

引用格式: LV Yuanyuan, LIU Zhaohui, QIAO Wenlong, et al. Analysis of Detection Capability of Space Target Based on Event Camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0211001

吕媛媛,刘朝晖,乔文龙,等.空间目标事件相机探测能力分析[J].光子学报,2023,52(2):0211001

空间目标事件相机探测能力分析

吕媛媛^{1,2,3},刘朝晖^{1,3},乔文龙^{1,2,3},周亮^{1,3},孙笑敬^{1,2,3},陈沛权^{1,2,3},
李文凯^{1,2,3},张海洋^{1,2,3}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 中国科学院空间精密测量技术重点实验室,西安 710119)

摘 要:建立了事件相机空间目标探测灵敏度模型,分析了影响事件相机观测灵敏度的影响因素,得到了可观极限星等与阈值的线性关系,并通过望远镜进行了外场观星实验。结果表明事件相机可以进行空间目标探测,同时验证了空间目标探测灵敏度模型的准确性。进一步明确了阈值对事件相机空间目标探测的影响,为基于事件相机的空间目标观测及其他相关研究提供了理论基础。

关键词:生物视觉传感器;事件相机;空间目标观测;灵敏度;星等

中图分类号: TP29

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235202.0211001

0 引言

事件相机作为一种新型的仿生类传感器,可以实现对目标的高时间分辨率、高动态范围、低带宽、低功耗、低延迟的实时探测。传统相机按照固定帧率成像,而事件相机对场景中每个像素的亮度变化做出异步和独立的响应,将信息在读出时打包为一个数据包,即“事件”。通过对事件流的图像重建,可以实现目标探测^[1]。

2006年, LICHTSTEINER P等提出了第一个商用的事件相机^[2],称为动态视觉传感器(Dynamic Vision Sensor, DVS),以微秒级时间分辨率响应亮度相对变化。2011年, POSCH C等提出了基于异步时间的图像传感器(Asynchronous Time-based Image Sensor, ATIS)^[3],在 DVS 的结构基础上,增加了一个曝光结构,让两个光感受器同时工作,在输出事件的同时曝光获取一定的灰度信息。2013年 DELBRUCK T等针对 ATIS 在光强变化缓慢的情况下易出现曝光异常的情况提出了动态主动像素视觉传感器(Dynamic and Active Pixel Vision Sensor, DAVIS)^[4-5],将传统相机与事件相机相结合,利用事件相机的光感受器同步曝光,同时得到事件信息与灰度信息。到目前为止,国内外有许多商业公司致力于事件相机的发展与商用,包括韩国 Samsung 公司、法国 Prophesee 公司、瑞士 IniVation 公司和中国芯仑科技公司等^[6]。

基于事件相机独特的优势,事件相机被各个领域的研究者所关注。例如在特征检测与跟踪领域,实现了目标高精度的实时跟踪^[7-11],并可应用于微观粒子的跟踪与测速^[12]。在同步定位和测绘中也成为一种流行且有前途的视觉传感器^[13-15],在机器人、无人机中得到了广泛的应用。事件相机同样被用于立体匹配与深度估计^[16-19]。基于事件相机的视觉位姿估计问题也是移动机器人领域的一个研究热点问题,并且已经取得了显著进展^[20-22]。

随着事件相机的发展,基于事件相机的空间目标探测逐渐被研究人员所关注。2017年 COHEN G 等证明了使用事件相机(借助望远镜)观察空间物体的可行性^[23]。2018年, CHEUNG B 等实现了基于事件流数据的目标自动检测与跟踪^[24]。同年 CHIN T J 等使用事件相机进行了恒星跟踪^[25],相比于传统传感器具有

基金项目:国家自然科学基金(No.61805275)

第一作者:吕媛媛, 616647643@qq.com

通讯作者:周亮, zhouliaang@opt.ac.cn

收稿日期:2022-08-03;录用日期:2022-09-22

<http://www.photon.ac.cn>

更低的功耗和更高的运行速度,在航天领域有重大意义。2020年,BAGCHI S等提出了一种基于事件相机的恒星跟踪处理方法^[26],对恒星场的事件流进行操作,实现了更高效准确的恒星跟踪。事件相机在空间目标探测领域中展示了巨大的潜力,但该方面研究成果还比较少,缺乏基础理论支撑。本文结合空间目标观测成像过程与事件相机成像原理,分析了事件相机进行空间目标观测的成像原理。以星等为评估标准建立了事件相机空间目标探测灵敏度模型,明确了影响事件相机空间目标成像能力的重要因素。最后进行了外场观星实验,对所提模型进行了验证。

1 基于事件相机的空间目标探测灵敏度模型

空间目标观测的成像过程是一个复杂的光电转化过程,其观测成像过程如图1所示,目标信号(反射太阳光信号以及星空背景信号)经过空间传输后,进入光学系统,在焦平面探测器上感光,通过信号电路处理成数字图像。

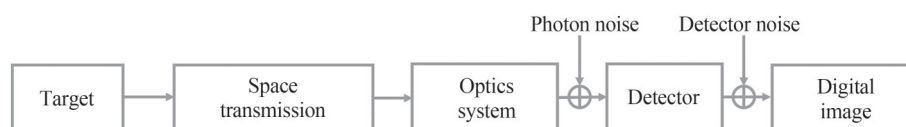


图1 空间目标光电成像过程
Fig. 1 Photoelectric imaging process of space target

1.1 空间目标传统探测能力

在光学系统一定的情况下,探测器对探测系统探测性能起决定性作用,在空间目标观测中,较为常用的是电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)及互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)。

以星等为探测器空间目标成像能力的评估标准,目标光在入瞳处的极限星等表示为^[27]

$$m \leq -\log_{2.512} \left[\frac{683 \times 10^6}{5.3} \cdot \frac{T_{sn}^2 + \sqrt{T_{sn}^4 + 4(N_D + N_B)T_{sn}^2}}{\lambda D^2 \eta \tau_1 \tau_0 t_0 a^2} \right] d^2 hc \quad (1)$$

由式(1)可知,当光学系统固定时,探测器曝光时间与信噪比阈值是影响探测器探测灵敏度的重要因素。为了模拟仿真得到信噪比阈值设置对系统探测能力的影响,本文参考FLIR公司BFS-U3-51S5M-C相机以及CPC celestron 8"望远镜参数,对空间目标探测灵敏度影响因素设置典型参数为:平均波长 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$,大气透过率 $\tau_1 = 0.4$,光学系统有效通光口径 $D = 0.2 \text{ m}$,光学系统透过率 $\tau_0 = 0.7$,背景噪声产生的光电子数 $N_B = 50 \text{ photon/s}$,CCD像元大小 $a = 3.45 \mu\text{m}$,光学系统造成的弥散斑直径 $d = 1.8a$ 即1.8个像元大小,平均量子效率 $\eta = 0.28$,暗电流产生的光电子数 $N_D = 20 \text{ photon/s}$,普朗克常数 $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$,光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, t_0 为曝光时间, T_{sn} 为信噪比阈值。

根据上述参数模拟了不同曝光时间下,信噪比阈值与探测极限星等的关系,如图2所示,一般情况下要

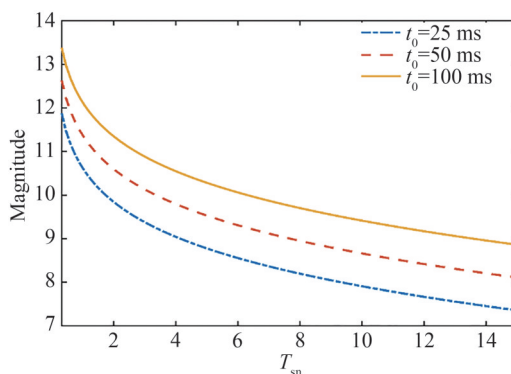


图2 传统探测器信噪比阈值与极限星等的关系
Fig. 2 Relationship between the signal-to-noise ratio threshold and the limit magnitude of traditional detectors

求探测率大于99%,虚警率小于1%,信噪比阈值取值应大于5。

由图2可知,曝光时间增加,系统探测灵敏度变高,可探测的极限星等变高,主要因为曝光时间增加,图像传感器积分产生更多的电子,输出的信号增强,信噪比增大。相应的,信噪比阈值要求降低,所需信号强度降低,探测器理论上可以探测到的星等变高。取探测器信噪比阈值为5,积分时间为50 ms时,探测器可探测到的极限星等约为10等星,与实际观测结果一致。

1.2 事件相机目标探测机理

事件相机感光像素单元电路设计如图3(a)所示,使用了对数光感受器、差分放大器和比较器,这样的电路结构设计使得事件相机具有高灵敏度、高动态范围以及低延时的特性。事件相机单个感光像素单元产生事件的过程如图3(b)所示。将某一时刻某个感光像素单元 $u=(i,j)^T$ 监测到的光照强度设为 $I=(u,t)$,对得到的光照强度取对数运算,如果在 Δt 范围内的变化量超过设定的阈值 C_{th} ,即 $|\Delta \ln I(t)| = |\ln I(u, t + \Delta t) - \ln I(u, t)| \geq C_{th}$,则该感光像素单元被激活并产生事件,其中 Δt 表示同一像素地址的前一个事件与该事件发生的时间间隔,阈值 C_{th} 可人为设定。当像素单元被激活后输出事件 $e_k=(x_k, y_k, t_k, p_k)$,其中 (x_k, y_k) 表示事件发生的像素地址, t_k 表示事件发生的时间, $p_k \in \{-1, 1\}$ 表示事件的极性, $p_k=1$ 表示变亮事件, $p_k=-1$ 表示变暗事件。

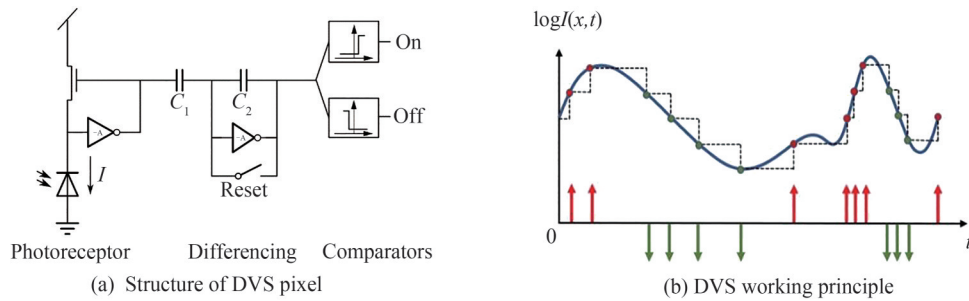


图3 事件相机单个像素单元工作原理^[28]
Fig. 3 Diagram of the principle of the DVS pixel^[28]

传统探测器通过记录目标光强实现目标探测,因此,增加其曝光时间可以实现弱目标检测。事件相机针对目标光强变化而做出响应,在进行空间目标观测时,目标光强的变化使得事件相机像素被激活输出事件流实现目标观测,造成目标光强变化即事件相机可以应用于空间目标观测的主要原因有:

1) 目标与探测器的相对运动

地球不断进行公转与自转,观测系统与被观测的空间目标存在相对运动,即目标与事件相机存在相对运动,因此探测器上不同位置的像素点不断被激活,输出一系列事件,通过对事件流的图像重建,可以实现空间目标探测。

2) 大气扰动

由于湍流大气中折射率的随机不均匀分布,当光线通过时,会在不均匀微元上产生折射,从而对原本稳定传播的光束产生扰动^[29]。空气密度起伏导致折射率发生变化,折射率影响光线的传播,因此在天文观测领域,从地面观察天上的星辰有明显的闪烁现象。光强越强,由大气扰动造成的光强波动范围越大^[30],事件相机可以实现观测的可能性也越大。

目标与探测器的相对运动以及大气扰动共同造成了探测到的目标位置以及亮度发生变化,进入探测系统的空间目标光强不断随时间发生变化,使得探测器上的像素点不断被激活,输出事件,处理事件流信号可完成空间目标观测任务。根据上述分析,目标信号光强越大,因湍流和相对运动导致的光强变化越大,事件相机越容易观测到目标信号,因此与传统探测系统灵敏度模型类似,可以使用极限星等作为标准进行空间目标探测灵敏度评估。

1.3 事件相机空间目标探测灵敏度模型

星等是恒星或者其他天体亮度的度量,两个辐照度相差100倍的星体,其亮度相差5个星等,即它们的

可见光波段的平均光流量密度之比 E_2/E_1 为 100。将两个恒星的亮度与星等联系起来表示为

$$E_2/E_1 = 100^{(m_1 - m_2)/5} = 10^{0.4(m_1 - m_2)} = 2.512^{m_1 - m_2} \quad (2)$$

式中, m_2, m_1 分别为两颗恒星的视星等值, E_2, E_1 分别为其照度值。此外, 规定零等星在大气层外照度值为 $E_0 = 2.65 \times 10^{-6} \text{ lx}$ 作为计算照度的基准。由理论分析和实验测量可知, 对于可见光波段的平均波长 $0.555 \mu\text{m}$ 的单色辐射, 星等与照度之间的关系表示为

$$E_m = E_0 \times 2.512^{-m} \text{ lx} = \left(\frac{1}{683} \right) \times 2.65 \times 10^{-6} \times 2.512^{-m} \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

则空间目标观测系统相机入瞳处的点目标信号等效星等表示为

$$m = -\log_{2.512} \frac{E_m}{E_0} = -13.98 - 2.5 \lg E_m \quad (4)$$

若大气透过率为 τ_0 , 光学系统透过率为 τ_1 , 通过光学系统接收的总光通量(假设照度均匀)为

$$\Phi = \tau_1 \tau_0 S_d E_m \quad (5)$$

式中, $S_d = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 (1 - \alpha^2)$, D 为相机光学系统的有效通光口径, α 为望远镜副镜遮拦比, 假设目标能量在焦平面探测器上均匀分布在直径为 d 的范围内, 探测器像元尺寸为 $a \times a$, 则探测器像元上所接收的光通量为

$$\Phi_0 = \frac{\tau_1 \tau_0 S_d E_m a^2}{\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2} = \frac{a^2 D^2 (1 - \alpha^2)}{d^2} \tau_0 \tau_1 E_m \quad (6)$$

则探测器单个像元上接收的光照强度为

$$I = \frac{a^2 D^2 (1 - \alpha^2)}{2\pi d^2} \tau_0 \tau_1 E_m \quad (7)$$

当光照强度的对数变化值大于阈值即 $|\Delta \ln I(t)| = |\ln I(u, t + \Delta t) - \ln I(u, t)| \geq C_{th}$ 时, 像素被激活并产生事件。

计算事件相机空间目标探测极限, 因此考虑相对运动及大气扰动使目标发生的最大亮度变化的情况, 即初始信号强度为 0, 变化后光强为 I 。由图 3 事件相机电路原理图可知, 光电感受器接收光强转化为光电流, 之后通过差分放大电路输出电压并与比较电路中预先设置的阈值进行比较。设 β 为光电转化过程中的转化因子, 由光感受器的光电转化效率, 差分放大电路的放大倍率共同决定, 即当 $I_p = \beta I \geq e^{C_{th}}$ 时, 相机产生事件, 因此可以得到系统辐照度探测灵敏度模型

$$E_m \geq \frac{2\pi d^2}{\tau_0 \tau_1 a^2 D^2 (1 - \alpha^2) \beta} e^{C_{th}} \quad (8)$$

将可探测的极限星等作为衡量事件相机空间目标观测能力的标准, 可以得到目标光在入瞳处的等效视星等 m 表示的探测灵敏度模型为

$$m \leq -\log_{2.512} \left[\frac{683 \times 10^6}{2.65} \frac{2\pi d^2}{\tau_0 \tau_1 a^2 D^2 (1 - \alpha^2) \beta} e^{C_{th}} \right] = A - BC_{th} \quad (9)$$

式中, $A = \log_{2.512} \left(\frac{2.65 \tau_0 \tau_1 a^2 D^2 \beta}{2 \times 683 \times 10^6 \times \pi d^2} \right)$, $B = -\frac{1}{\ln 2.512} = 0.92$, 即当光学系统与探测器参数一定时, 阈值与极限星等成线性关系。

1.4 事件相机空间目标探测灵敏度影响因素分析

由式(9)可以看出事件相机所能探测到的最弱空间目标的等效星等与阈值设置成线性关系, 其中光学系统性能指标如望远镜系统口径、弥散斑尺寸、像元尺寸、光学系统透过率、大气透过率以及相机硬件设置如光感受器转化效率、差分放大电路放大倍数等决定了事件相机理论上可探测目标的极限星等, 这与传统探测器一致, 其中事件相机光电转换因子对应传统相机的量子效率, 定性分析可以得出, 光学系统透过率高, 大气透过率高, 光学孔径越大、像元尺寸越大, 星点光斑能量越集中, 光电感受器光电转化能力越大, 系统的弱目标探测灵敏度越高。在光学系统及探测器参数确定的情况下, 随着阈值的增加, 极限星等等比例降低。

本文根据芯仑科技2019发布的Celex V事件相机以及CPC celestron 8"望远镜为例,设置典型参数如表1所示,当分析某个参数的影响时,其他参数取典型值。

表1 事件相机空间目标探测灵敏度影响因素
Table 1 Factors affecting the detection sensitivity of event cameras in space

Symbol	Meaning	Typical value
τ_1	Atmospheric transmittance	0.4
D	Clear aperture	0.2 m
τ_0	Transmissivity of optical system	0.7
α	Obstruction ratio	0.31
a	Pixel size	$9.8 \mu\text{m}$
d	Diffuse spot diameter	$1.8 a$

首先定量分析光学系统各主要参数对系统探测灵敏度的影响。当其他参数设置典型值时,分别分析光学系统有效通光口径、大气透过率、光学系统透过率以及光学系统造成的弥散斑直径对系统极限探测星等的影响如图4所示。

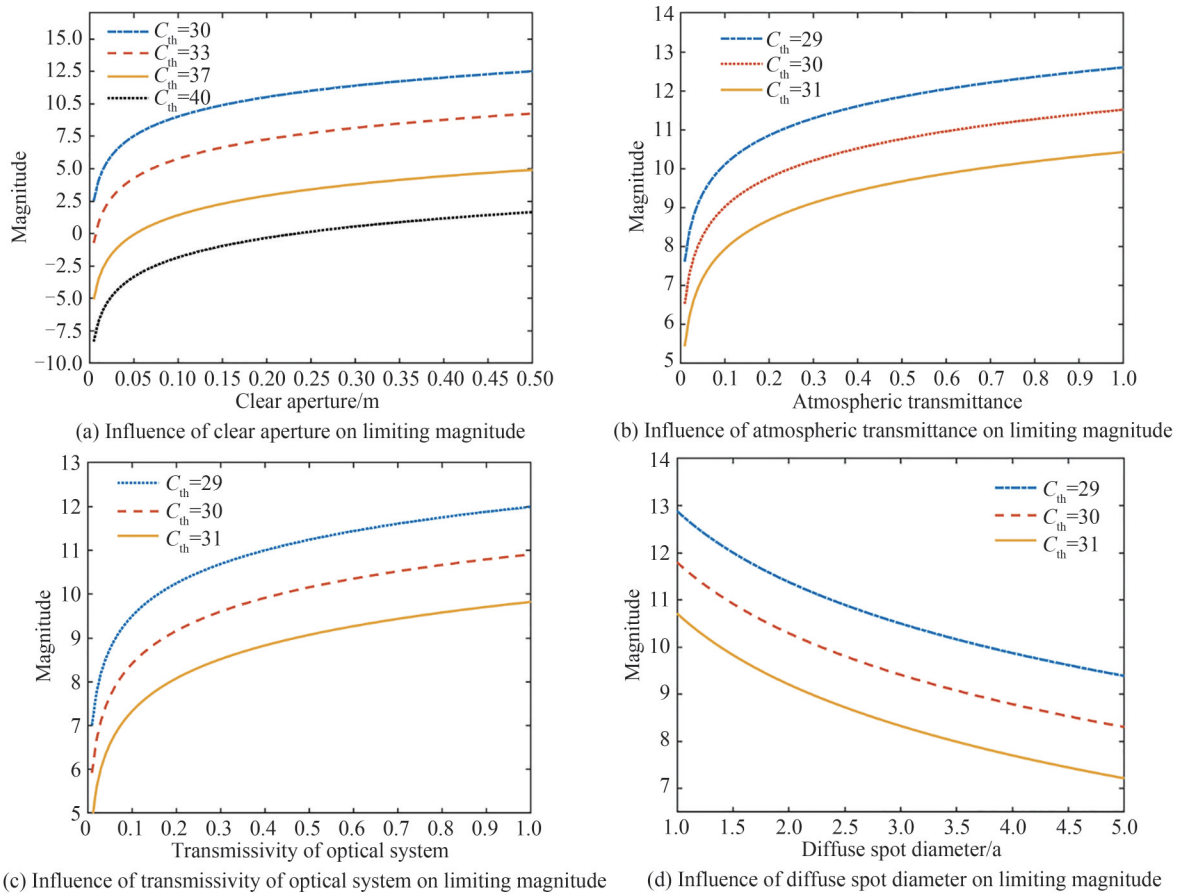


图4 系统参数与探测极限星等的关系

Fig. 4 Relationship between system parameters and detection limit magnitude

由图4可知,系统灵敏度随着光学系统的有效通光口径 D 、大气透过率、光学系统的透过率的增大而增大,主要原因为口径、大气透过率、光学系统透过率的增大使得探测器能够接收到的空间信号增加,灵敏度升高。因此,一般情况,空间目标观测选择较大口径,对可见光波段具有较高的透过率的光学镜头,在晴朗的天气进行观测。如图4(d)所示,像点弥散对探测能力、成像精度都有严重的影响,取弥散斑直径范围在一个像元到五个像元之间,模拟得到了弥散斑直径 d 对空间探测灵敏度的影响,可见,弥散斑直径每增加一个像元大小,探测极限星等减少1个星等及以上,因此,光学系统设计时,需要进行精心设计和装调,避免产生

过大的像点弥散。

根据探测模型可知,阈值是影响事件相机空间目标探测灵敏度的重要因素。当阈值增加时,事件产生所需光强变化增加,探测器灵敏度变低,系统可以探测到的极限星等降低。模拟不同口径望远镜设置不同阈值时极限星等的变化情况如图5所示。

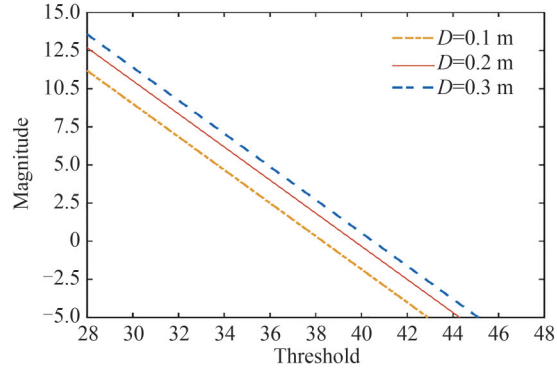


图5 阈值与探测极限星等的关系

Fig. 5 Relationship between threshold and detection limit magnitude

理论上,将相机阈值设为零时,可以达到系统最高可观测星等,但在实际实验中,阈值降低意味着系统对信号及噪声探测灵敏度的同时升高,阈值降低,图像中噪声事件输出增加,对数据输出及后续图像处理都提出了更高的要求。事实上,事件相机生产厂商往往将阈值划分为多个等级而非准确数值,并设置最低阈值限制,并且在实际实验中,往往不会通过降低阈值,牺牲信噪比来追求更高的探测灵敏度,一般根据目标特性,设置合适的阈值,以实现目标的合理观测。值得注意的是,由于厂商不同,阈值等级划分不同,因此上节所提到的灵敏度模型中的常数 B 往往因选用不同参数的事件相机而有不同的取值。本文以Celex V事件相机为例,建立了事件相机空间目标探测灵敏度模型并对其进行标定验证,为后续事件相机相关实验的阈值选择提供理论指导。

2 实验与结果

2.1 实验方法

在西安(东经 $108^{\circ}51'13''$,北纬 $34^{\circ}10'13''$),通过C口转接环将CPC celestron 8"望远镜分别与CMOS相机BFS-U3-51S5M-C和事件相机Celex V相连,进行空间目标探测实验。

所使用望远镜为8"衍射极限施密特-卡塞格林式望远镜,焦距为2 032 mm, F 数为10,副镜直径遮挡比为31.30%,内置GPS及自动寻星系统。将其与CMOS相机相连,相机像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$,像元数为 $2\ 048 \times 2\ 488$,因此其视场为 $0.196\ 3^{\circ} \times 0.238\ 4^{\circ}$,瞬时视场角为 $0.98''$ 。之后连接Celex V与望远镜,相机像元尺寸为 $9.8 \mu\text{m}$,像元数为 $800 \times 1\ 200$,相连后视场为 $0.217\ 8^{\circ} \times 0.326\ 7^{\circ}$,瞬时视场角为 $0.345''$ 。选择晴朗天气使用该系统进行实验,考虑望远镜内置的自动寻星系统存在一定误差,选择识别度较高的星体进行实验:1)分别使用CMOS相机与Celex V事件相机对木星、土星、火星进行观测,对比两种相机成像结果;2)调节阈值,观察阈值变化对目标成像的影响;3)针对该系统采用实验方式进行灵敏度模型标定实验,并对该模型进行实验验证。

2.2 结果与分析

2.2.1 行星观测

分别使用CMOS相机与Celex V事件相机对木星、土星、火星进行观测。由于事件相机输出的是一系列事件流,每个事件仅包含像素坐标、事件发生时间,因此不具有可视性。本文采用时间切片的方式对事件流进行可视化^[31],在短时间内对事件进行积累,形成二维事件帧图像以便观测。在使用事件相机对行星进行观测时,对其40 ms内产生的事件进行时间切片得到最终结果图。图6展示了夜间观测的一组示例,在观测过程中开启望远镜内置的自动跟踪系统进行实验。

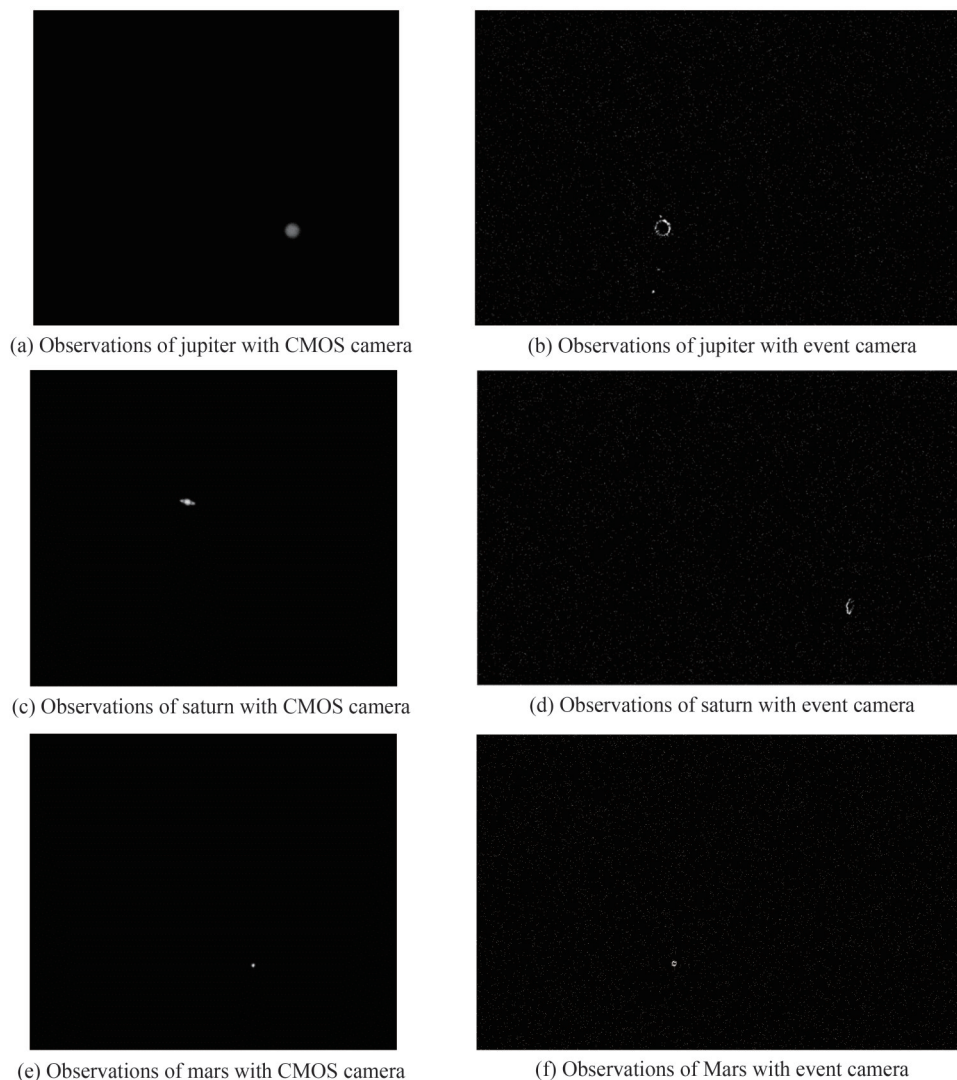


图6 行星观测

Fig. 6 Observation of the planetary

图6(a)是使用CMOS相机观测木星的结果图,可见木星整个结构状态,但由于像素限制,原始图像无法看清木星表面纹理。CMOS相机采用全局曝光,调整曝光时间使木星清晰成像,由于木星亮度与其卫星亮度差别较大输出图像无法看清其卫星。使用事件相机观测木星可以看到木星轮廓,无法看清其表面纹理,可见木星卫星。原因为行星内部部分亮度变化较为均匀,产生的事件远少于外部边缘,因此外圈的变化较为显著,事件相机不存在过度曝光及欠曝光情况,因此其卫星在事件相机图像中同样清晰可见。土星火星观测图如图6(c)~(f)所示,由于星体边缘亮度变化大,内部变化小,因此边缘外圈产生事件较多,较为明显,输出图像显示星体呈环状。

综合以上分析,事件相机可以进行空间目标探测,其空间分辨率低于传统相机,但事件相机动态范围较高,当同一视场中出现多个亮度差别较大的目标时,由于传统相机采用全局曝光的曝光方式,会出现欠曝光及过度曝光的情况,无法探测到全部目标,事件相机不受曝光方式的影响,可以对视场内所有目标进行探测。除此之外,使用事件相机成像,基于其高时间分辨率的优势,可以对目标运动轨迹有更准确的判断,无运动模糊,也可以实现低功耗、低数据冗余、低延时的高速信号传输,在空间目标观测领域具有重大意义。

2.2.2 阈值变化对成像的影响

分别设置事件相机阈值为69、100、200、250,对北极星进行观测,结果如图7所示。

阈值较低时,图像中信号较为明显,但噪声事件较多,当进行弱目标观测时,阈值过低容易造成噪声事件与信号事件无法区分。阈值升高,系统探测灵敏度下降,信号不明显,影响信号识别。因此在使用事件相

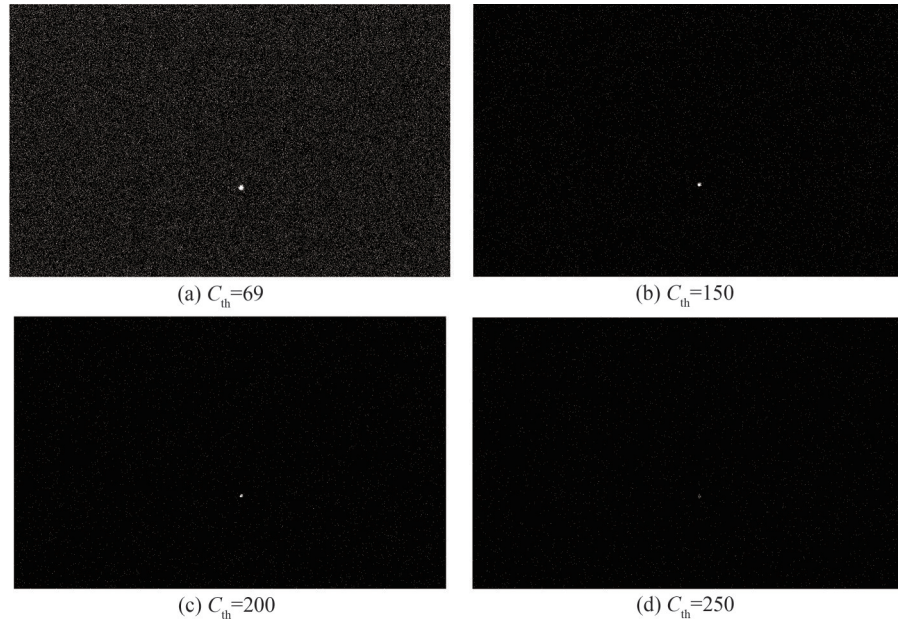


图7 不同阈值下事件相机北极星成像

Fig. 7 Polaris imaging with Event Camera at different thresholds

机进行空间目标观测时,阈值的选择极其重要,既要保证高探测灵敏度也要避免大量噪声事件的产生从而对信号识别产生影响。

2.2.3 模型标定及验证

针对该系统,将事件相机空间目标探测灵敏度模型简化为 $m = A - BC_{th}$,首先选取天空中识别度较高的五个目标如表2所示进行模型标定。

表2 标定数据

Table 2 Calibration data

Name	Magnitude	Threshold
Arcturus	-0.05	280
α Lyrae	0.03	277
Altair	0.76	273
Spica	0.98	270
Alcor	2.23	264

对该系统探测灵敏度模型进行标定得到其模型为 $m = 40.35 - 0.145C_{th}$,线性相关系数 $R=0.9593$,符合拟合要求,说明极限星等与阈值之间存在较好的线性性,如图8所示。

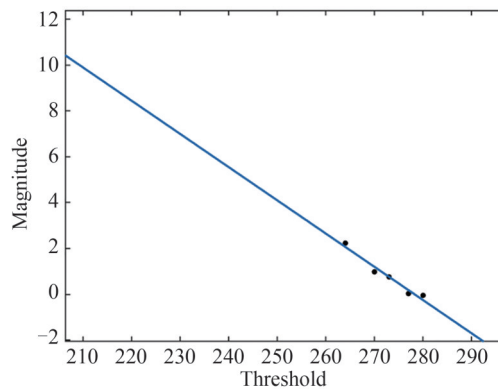


图8 灵敏度模型拟合结果

Fig. 8 Sensitivity model fitting results

针对上述得到的模型,选择北极星、心宿二、北斗七、北斗五四个目标进行模型的实验验证,数据如表3所示,结果如图9所示。

表3 验证实验
Table 3 Validation experiment

Name	Magnitude	Theoretical threshold	Threshold	Relative error
Polaris	1.97	264.69	265	0.12%
Antares	1.06	270.97	269	0.73%
η UMa	1.85	265.52	267	0.56%
ϵ UMa	1.76	266.14	260	2.31%

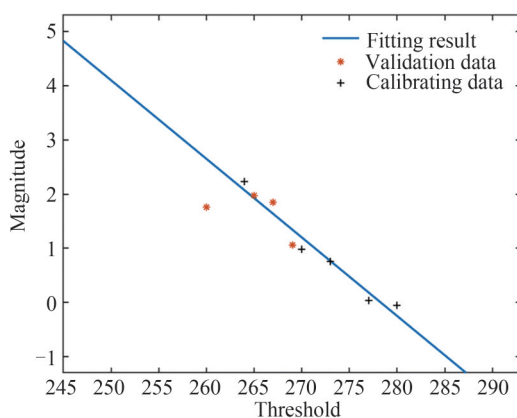


图9 灵敏度模型验证结果
Fig. 9 Sensitivity model validation result

此次实验由于环境及望远镜目标识别精度限制,得到的实验数据较少,但均为可靠数据,得到的拟合结果平方误差较小,精度得到了保障且进行实验验证时,相对误差小于3%,验证了该模型的准确性。根据该模型,在后续进行不同星等目标观测时,可以选择合适的阈值,在合理范围内,既可以获得较高的系统探测灵敏度,也可以尽可能地减少噪声事件的产生,减少噪声对目标探测的不利影响。

3 结论

本文针对事件相机的空间目标探测能力进行了理论分析,建立了事件相机空间目标探测灵敏度模型,通过CMOS相机与事件相机的共同采集实验,证明了事件相机用于空间目标探测的可行性及其探测优势,通过外场观星实验,对系统的探测灵敏度进行了标定及验证。结果表明,基于事件相机的空间目标观测灵敏度模型线性拟合结果较好,平均误差小于3%,模型准确度较高,此外,事件相机进行空间目标探测具有高时间分辨率、高动态范围、低数据冗余、可实现低功耗、高信息传输速率的优势,在空间目标监视中有较大的应用前景。本文明确了影响事件相机空间目标观测能力的影响因素,重点指出了事件相机阈值设置对灵敏度的影响,为事件相机进行空间目标观测及相应的研究提供了理论指导。

参考文献

- [1] KONG Delei, FANG Zheng. A review of event-based vision sensors and their applications[J]. Information and Control, 2021, 50(1): 1-19.
孔德磊, 方正. 基于事件的视觉传感器及其应用综述[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 1-19.
- [2] LICHTSTEINER P, POSCH C, DELBRUCK T. A 128 X 128 120db 30mw asynchronous vision sensor that responds to relative intensity change[C]. Proceedings of the IEEE International Solid-state Circuits Conference, 2006.
- [3] POSCH C, MATOLIN D, WOHLGENANT R. A QVGA 143 dB dynamic range frame-free PWM image sensor with lossless pixel-level video compression and time-domain CDS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(1): 259-275.
- [4] BERNER R, BRANDLI C, YANG M, et al. A 240×180 10mW 12us latency sparse-output vision sensor for mobile applications[C]. Proceedings of the Vlsi Circuits, 2013.

- [5] BRANDLI C, EBRNER R, YANG M, et al. A 240×180 130 dB 3 μ s Latency global shutter spatiotemporal vision sensor [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2014, 49(10): 2333-2341.
- [6] FANG Yinghong, XU Wei, PU Yongjie, et al. Development status and trend of event-based vision sensor[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(12): 1664-1673.
方应红, 徐伟, 朴永杰, 等. 事件视觉传感器发展现状与趋势[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(12): 1664-1673.
- [7] WEN S, AN W, LI H, et al. Event-based improved FAST corner feature detection algorithm[C]. *Proceedings of the 31st Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Nanchang, 2019.
- [8] WANG Y, LIU C, LI S, et al. A multi-target tracking algorithm for fast-moving workpieces based on event camera[C]. *Proceedings of the 47th Annual Conference of the IEEE-Industrial-Electronics-Society (IECON)*, 2021.
- [9] MITROLCHIN A, FERMUELLER C, PARAMESHWARA C, et al. Event-based moving object detection and tracking [C]. *Proceedings of the 25th IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018.
- [10] LI R, SHI D, ZHANG Y, et al. Asynchronous event feature generation and tracking based on gradient descriptor for event cameras[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, 18(4): 1-13.
- [11] BLIZZARD D, DAVAR S, MOHAMMADI A, et al. Real-time and event-triggered object detection, recognition, and tracking [C]. *Proceedings of the 60th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2017.
- [12] WANG Y, IDOUGHI R, HEIDRICH W. Stereo event-based particle tracking velocimetry for 3D fluid flow reconstruction[C]. *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, 2020.
- [13] NEWMAN P, COLE D, HO K, et al. Outdoor SLAM using visual appearance and laser ranging[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2006.
- [14] MA Y, YE Z, LIU K, et al. Event-based visual localization and mapping algorithms: a survey [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(7): 1484-1494.
- [15] KIM H, LEUTENEGGER S, DAVISON A J. Real-time 3D reconstruction and 6-DoF tracking with an event camera [C]. *Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2016.
- [16] XIE Z, CHEN S, ORCHARD G. Event-based stereo depth estimation using belief propagation [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2017, 11:535.
- [17] ROGISTER P, BENOSMAN R, IENG S H, et al. Asynchronous event-based binocular stereo matching [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2012, 23(2): 347-353.
- [18] PIATKOWSKA E, BELBACHIR A N, GELAUTZ M, et al. Asynchronous stereo vision for event-driven dynamic stereo sensor using an adaptive cooperative approach[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2013.
- [19] FIROUZI M, CONRADT J. Asynchronous event-based cooperative stereo matching using neuromorphic silicon retinas [J]. *Neural Processing Letters*, 2016, 43(2): 311-326.
- [20] VALEIRAS D R, ORCHARD G, IENG S H, et al. Neuromorphic event-based 3D pose estimation [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2016, 9:22.
- [21] MUEGGLER E, REBECQ H, GALLEGO G, et al. The event-camera dataset and simulator: event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2017, 36(2): 142-149.
- [22] MUEGGLER E, HUBER B, SCARAMUZZA D, et al. Event-based, 6-DOF pose tracking for high-speed maneuvers [C]. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2014.
- [23] COHEN G, AFSHAR S, SCHAIAK A V, et al. Event-based sensing for space situational awareness[C]. *Proceedings of the Advanced Maui Optical & Space Surveillance*, 2017.
- [24] CHEUNG B, RUTTEN M, DAVEY S, et al. Probabilistic multi hypothesis tracker for an event based sensor[C]. *2018 International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2018.
- [25] CHIN T J, BAGCHI S, ERIKSSON A, et al. Star tracking using an event camera [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2019.
- [26] BAGCHI S, CHIN T J, SOC I C. Event-based star tracking via multiresolution progressive hough transforms[C]. *2020 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 2020.
- [27] LAN Chaozhen. Modeling and detecting capability analysis of space-based space object optical observation system [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009.
蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- [28] LICHTSTEINER P, POSCH C, DELBRUCK T. A 128×128 120 dB 15 μ s latency asynchronous temporal contrast vision sensor[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, 43(2): 566-576.
- [29] WANG S C H, PLONUS M A. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1979, 69(9): 1297-304.
- [30] RAO Ruizhong. Light propagation in the turbulent atmosphere[M]. 2005.

饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 2005.

- [31] FEN Yang. Research on event stream processing method of dynamic vision sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.

冯阳. 动态视觉传感器事件流处理方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.

Analysis of Detection Capability of Space Target Based on Event Camera

LV Yuanyuan^{1,2,3}, LIU Zhaohui^{1,3}, QIAO Wenlong^{1,2,3}, ZHOU Liang^{1,3}, SUN Xiaoxiao^{1,2,3},
CHEN Peiquan^{1,2,3}, LI Wenkai^{1,2,3}, ZHANG Haiyang^{1,2,3}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

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

(3 Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an 710119, China)

Abstract: Event cameras are increasingly popular in the field of artificial vision systems as a new type of biological vision sensor. Different from traditional detectors, which capture images at a fixed rate, event cameras are inspired by biological retinas and respond asynchronously and independently to changes in the brightness of each pixel in the scene. The pixel unit independently detects the change range of the logarithmic value of the light intensity. When it exceeds the preset threshold, the pixel unit is activated and reads out the relevant information of this activation through an external unit, generally including the position of the pixel, activation time, polarity, and other information. When read out, these information are packaged into a data packet, which is called an "event". After the event is output, the photosensitive pixel unit will return to the inactive state and re-monitor the changes in the outside light intensity. This working principle makes event cameras offer attractive properties compared to traditional cameras: large dynamic range (140 dB vs. 60 dB), high temporal resolution (in the order of μs), low latency, low power consumption, and high pixel bandwidth (in the order of kHz) resulting in reduced motion blur. Hence, Event cameras are widely used in spatial vision problems such as pose estimation, 3D reconstruction, and SLAM. With the development of the event camera, it has been gradually applied in the field of space target detection, and has shown great potential. Event cameras provide a new solution for monitoring satellites and stars for space situational awareness. However, there are few research on space situational awareness based on event cameras. Aiming at the problem of space target detection based on event cameras, we clarify the mechanism of event camera for space target observation, and systematically analyze the influencing factors that affect the detection sensitivity of space target based on event camera. Apart from theoretical analysis, we also build a detection sensitivity model of space target based on event cameras. As described by the proposed sensitivity model, the optical system parameters of the observation system, such as the clear aperture of the observation optical system, the diameter of the dispersion spot caused by the optical system, the transmittance of the optical system, the photoelectric conversion capability of the camera, and the atmospheric turbulence, determine the limit observation capability of the system. As the threshold of the event camera increases, the detection sensitivity of the system (characterized by limit magnitude) decreases linearly. Besides, we performed field experiments with telescopes using the CMOS camera and event camera. First, we conducted an experiment to observe the planetary based on the event camera. The observation results show that the event camera can be applied to space target observation. Compared with the traditional CMOS camera, the event camera has a lower spatial resolution, but the characteristics of its low bandwidth communication, low weight, low power, and high speed make it fully meet the harsh requirements of sensors in the aerospace field, and have great application prospects in space target monitoring. In order to explore the impact of the event camera threshold setting on the detection results, we observed Polaris at different thresholds, and the results show that the low threshold makes the signal in the image more obvious but more noise events. When the weak target is observed, the too-low threshold is easy to cause the indistinguishability of noise events and signal events. When the threshold is raised, the detection sensitivity of the system decreases, and the signal is not obvious, which affects the

signal recognition. Therefore, when using the event camera for space target observation, the selection of the threshold value is extremely important, not only to ensure high detection sensitivity, but also to avoid the generation of a large number of noise events, which will affect the signal recognition. So establishing a sensitivity model of space target detection based on event camera can provide theoretical guidance for experiments. For the observation system we built, we selected five celestial objects that are easier to distinguish in the sky to calibrate the sensitivity model. The fitting results show good linearity with correlation coefficient greater than 0.95. After that, we chose three other celestial bodies to verify the model. The relative error was less than 3%, so the model we built is accurate. Event cameras are revolutionary sensors that offer many advantages over traditional, frame-based cameras. Their characteristics, such as low latency, low power, high speed and high dynamic range, make event cameras have a large potential for space target detection. In the meantime, many challenges remain ahead. By conducting theoretical analysis and experimental verification, this paper obtains the sensitivity model of space target detection based on event camera. We hope it can provide a few theoretical guidance for space target observation and other related research based on event camera.

Key words: Bio-inspired vision; Event camera; Space target observation; Sensitivity; Magnitude

OCIS Codes: 110.2960; 110.2970; 110.2990; 110.3055