

LEO 轨道危险碎片天基光学观测技术

赵思思, 阮宁娟, 庄绪霞

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 低轨危险空间碎片可对航天器造成灾难性损伤, 对空间碎片的远程探测与识别是实施碎片规避和碎片清除任务的基础和前提。但由于该类目标信号微弱、运动速度快、光学特性存在时变和不确定性, 因此, 对其探测与识别提出了严重挑战。针对远距离危险空间碎片的实时监测、识别、碰撞预警、精确定轨的迫切需求, 为给天基载荷发展与设计提供支持, 总结了电荷耦合器件、雪崩光电二极管、位置读出光子计数探测器等器件的主要性能, 并对基于不同探测器的探测技术用于 LEO 轨道危险碎片天基光学观测的能力进行了比较分析。

关键词: 危险空间碎片; 天基光学观测; LEO 轨道

中图分类号: V447+.1; TN29 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)S-0163-05

Space-based optical observation technology of LEO hazard space debris

Zhao Sisi, Ruan Ningjuan, Zhuang Xuxia

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

Abstract: LEO hazard space debris can present catastrophic danger to operational spacecraft, and the detection of the space debris is the first and most important step in the process of collision avoidance and elimination. The object signal of these debris is faint. Besides, its optical character is uncertain and will change momentarily because of its high velocity and unknown attitude, all of which will bring serious challenge to the detection and identification. For fulfilling the demand of surveillance in real time, identification, collision alarm and accurate orbit ascertain, it needs to design and develop a space-based optical observation system. This article aims at providing a reference to this system, which summarizes the main characters of typical detectors, such as charge-coupled devices, avalanche photodiodes, position readout photon-counting detectors. The observation ability of space-based optical observation system based on these different detectors to LEO hazard space debris was analyzed.

Key words: hazard space debris; space-based optical observation; LEO

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家 863 计划(2015AA7046401)

作者简介: 赵思思(1985-), 女, 博士, 主要从事空间目标探测方面的研究。Email: ellan_627@163.com

0 引言

随着各国空间技术的发展,空间碎片数量逐年增多,这严重地威胁着在轨运行航天器的安全,它们和航天器的碰撞会造成航天器表面器件损伤,导致航天器系统故障,使航天器的轨道或姿态发生变化,甚至直接导致航天器解体。为了确保航天器的安全,两种较为有效的办法分别是:对空间碎片进行规避操作、对空间碎片进行清除。其中,对空间碎片的远程探测与识别是完成这两项任务的基础和前提。

国外已经形成了地基望远镜、地基雷达和天基光学为一体的监视网络。其中,美国空间监视网络(U.S. Space Surveillance Network)每天 400 000 次观测,已经能够探测、跟踪、编目 LEO 轨道 16 000 个尺寸大于 5~10 cm 的空间目标。然而,空间中还存在更多更小的碎片(1 mm~10 cm 预计有千万,<1 mm 预计有一万亿),其危害性更大,可对航天器造成灾难性损伤。

对于这类低轨空间碎片,目标尺寸小(0.1 mm~1 cm),运动速度快(平均相对运动速度 10 km/s,最大可以达到 14 km/s)、轨道特性无“先验”知识,这些特性导致其信号微弱、光学特性存在时变和不确定性,因此,对其探测与识别提出了更为严重的挑战。

文中简要回顾了儿种探测器技术,并对探测器主要性能进行了比较,在此基础上,对基于不同探测器的探测技术用于 LEO 轨道危险碎片天基光学观测的能力进行了比较分析。旨在为满足远距离危险空间碎片的实时监测、识别、碰撞预警、精确定轨的迫切需求提供载荷发展与设计依据。

1 探测器技术

1.1 电荷耦合器件 CCD

CCD 可以实现大规模阵列(通常为 2 K×2 K),且具有量子效率高的优点,因此通常被用作宇航器件^[1-2]。一幅图像累积在一个矩形像素阵列上,之后行转移时钟输出,下传至电子放大器。噪声不仅源于电子空穴对的泊松统计,还源于读出系统。其中,阵列的时钟输出越快,读出噪声越大。因此,当探测到在像素间快速移动的目标时,将产生矛盾。即:当读出速率慢时,目标光子将分布在大量像素上,在这些像素

上,光子需要与大量暗噪声抗争;当读出速率很快时,又会由读出电路引入大量噪声。

1.2 雪崩光电二极管 APD

对于雪崩光电二极管 APD,每一个独立像素可以对每一个光子事件进行雪崩放大,读出噪声可忽略,因此 APD 可以避免读出噪声的问题。在盖革模式下工作的 APD,可以获得亚毫秒的时间分辨率,在激光雷达领域具有较高的应用优势^[3-4]。光子在半导体硅中转换为电子空穴对,因此量子效率和 CCD 在同一水平。但是器件规模较小,只能达到 32 pixel×32 pixel,因此对宽视场监视的应用要求还很远。此处,文中的比较分析暂不给予考虑。

1.3 放大型 CCD

对于放大型 CCD,在电子到达输出放大器之前,采用上百级链路,使芯片上的信号得以放大,因此可以使电子读出噪声最小化^[5]。即使在高帧频(30 Hz)情况下,放大型 CCD 亦可以进行低噪声工作。此外,它还继承了 CCD 高量子效率的优点。放大型 CCD 通常的阵列规模为 1 k×1 k,尚不能达到传统 CCD 的规模。由于放大作用可以使信号远远高于电子读出噪声,剩余的读出噪声由放大链路的寄生电荷(每帧每个像素 $0.1 e^{-1}$)和暗计数(-30°C 时,每秒每帧 $1 e^{-1}$)决定。

放大型 CCD 可以工作在光子计数模式,但是最大计数率比像素读出速率低三个数量级。对于一个规模 2 K×2 K 的读出 10 Hz 的探测器,最大计数率为 $1.2\times 10^6/\text{s}$ 。

1.4 位置读出光子计数探测器

对于光电探测器,有很多技术可以实现位置读出。典型的,半透明的光电阴极产生的光电子被微通道板放大形成电子云。电子云具有光电子的时间和位置信息。由于微通道板中具有高增益,读出电路中不会产生由噪声导致的错误信息。光阴极产生的热辐射会产生暗事件。这对于红外敏感光阴极是非常重要的,但是可以采用制冷技术使热辐射最小化。有很多的位置敏感方案。对于光子计数成像,读出结构包含了多阳极微通道阵列、楔条形阳极等,这些结构测量的是随位置变化的读出端电荷。典型的简化读出结构使用了正交延迟线端点时差。

这种光子计数型探测器的时间标记功能为亚毫秒量级精度、器件规模提升潜力高,而且读出很

快。对于一个远距离微弱光成像探测器 (Remote Ultralow Light Imaging, RULLI), 光子计数率可以达到 $1\sim 2\times 10^6/s$, 理想情况下可以达到 $10^7/s$ 。

与 CCD 不同, 该类光子计数探测器的量子效率与光阴极有关。传统的阴极效率只有百分几十, 还有一部分损耗是因为电子未能耦合进入到微通道板。目前的技术得到一定改善, 如三代产品, 量子效率可以做到 50%。

光子计数探测器的时间分辨能力可以靠软件补偿来进一步提升。因此可以用于探测快速运动的空间碎片和地面星光现象。

2 探测器性能比较

在星空背景下, 探测微弱、快速移动目标, 目前没有哪个探测器是十全十美的。下面挑选几个典型因素进行比较分析, 如表 1 所示。

表 1 探测器性能比较

Tab.1 Comparison of detectors performance

Detector	RULLI	Gen III RULLI	1-MHz CCD	0.1-MHz CCD	Amplified CCD
Size	2 K×2 K	2 K×2 K	2 K×2 K	2 K×2 K	2 K×2 K
Maximal counting rate	10^7 Hz	10^7 Hz	Unlimited	Unlimited	Unlimited
QE	11%	42%	85%	85%	85%
Charge transition time	N/A	N/A	1 s	10 s	0.1 s
Readout noise	0	0	$6e^-$	$3e^-$	$\sqrt{2} e^-$

2.1 量子效率

对于薄型背照式 CCD, 假设其具有标准量子效率, 在 400~650 nm 时为 75%, 理想情况下可以达到 85%。对于 RULLI 探测器, 考虑 Los Alamos 实验室产品的平均测量值, 400 nm 时为 11%, 其量子效率较低的原因是 S-20 光电阴极的光学效率较低, 以及只有 50% 的光电子有效耦合进 MCP。三代 RULLI 量子效率有较大提升, 可以达到 40% 以上。

2.2 器件规模

这里假设所有探测器具有相同的 2 K×2 K 规模。对于 CCD 探测器, 这是物理像素数值。对于非像素型的 RULLI 探测器, 2 K 是探测器光敏面和探测

器分辨率的比值。2 K×2 K 规模的 CCD 探测器已经很成熟, 对于 RULLI 探测器和放大器 CCD 探测器预计很快也会有相应 2 K×2 K 时规模产品。此处假设 CCD 有四个读出端, 每一个放大器对应 1 K×1 K 区域。

2.3 读出噪声和放大噪声

传统的 CCD 电子噪声是像素读出速率的函数, 读出速率越快, 噪声越大。当读出速率从 20 kHz 增加到 1 MHz, 每个像素典型的 rms 读出噪声从 2~4 个增加到 5~10 个。这里假设 1 MHz 时噪声为 $6e^-$, 100 kHz 时为 $3e^-$ 。

对于放大型 CCD 探测器, 在设置增益放大链路, 使得器件能够为信号提供足够的增益, 进而在测量单个像素时忽略读出噪声。即使在 10^7 Hz 高读出速率条件下, 读出噪声也不是重要因素。相反, 噪声主要由像素的暗电流 (假设 $1e^-/s/pixel$) 和寄生电荷 ($0.1e^-/pixel$) 控制。对于 2 K×2 K 阵列、四个读出端工作在 10 MHz 下, 电荷转移时间为 100 ms。在这种情况下, 暗电流和寄生电荷共 0.2 个电子。由于具有低增益放大级, 探测器信号噪声 (每个像素的噪声电荷) rms 增加为 $\sqrt{2}$ 倍。对于 N 个电子信号, 标准差为 $\sqrt{0.2}$ 。如果工作在光子计模式, 不用考虑上述问题。但是对于 10^7 Hz 的情况, 为了避免时间累积, 最大事件率为 300 kHz, 这比 RULLI 光子计数器差很多。为了简化, 此处仅考虑放大型 CCD 工作在成像模式。

对于光子成像增强器 RULLI, 在电子电路放大前有足够多的增益, 因此读出噪声中的随机偏移不会产生错误事件。由光阴极产生的电子的噪声事件是由光子和热辐射造成的, 热可以采用冷却技术消除。因此, 与背景相比, RULLI 器件的噪声可以忽略不计。

2.4 最大计数率

此处考虑深空背景。对于传统 CCD 探测器, 计数率不会超过满井水平。对于放大因子为 1 000 的放大型 CCD, 不会超过放大器最后一级井容量。对于光子计数型 RULLI 探测器, 会产生饱和, 最新技术的最大事件计数率可以达到 10^7 Hz。

3 基于不同探测器的探测能力比较分析

考虑一个 20 cm 口径的望远镜, 望远镜光学透

过率为 80%, 观测谱段为 0.45~0.9 μm , 目标的漫反射系数为 15%, 探测距离为 1 000 km, 目标的横向运动速度为 3 km/s, 角速度为 3 mrad/s, 探测器规模为 2 000×2 000, 假设单个像素对应 20 μrad , 设穿过最大像元数为 200 pixel/s(考虑 sqrt(2))。

3.1 光子计数型

对于 RULLI 光子计数型探测, 信号光子数计算方法如下。对于与探测系统距离为 D 的目标, 当目标穿过视场时, 探测器在视场内探测到的目标反射平均光子数为:

$$N = \frac{F_s r}{8v} \cdot \sqrt{\frac{\eta C_M}{f_0}} \cdot \frac{D}{H} \cdot a^2 \quad (1)$$

式中: 太阳光子流密度 $F_s = 2 \times 10^{17}$ phot/cm²/s; r 为目标反射率; v 为目标相对速度; η 为光子探测效率; C_M 为最大计数率, 背景光密度 $f_0 = 6.1 \times 10^8$ phot/cm²/s/sr; H 为探测距离, D 为光学系统口径; a 为目标尺寸。

对于随机光子流, 探测到 k 个光子的概率服从泊松分布:

$$p_k(N) = \frac{N^k \exp(-N)}{K!} \quad (2)$$

为了实现可靠目标探测, 在到达探测器像面不同平均光子数下, 至少需要探测 M 个光子的探测概率为:

$$g_M(N) = \sum_{i=M}^{\infty} p_i(N) = 1 - \sum_{j=0}^{M-1} p_j(N) \quad (3)$$

考虑探测器的灵敏度为 3 个光子, 为了保证 90% 的探测概率, 根据公式(3)可以计算得到可探测的最小目标。

3.2 CCD 型

对于传统的 CCD 探测, 经过光学系统后的信号光子数为:

$$n_{\text{phot}} = E_m \cdot A \cdot \lambda / (h \cdot c) \quad (4)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为探测谱段中心波长; A 为光学系统入瞳面积; $E_m = 1.78 \times 10^{-8} \times 10^{-0.4m_{\text{obj}}}$; m_{obj} 为目标可视星等。

探测能力一般用信噪比来衡量, 信噪比公式可以表示为^[6-8]:

$$SNR = \frac{N^{\text{el}}}{\sqrt{N^{\text{el}} + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{readout}}^2 + \sigma_{\text{circ}}^2 + \sigma_{\text{bn}}^2}} \quad (5)$$

式中: N^{el} 为信号电子数; σ_{dark} 为探测器暗电流噪声; σ_{readout} 为读出噪声; σ_{circ} 为电路噪声; σ_{bn} 为背景噪声。信号电子数 $N^{\text{el}} = QE \cdot n_{\text{phot}} \cdot t$, 其中, QE 为探测器量子效率; t 为驻留时间。

当单像素读出速率为 1 MHz 时, 在 10 s 曝光时间内收集 10 帧图像, 每帧图像的每个像素得到的背景噪声为 0.5 个; 当单像素读出速率为 0.1 MHz, 10 s 曝光时间内仅收集 1 帧图像, 背景噪声数为 5。

对于传统 CCD 探测体制, 为了能够对目标进行识别和检测, 点目标探测相机的信噪比应该大于 5, 探测概率为 95%^[9], 并据此研究上述情况下可探测最小目标。

3.3 探测能力计算与分析

根据上述信号光子数、信噪比与探测概率的关系, 采用第 2、3 节的参数, 为保证 90% 以上的探测概率, 得到基于不同探测器的探测体制最小可探测目标如表 2 所示。

表 2 探测能力分析

Tab.2 Analysis of detection ability

Detect technology	Based on RULLI	Based on Gen III RULLI	Based on 1-MHz CCD	Based on 0.1-MHz CCD	Based on Amplified CCD
Minimum object size/cm	1.5	1	18	16	3

可以看出, 光子计数型探测器和放大型 CCD 探测器在探测微弱动目标方面具有较大优势。此外, 对于光子计数型探测器, 尽管量子效率和计数率较低, 但电荷转移时间短, 可用于探测高速运动目标; 对于放大型 CCD 探测器, 电荷转移时间较长, 但由于具有较高的量子效率和较低的读出噪声, 因此对于探测速度适中的微弱目标方面, 具有一定优势。

4 结论

针对远距离危险空间碎片的实时监控、识别、碰撞预警、精确定轨的迫切需求, 为给天基载荷发展与设计提供支持, 文中分析了不同探测器技术并对探测器性能进行比较, 在此基础上, 对基于不同探测器的探测能力比较分析。结果表明, 位置读出光子计数型探测器在探测微弱高速运动目标方面, 具有明显优势。下一步工作将对 LEO 轨道危险碎片天基光学观测技术的理论分析结果加以实验验证。

参考文献:

- [1] Janesick J. Scientific charge coupled devices[C]//SPIE, 2001:

- 2083-2100.
- [2] Wang Yan, Li Tao. Engineering Realization of CCD substrate bounce protection [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(2): 54-59. (in Chinese)
王衍, 李涛. CCD 衬底反弹防护的工程实现 [J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(2): 54-59.
- [3] Albota M A, Aull B F, Fouche D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. *Lincoln Lab J*, 2002, 13:351-370.
- [4] Xu Chunxiao, Zhou Feng. Development and applications of space-borne laser remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30 (4): 26-31. (in Chinese)
许春晓, 周峰. 星载激光遥感技术的发展及应用 [J]. *航天返回与遥感*, 2009, 30(4): 26-31.
- [5] Gong Dezhu, Wang Li, Lu Xin. Detection of faint light EMCCD based on star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36: 534-539. (in Chinese)
龚德铸, 王立, 卢欣. 微光探测 EMCCD 在高灵敏度星敏感器中的应用初探[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36: 534-539.
- [6] Krutz U, Kuhrt E, Mottola S, et al. Radiometric considerations for the detection of space debris with an optical sensor in LEO as a secondary goal of the Asteroid Finder mission [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69: 297-306.
- [7] Zhang Jihua, Fan Ruyun, Zhao Ning, et al. Electro-optic system detection ability to space-object in strong background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (1): 212-216. (in Chinese).
张己化, 范如玉, 赵宁, 等. 强背景下光电系统空间目标探测能力[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 212-216.
- [8] Meng Qingyu, Zhang Wei, Long Funian. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 2079-2084. (in Chinese).
孟庆宇, 张伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. *红外与激光工程*. 2012, 41(8): 2079-2084.
- [9] Li Yanjie, Jin Guang, Zhong Xing. Modeling and simulation of visible light scattering properties of spatial object using STK [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33(2): 188-193.