the SNR of the dim star image is increased more than 1 times after applying the new algorithm with 4 frames, thus a higher precision can be achieved by the three-star improved attitude determination due to the added one star.

Key words: image processing; signal noise ratio; centroid location; attitude determination; inter-frame shifted superposition

收稿日期:2016-06-05; 修订日期:2016-07-15

基金项目:航空科学基金(20130151004)

作者简介:高自谦(1989-),男,硕士生,主要从事天文导航及组合导航技术方面的研究。Email:gzq869@sina.com

导师简介:王海涌(1969-),男,讲师,博士,主要从事天体敏感器、天文导航及复合导航技术方面的研究。Email:why@buaa.edu.cn

0 引言

星敏感器的探测能力体现在探测最弱星星像灰度信号的信噪比(SNR)。当光学系统的通光口径、透过率、像素光电灵敏度、光积分时间及通道增益等影响因素确定之后,星像的信噪比可基于背景噪声电平及方差估计值和信号峰值得到^[1]。增强信噪比的技术措施在于抑制噪声水平并提高信号幅值。不过对于定格的单帧星图,提高信噪比的措施则只有有限的几类滤波方法^[2]。

星敏感器观星定姿过程中,需要根据提取星像点位置分布进行星图识别,从而确定对应恒星在春分点赤道惯性系下的方位矢量,对此近年来已有大量文献展开研究^[3-4]。星图识别的星像点数量直接影响星敏感器姿态测量精度,即使最简单的三角形识别算法也至少应包含 3 颗观测星,当小于 3 颗时将无法识别。不过对于跟踪模式,由于可以保留前续几帧的星像及对应恒星的信息并预测下帧星像,不需要匹配识别,因而只有两颗星时通过 TRIAD 算法依然可以实现定姿^[5-6]。虽然 TRIAD 算法在理论上成立,但毕竟只有 2 颗观测星,再加上噪声因素的影响,定姿效果较差。若能在此基础上获得新的观测星将使定姿精度得以改善。

多帧星图叠加技术是提高信号幅度及 SNR 的一种方法,参考文献[7-8]提到采用多帧累加方法增强星像点信噪比,进而提高星像点质心的定位精度,但前提条件是星敏感器与星空相对静止。而在动态角运动条件下,捷联星敏感器对同一颗星的成像位置会产生帧间偏移^[9],此时如果两幅相邻帧星图依然做对齐叠加,将难以实现灰度增强效果。文中提出一种基于帧间窗口移位叠加灰度增强的方法,提高窗口内弱星信噪比,使其成为可提取的观测星,从而间接增强星敏感器的探测能力,提高定姿精度。

1 弱星像点灰度叠加信噪比理论分析

为了简化问题分析,考虑星像点背景灰度噪声为背景电平 b 加一白噪声的情形,白噪声符合正态分布 $N(0, \sigma_n^2)$,采用点目标图像的信噪比定义^[10]:

$$R_{SNR} = \frac{A_{p0} - b}{\sigma_n} \quad (1)$$

式中: A_{p0} 为目标弱星像点的峰值灰度。

n 幅连续静态星像点叠加后的噪声方差为:

$$\sigma_s^2 = \sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + \dots + \sigma_{nm}^2 = n\sigma_n^2$$

均方差为:

$$\sigma_s = \sqrt{n} \sigma_n \quad (2)$$

那么基于公式(1)对信噪比的定义,叠加前后的信噪比增益为:

$$G_{SNR} = \frac{R_{SNR}'}{R_{SNR}} = \frac{\frac{\sqrt{n} \sigma_n}{A_{p0} - b}}{\frac{\sigma_n}{A_{p0} - b}} = \sqrt{n} \quad (3)$$

即由 n 幅连续静态星图叠加后,信噪比可提升为原来的 \sqrt{n} 倍^[11]。

通常为了抑制星敏感器的量测噪声及杂光干扰,需对拍摄星图设置探测灰度阈值 V_{th} ,其大小满足:

$$V_{th} = b + a \times \sigma_n \quad (4)$$

式中:系数 a 的大小一般取为 4~6,文中取 $a=5$ ^[12-13]。

n 帧星图叠加后,伴随像点灰度增强的同时叠加区域背景噪声水平也有所提高,根据星图局部阈值算法原理结合公式(2)可得叠加后探测灰度阈值 V_{th}' 为^[14]:

$$V_{th}' = nb + a \times \sqrt{n} \sigma_n \quad (5)$$

目标弱星为不可探测星,且经多帧叠加变为可探测星时的条件综合如下:

$$\begin{cases} A_{p0} \leq V_{th} \\ nA_{p0} \geq V_{th}' \end{cases} \quad (6)$$

联立上式可得如下信噪比范围:

$$\frac{a}{\sqrt{n}} \leq R_{SNR} < a \quad (7)$$

该范围内原本不可探测的弱星经过文中新算法将变得可以探测。

星像点像元灰度分布近似符合二维高斯分布^[15],覆盖范围从 3 pixel×3 pixel~8 pixel×8 pixel。即使对于同一颗弱星,像点能量不变,在不同帧投影生成的峰值灰度也不尽相同,因此实际叠加后峰值灰度 A_p 与 nA_{p0} 不严格相等,只是接近于理论值。

2 帧间移位叠加的弱星质心定位与姿态估计

持续的跟踪模式下,探测星数下降到 3 颗时的帧序记为第 k 帧,该帧光积分中心时刻记为 t_k 时刻;当探测星数下降到 2 颗时,观测到的星图记为第 m 帧,对应光积分中心时刻记为 t_m 时刻。

在第 k 帧启动本算法, 通过星图匹配获取 3 颗亮星在春分点赤道惯性系 i 系下的坐标, 确定当前时刻的姿态, 并借助导航星库提取视场内无法探测弱星中最亮的一颗星作为备选星。根据此时姿态转移矩阵和光学系统的映射模型, 获得备选星质心映射坐标, 并存储以该坐标为中心的窗口灰度数据。后续帧依此法进行四级流水缓存。

将第 m 帧作为当前帧, 通过比对跟踪模式下的前帧星图获取 2 颗亮星在 i 系下的坐标, 由双星定姿算法粗略估计当前姿态及备选星质心位置, 再利用帧间移位叠加算法将前 3 帧窗口灰度叠加至当前帧, 提高弱星信噪比, 使叠加后弱星灰度高于探测阈值, 并用带阈值的灰度重心法得到叠加后备选星质心坐标^[6]。最后, 利用 2 颗亮星和 1 颗弱星备选星共计 3 颗星, 完成对 t_m 时刻星敏感器精确姿态的估计。算法流程图如图 1 所示。

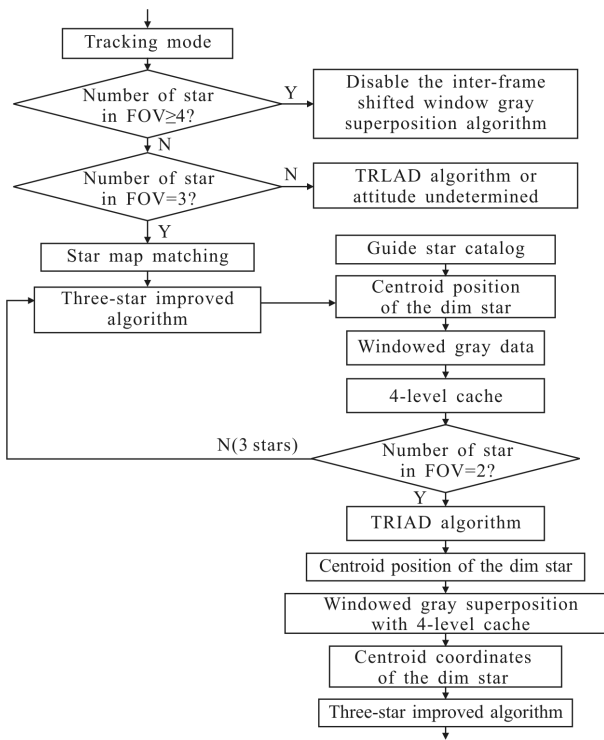


图 1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of algorithm

2.1 三星优化定姿算法

通过星图匹配得到的 3 颗星的星号及赤经赤纬信息, 计算出在 i 系中的单位参考矢量 U_1, U_2, U_3 , 星敏感器坐标系 s 系中所对应的单位观测矢量为 V_1, V_2, V_3 。构造矢量 U_{ij} , 满足:

$$U_{ij} = \frac{U_i \times U_j}{|U_i \times U_j|} \quad (8)$$

式中: U_i, U_j 为观测星中最亮的两颗在 i 系中的参考矢量。对应的

$$V_{ij} = \frac{V_i \times V_j}{|V_i \times V_j|} \quad (9)$$

构造参考矢量矩阵 U 和观测矢量矩阵 V , 满足:

$$U = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_{ij}], V = [V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_{ij}] \quad (10)$$

记矩阵 M 为:

$$M = UV^T(VV^T)^{-1} \quad (11)$$

则优化算法的姿态转移矩阵优化解为^[17]:

$$M_s^* = \frac{1}{2}(3I - M^T M)M^T \quad (12)$$

2.2 帧间窗口移位叠加算法

假定标称姿态下星像点质心参考坐标为 $P_m(x_m, y_m)$ 。根据星像点高斯半径 σ_r 大小选取合适的窗口尺寸, 可减少噪声对质心位置的影响, 便于利用图像处理算法提高质心定位精度^[18]。

采用 4 帧星图进行处理。 t_m 时刻以前, 对第 $m-n$ 帧利用三星优化定姿方法测得姿态并预测出弱星质心坐标, 记为 $P_{en}(x_{en}, y_{en})$; 对第 m 帧则利用双星定姿方法粗略测得姿态, 得到弱星质心坐标记为 $P_{e0}(x_{e0}, y_{e0})$ 。

在像元面阵坐标系下, $P_{en}(x_{en}, y_{en})$ 的行列坐标四舍五入处理取整得到弱星质心所在像元的整型坐标 $P_n(r_n, c_n)$, 以该像元为中心截取灰度窗口 W_{ndn} , 其边长为 $2l+1$ pixel (l 为整数)。在三轴角速率作用下, 弱星星像窗口随映射点在像阵平面上运动而发生偏移, 定义偏移行数和偏移列数为:

$$\begin{cases} N_m = r_n - r_0 \\ N_{cm} = c_n - c_0 \end{cases} \quad (13)$$

图 2 以第 $m-1$ 帧与第 m 帧间的窗口位置偏移为例, 其中 P_{r1}, P_{r0} 为弱星质心的参考位置。

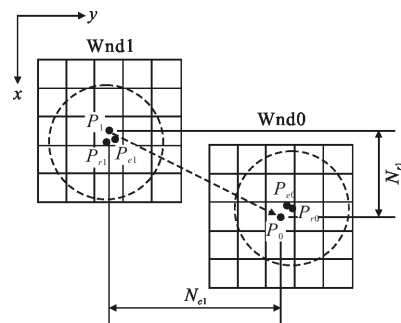


图 2 帧间移位窗口示意图

Fig.2 Schematic of inter-frame shifted window

由于双星定姿误差较大,其对弱星质心定位目的在于获取质心所在像元,便于以此为窗口中心进行叠加。将前 3 帧灰度窗口以整像素距离移位叠加至当前帧窗口位置,叠加前后的星像点质心坐标可用灰度重心法进行估计。以 2 帧叠加为例,叠加后质心行坐标估计为:

$$x_{sp} = \frac{\sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} r(C_0(r)+C_1^s(r))}{\sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} (C_0(r)+C_1^s(r))} \quad (14)$$

式中: $C_0(r)$ 、 $C_1(r)$ 分别表示第 m 帧、第 $m-1$ 帧窗口中第 r 行像元的灰度累加和; $C_1^s(r)$ 表示第 $m-1$ 帧的窗口移位到第 m 帧对应位置后窗口中第 r 行像元的灰度累加和。由公式(13)可得:

$$\sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} rC_1^s(r) = \sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} rC_1(r+N_{r1}) = \sum_{r=r_1-l}^{r_1+l} (r-N_{r1})C_1(r) \quad (15)$$

对于同 1 颗星,曝光时间相同、窗口尺寸大小相等且略大于星像点能量高斯分布范围,在背景噪声与高斯白噪声的共同影响下,可近似认为:

$$M_{st} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha\cos\gamma - \cos\alpha\sin\delta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\delta\sin\gamma & \cos\delta\sin\gamma \\ \sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\sin\delta\cos\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma - \sin\alpha\sin\delta\cos\gamma & \cos\delta\sin\gamma \\ \cos\alpha\sin\delta & \sin\alpha\cos\delta & \sin\delta \end{bmatrix} \quad (19)$$

由公式(19)分别解算当前帧中叠加处理前双星定姿和叠加处理后三星优化定姿求得的姿态转移矩阵,获取相应 α 、 δ 、 γ 的估计值,与参考值比较得到定姿误差。

3 实验仿真

设定系统背景灰度噪声为 $b=100$ 背景电平加上 $N(0, 10^2)$ 的高斯白噪声($\sigma_n=10$),由公式(4)设置 $V_{th}=150$ 。易得四帧星图窗口叠加以后背景噪声满足 $N(400, 202)$ 的正态分布,由公式(5)得到 $V_{th}'=500$ 。由 σ_r 大小确定方形窗口边长为 5 pixel。

表 1 星传感器参数

Tab.1 Parameters of star sensor

Name	Value
Array size/pixel	1 024×1 024
FOV/(°)	20×20
Gaussian radius σ_r /pixel	0.671
Fullscale gray	4 096
Frame period T_f /ms	120

$$\sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} C_1^s(r) = \sum_{r=r_1-l}^{r_1+l} C_1(r) = \sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} C_0(r) \quad (16)$$

于是,公式(14)变为:

$$x_{sp} = \frac{\sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} rC_0(r)}{2 \sum_{r=r_0-l}^{r_0+l} C_0(r)} + \frac{\sum_{r=r_1-l}^{r_1+l} rC_1(r)}{2 \sum_{r=r_1-l}^{r_1+l} C_1(r)} - \frac{N_{r1} \sum_{r=r_1-l}^{r_1+l} C_1(r)}{2 \sum_{r=r_1-l}^{r_1+l} C_1(r)} = \frac{1}{2} (x_{sp0} + x_{sp1} - N_{r1}) \quad (17)$$

式中: x_{sp0} 、 x_{sp1} 分别表示第 m 帧、第 $m-1$ 帧星图窗口中用灰度重心法计算得到的星像点质心行坐标。

采用同样的方法,4 幅帧间目标星像点灰度窗口移位叠加后质心行坐标估计为:

$$x_{sp} = \frac{1}{4} (x_{sp0} + x_{sp1} + x_{sp2} + x_{sp3} - N_{r1} - N_{r2} - N_{r3}) \quad (18)$$

质心列坐标同理可求得,不再赘述。

2.3 姿态转移矩阵的姿态角解算

星传感器光轴在 i 系中指向 (α, δ) ,旋角为 γ 。姿态转移矩阵的欧拉角满足 $\varphi=90^\circ+\alpha, \theta=90^\circ-\delta, \Psi=\gamma$,按照 3-1-3 顺序旋转,则:

(1) 理论仿真测试

仿真中星传感器以三轴角速率 $\omega_{sx}=1$ (°)/s、 $\omega_{sy}=2$ (°)/s、 $\omega_{sz}=10$ (°)/s 旋转;第 $m-3$ 帧光积分中心时刻,光轴在 i 系指向 $(45^\circ, 45^\circ)$ 、旋角 0° ,则由欧拉旋转并结合公式(19)求出后续 3 帧的光轴赤经赤纬及旋角 $(\alpha_r, \delta_r, \gamma_r)$ 的参考值,如表 2 所示。

表 2 星传感器姿态参考值

Tab.2 Reference attitude of star sensor

Frame number	$m-3$	$m-2$	$m-1$	m
α_r	45°	44°3'15"	43°6'28"	42°9'38"
δ_r	45°	45°5'13"	45°10'41"	45°16'24"
γ_r	0°	359°38'27"	359°16'59"	358°55'37"

在 i 系星传感器圆视场范围内,随机设定亮星 A 、 B 、 C 及备选弱星 X 的方位,设亮星峰值灰度大小在[200, 240]区间范围内随机生成、弱星峰值灰度大小在[115, 150]区间范围内随机生成。将 4 颗星在 4 帧星图中的灰度分布值作为一组样本,生成 50 组样本,每组样本独立加入背景灰度噪声并重复测量 32 次,

获得该组样本的定姿精度。当前帧星图弱星峰值灰度 A_{p0} 与窗口叠加后星图弱星峰值灰度 A_p 统计如图 3、图 4 对照显示。

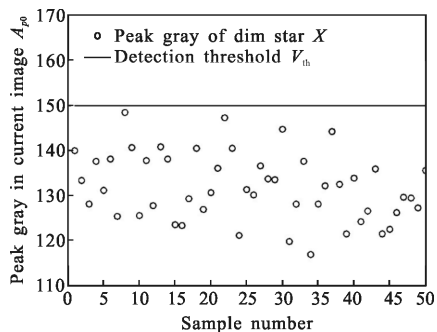


图 3 当前帧弱星 X 峰值灰度统计图
Fig.3 Cartogram of A_{p0} in current image

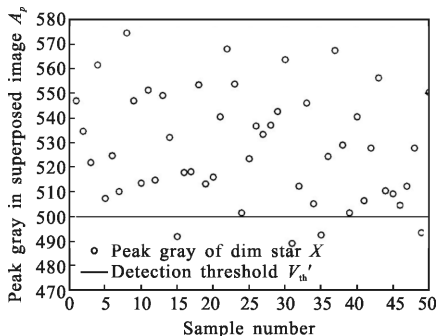


图 4 叠加后弱星 X 峰值灰度统计图
Fig.4 Cartogram of A_p in superposed image

图中可以看出，单帧星图中弱星峰值灰度低于探测灰度阈值，50 组样本弱星探测率为 0；经帧间窗口移位叠加后，弱星可探测率提高到 92%。各组样本平均信噪比增益 $\bar{G}_{SNR} \approx 2.283$ ， $SNR \approx 2.283$ 。

将各组样本中 TRIAD 算法的定姿结果以及三星优化算法的有效定姿结果与参考姿态角进行比较，误差曲线如图 5~7 所示。

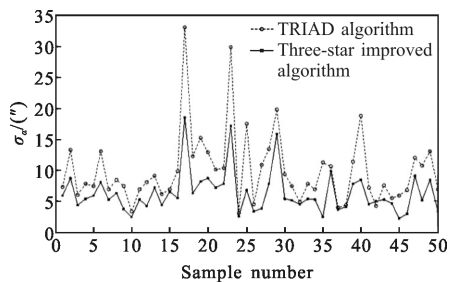


图 5 光轴赤经误差 σ_α 曲线
Fig.5 Right ascension error σ_α of boresight

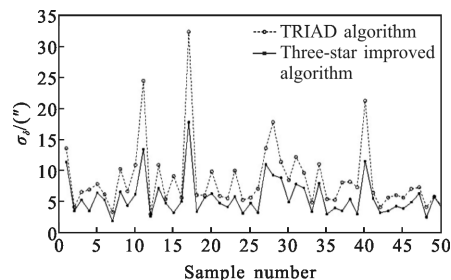


图 6 光轴赤纬误差 σ_δ 曲线
Fig.6 Declination error σ_δ of boresight

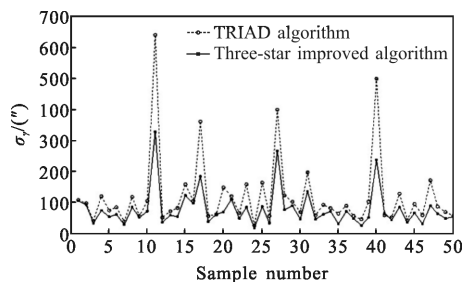


图 7 光轴旋角误差 σ_γ 曲线
Fig.7 Rotation Angle error σ_γ of boresight

对于整个 50 组样本试验，TRIAD 算法得到的试验误差 $(\sigma_{\alpha1}, \sigma_{\delta1}, \sigma_{\gamma1}) = (11.51'', 10.10'', 153.65'')$ ，三星优化算法得到的试验误差 $(\sigma_{\alpha2}, \sigma_{\delta2}, \sigma_{\gamma2}) = (7.16'', 6.23'', 95.84'')$ 。后者定姿精度优于前者，尤其是在两颗亮星星等较大、背景噪声干扰明显，或者因量测星光角距较小所导致测量偏差较大的情况下，由帧间移位叠加得到的弱星位置信息对星敏感器姿态误差补偿效果显著。

(2) 基于模拟星图的测试

选用真实星进行仿真。光轴指向天球 $(195^\circ, 0^\circ)$ 附近，SAO 星表中亮于 6 Mv 的 4 颗星落入光轴周围的 20° 视场范围内，参数如表 3 所示。

表 3 星像点参数

Tab.3 Parameters of star spots

Star number	α	δ	Magnitude/Mv	
A	SAO 138 917	$190^\circ 24' 54''$	$-1^\circ 31' 5''$	2.9
B	SAO 119 674	$193^\circ 54' 3''$	$3^\circ 23' 51''$	3.7
C	SAO 139 189	$197^\circ 29' 15''$	$-5^\circ 32' 20''$	4.5
X	SAO 119 899	$200^\circ 25' 25''$	$2^\circ 5' 14''$	5.7

星敏感器视场光轴运动轨迹如图 8 所示。

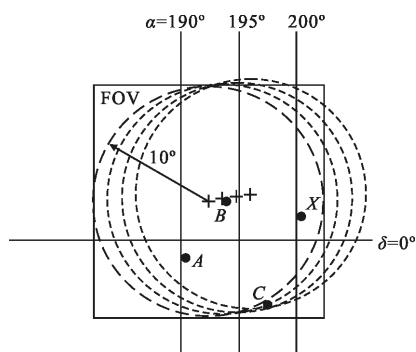


图 8 连续四帧的光轴指向

Fig.8 Boresight direction in 4 frames

在第 m 帧中,亮星 C 已移出星敏感器圆形有效视场,视场内只有 A 、 B 两颗亮星。同时,单帧星图弱星成像灰度低于探测灰度阈值,无法探测及定位。窗口移位叠加前各帧仿真结果如表 4 所示。

灰度窗口叠加后,弱星 X 峰值灰度 $A_p=562$,三星优化定姿算法解算光轴姿态角 $(\alpha, \delta, \gamma)=(192.366 1^\circ, 3.390 0^\circ, 0.517 0^\circ)$ 。绝对误差 $(\Delta\alpha, \Delta\delta, \Delta\gamma)=(0.18'', -0.80'', -33.9'')$, 小于双星定姿算法的绝对误差 $(\Delta\alpha', \Delta\delta', \Delta\gamma')=(-5.17'', 1.83'', 59.2'')$ 。

表 4 叠加前姿态确定仿真结果

Tab.4 Simulation results of attitude determination without superposition algorithm

Frame number	$m-3$	$m-2$	$m-1$	m
Centroid coordinates				
A	(795.568, 787.879)	(734.524, 776.846)	(673.660, 766.141)	(612.940, 755.646)
B	(617.638, 542.298)	(556.668, 532.176)	(495.716, 522.261)	(434.690, 512.351)
C	(436.135, 997.313)	(376.035, 987.761)	(315.863, 978.295)	Out of range
X	-	-	-	-
Peak gray				
A	604	566	623	621
B	337	364	356	336
C	204	232	204	-
X	130	146	138	148
Detectable star	A, B, C	A, B, C	A, B, C	A, B
Measuring attitude angles	(195.9989°, 4.0002°, 0.0002°)	(194.7872°, 3.8010°, 0.1842°)	(193.5751°, 3.5977°, 0.3710°)	(192.3646°, 3.3908°, 0.5429°)
Reference attitude angles	(196°, 4°, 0°)	(194.7878°, 3.8005°, 0.1798°)	(193.5764°, 3.5972°, 0.3553°)	(192.3660°, 3.3903°, 0.5264°)

4 结论

提出了基于帧间移位叠加的弱星提取及质心定位技术,通过增强弱星成像灰度信噪比的途径,解决了星敏感器观星视场中有效星数量不足、观测星亮度不够而导致定姿精度不高的问题。在动态跟踪模式下,对每帧星图中目标弱星窗口内像素灰度进行流水缓存,当星敏感器仅能探测到 2 颗星的情形时,通过帧间窗口移位灰度叠加的方式可以确保目标弱星能够被有效提取,从而双星定姿情形变为了三星定姿,克服了 TRIAD 算法定姿精度偏低的问题。

针对灰度重心法质心定位原理,推导出了帧间

移位叠加后的星像质心计算公式,在背景灰度电平 $b=100$ 高斯白噪声 $N(0, 100)$ 的仿真环境下,50 组样本的理论仿真结果表明,窗口移位叠加后弱星信噪比提高了 1.283 倍,探测率提高 92%。加上移位叠加后获得的第 3 颗可探测星后运用三星定姿得到的试验误差小于双星定姿误差,姿态角误差减小了约 40%。在星图仿真环境下,三星优化算法精度优势更为明显。

参考文献:

[1] Liu Jinguo, Li Jie, Hao Zhihang. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. *Optics and Precision*

- Engineering*, 2006, 14(4): 553–557. (in Chinese)
刘金国, 李杰, 郝志航. APS 星敏器探测灵敏度研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 553–557.
- [2] Xu Wei. Star fast extraction and high accuracy centroid estimation of star camera [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 16–18. (in Chinese)
许威. 星点快速提取与高精度定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 16–18.
- [3] Han Yanli, Liu Feng. Small targets detection algorithm based on triangle match space[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3134–3140. (in Chinese)
韩艳丽, 刘峰. 基于三角形匹配的空间小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3134–3140.
- [4] Zhang Guangjun, Wei Xinguo, Jiang Jie. Full -sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern[J]. *Image Vision Computer*, 2008, 26(7): 891–897.
- [5] Chen Hao, Tan Jiubin. Improved TRIAD algorithm for spacecraft attitude determination [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(8): 2101–2104. (in Chinese)
陈浩, 谭久彬. 一种改进的 TRIAD 飞行器姿态确定方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2101–2104.
- [6] Liu Xiaohui, Dang Yamin, Wang Qianxin, et al. Analysis of three algorithms of attitude determination based on two baselines [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(1): 123–127. (in Chinese)
刘晓辉, 党亚民, 王潜心, 等. 双基线姿态确定三种算法的比较分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(1): 123–127.
- [7] Zeng Fen. High accuracy star camera image processing technology [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Pyhsics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 38–42. (in Chinese)
曾芬. 高精度星相机图像处理技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 38–42.
- [8] Hu Xiaodong, Hu Qiang, Lei Xing, et al. Method of star centroid extraction used in daytime star sensors [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(4): 481–485. (in Chinese)
胡晓东, 胡强, 雷兴, 等. 一种用于白天星敏器的星点质心提取方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 481–485.
- [9] Sun Kelin, Zhou Weichao, Wu Qinzhong, et al. Star-point moving target detection and tracking on star space background [J]. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 2012, 6(5): 124–132.
- [10] Wang Xuewei, Wang Chunxin, Zhang Yuye. Research on SNR of point target image [J]. *Electronics Optics and Control*, 2010, 17(1): 18–21. (in Chinese)
王学伟, 王春歆, 张玉叶. 点目标图像信噪比计算方法[J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 18–21.
- [11] Cheng Yuan. The application of multi-frame superposition and median filtering in LLL image denoise [J]. *Radio Communications Technology*, 1997, 23(3): 34–36. (in Chinese)
程源. 多帧叠加及中值滤波在微光图像降噪中的应用[J]. 无线电通信技术, 1997, 23(3): 34–36.
- [12] Liebe C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587–599.
- [13] Xu Wei, Li Qi, Feng Huajun, et al. A novel star image thresholding method for effective segmentation and centroid statistics[J]. *Optik*, 2013, 124(20): 4673–4677.
- [14] Zhong Hongjun, Lu Xin, Li Chunjiang, et al. Design and applications of novel separated type star tracker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1278–1283. (in Chinese)
钟红军, 卢欣, 李春江, 等. 新型分体式星敏器设计及其应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1278–1283.
- [15] Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1672–1677. (in Chinese)
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(7): 1672–1677.
- [16] Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(9): 812–815. (in Chinese)
魏新国, 张广军, 江洁. 星敏器中星图图像的星体细分定位方法研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812–815.
- [17] Zhang Renwei. Dynamics and Control of Satellite Orbit and Attitude [M]. Beijing: Beihang University Press, 1998. (in Chinese)
章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [18] Wang Haiyong, Xu Ershuai, Li Zhifeng, et al. Gaussian Analytic Centroiding method of star image of star tracker[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(10): 2196–2205.