

文章编号:1001-5078(2025)04-0483-08

· 综述与评论 ·

空间红外望远镜信号采样技术研究与分析

王 华, 尤鑫川, 贺强民
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要:首先对空间红外望远镜系统噪声和读出模式进行分析,然后对相关双采样、佛勒采样、斜坡采样、多次累积采样四种空间红外望远镜信号采样技术的原理进行介绍,在此基础上对四种采样技术在探测器读出模式、噪声抑制、数据量、宇宙射线干扰识别四个方面的优缺点进行对比分析,最后给出国外空间红外望远镜信号采样技术的选取策略,期望为我国空间红外望远镜的研制提供参考和借鉴。

关键词:空间红外望远镜;噪声;宇宙射线;信号采样

中图分类号:TH745;V447 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.001

Research and analysis of signal sampling techniques for space infrared telescope

WANG Hua, YOU Xin-chuan, HE Qiang-min
(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract:In this paper, the noise and readout modes of space infrared telescopes are analyzed first. Then, the principles of four signal sampling techniques are introduced respectively: C correlated double sampling, Fowler sampling, slope sampling, and multiple accumulation sampling. On this basis, the advantages and disadvantages of four signal sampling techniques are compared and analyzed in four aspects, such as detector readout mode, noise reduction, data volume, and cosmic ray detection. Finally, the selection strategy of foreign space infrared telescope signal sampling technology is given, which is expected to serve as a reference for the development of China's space infrared telescope.

Keywords:space infrared telescope; noise; cosmic rays; signal sampling

1 引 言

空间红外望远镜是人类研究探索宇宙的重要科学仪器。相比对地观测相机,空间红外望远镜的探测距离远、目标弱,对探测系统的灵敏度要求极高。采用何种读出机制和采样技术实现探测系统的低噪声设计,一直是空间红外天文观测领域的研究热点。国外自20世纪80年代即开始了空间红外望远镜的研制,并同步开始了对红外望远镜信号采样技术的研究^[1-2],而我国空间红外望远镜的研制还处于起步阶段,也未见关于空间红外望远镜采样技术的文献报道。本文通过对国外典型空间红外望远镜的信

号采样技术进行研究,分析空间红外望远镜的系统噪声和工作模式,介绍四种空间红外望远镜信号采样技术的原理,并对四种信号采样技术进行对比分析,给出采样技术选取策略,为我国空间红外望远镜的研制提供技术参考。

2 空间红外望远镜噪声分析

空间红外望远镜的噪声主要包括背景辐射噪声、红外探测器噪声和后续处理电路噪声。红外探测器噪声主要包括光子噪声、读出噪声和暗电流噪声。在空间红外望远镜中,通常通过低温光学系统抑制背景辐射噪声;通过对红外探测器进行深低温

制冷或采用低暗电流红外探测器,降低暗电流噪声^[3]。本文主要以光子噪声和探测器读出噪声为主要噪声对信号采样技术进行研究。

光子噪声是每一瞬时到达探测器的光子数有起伏而产生的光子起伏噪声。由于光子群符合玻色-爱因斯坦统计,可以用泊松分布描述,所以若光子数为 S ,则光子数的标准差即光子噪声为 $\sqrt{S}$ 。光子噪声是探测器的极限噪声,探测目标或背景越强,光通量越大,光子噪声也越大^[4]。

探测器的读出噪声是读出电路的一种基本属性,读出噪声中最重要的一项是积分电容的 kTC 噪声,又称为复位噪声。这是在积分电容进行复位过程中引入的。在每一个探测器像元开始积分光电荷前,积分电容都要复位到一个初始电压(即复位电压)。由于电容上电子的数目遵循热力学分布规律,每次复位的电压值并不精准相同,而是存在一定的起伏,这种起伏就是复位噪声^[3]。探测器读出噪声除了包括积分电容产生的复位噪声,还包括读出电路场效应管、前置放大器、缓冲放大器等电路产生的白噪声和 $1/f$ 噪声以及由外部偏置、时钟引入的噪声。其中 $1/f$ 噪声以及由外部偏置、时钟引入的噪声主要通过参考像元校正进行抑制^[5],本文不赘述。

此外,由于空间红外望远镜积分时间较长,多为

秒级或分钟级,除了以上探测器固有噪声外,其在轨运行时,还易受到宇宙射线的干扰。受宇宙射线的影响程度与望远镜运行轨道的宇宙射线粒子流量、探测器光敏区面积和积分时间有关。据统计,哈勃望远镜每次 2000 s 的积分过程,约有 10 % 的像元被宇宙射线击中^[6];詹姆斯韦伯望远镜中的近红外相机,每次 1000 s 的积分过程,约有 25 % 的像元会被宇宙射线击中^[7]。在积分过程中,当宇宙射线打到红外探测器的感光面上,会在探测器的光导层激发出电荷,进而在探测器输出端产生额外的输出信号,这个信号会占有一个或多个像元,严重影响望远镜的探测效果。因此需要通过信号采样技术和数据处理技术在成像数据中对其进行识别和剔除^[8-9]。

3 空间红外望远镜探测器读出模式

对地观测红外相机的积分时间多为微妙和毫秒级,其红外探测器的读出模式有两种:ITR(先积分后读出)和 IWR(边积分边读出),如图 1 和图 2 所示,图中 INT 为积分信号,Out signal 为探测器读出信号。ITR 的工作时序为复位、积分、读出当前帧信号,IWR 的工作时序为在第 N 帧复位、积分时,读出第 $N-1$ 帧的信号,两种读出方式虽然工作时序不同,但均是在读出完一帧信号,开始下一帧积分前,对积分电容进行复位,这种读出方式为破坏性读出。

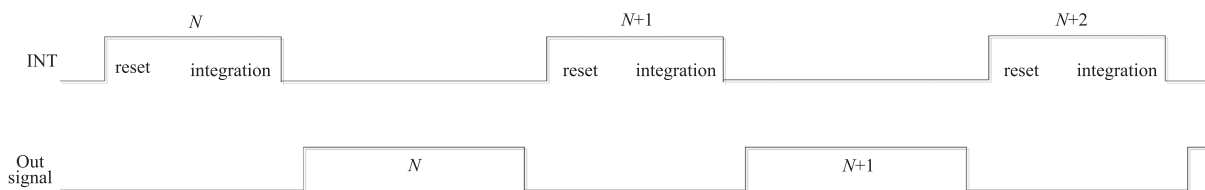


图 1 ITR 工作时序

Fig. 1 ITR timing diagram

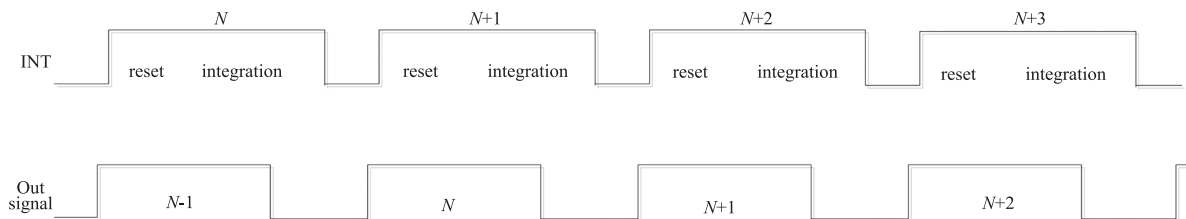


图 2 IWR 工作时序

Fig. 2 IWR timing diagram

空间红外望远镜的观测目标极其微弱,其积分时间多为秒级甚至分钟级,其采用不同于对地观测相机的探测器读出方式,工作时序如图 3 所示。积分信号上升沿开始复位,读出复位帧,复位结束后,开始长时

间的积分,在积分过程中边积分边读出多帧探测器信号,即读出每帧信号后并不对积分电容进行复位,而积分继续,这种读出方式为非破坏性读出^[4]。

空间红外望远镜这种非破坏性读出方式,对整

个积分过程中每个像素的信号值进行读出,使得每个积分周期可以得到一个探测器数据立方体,如图4所示,包含每个像素在探测器上的坐标信息和多

次读出的信号值。每次读出,即是对每个像素的积分信号进行一次采样,通过对数据立方体进行不同的采样和数据处理,降低空间红外望远镜系统噪声。

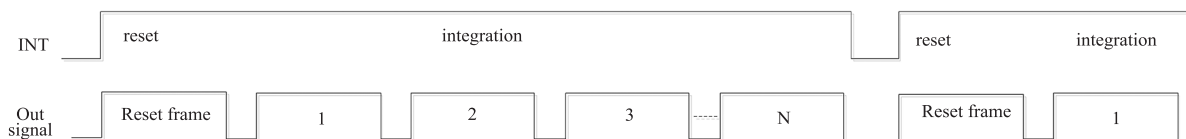


图3 非破坏性读出时序

Fig.3 Non-destructive readout timing diagram

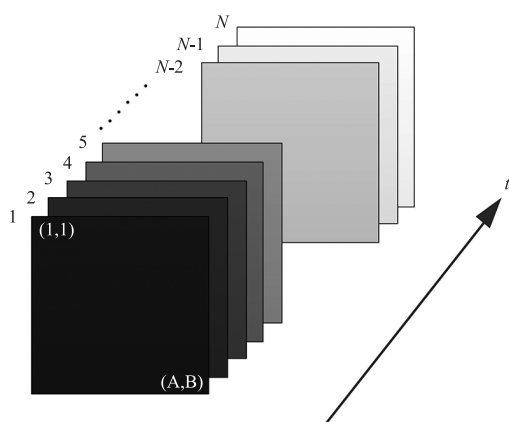


图4 非破坏性读出的数据立方体

Fig.4 Data cube of non-destructive readout

4 低噪声信号采样技术

4.1 相关双采样

由于探测器每次积分前的复位都会引入复位噪声,若在一个积分周期内的积分开始时刻 T_1 和积分结束时刻 T_N 分别读出一帧信号,即进行两次采样,两次采样的差值 $(S_N - S_1)$ 为本次积分该像元的有效信号,这样则可以消除由于复位不一致引入的复位噪声。这种在一个积分周期内分别进行两次采样的方法即为相关双采样。相关双采样的信号可以用式(1)表示:

$$S_{\text{CDS}} = S_N - S_1 \quad (1)$$

如果积分时间 T_{int} 比探测器的自相关时间常数 $R_D C_D$ 小得多 (R_D 为探测器的动态电阻, C_D 为探测器电容),则复位噪声在积分结束时刻 S_N 和积分开始时刻具有相关性,通过相关双采样就可以有效地消除或降低 kTC 复位噪声^[4]。而对于读出噪声中的白噪声成分,由于在任意时刻均不相关,所以相关双采样后白噪声会增加。

4.2 佛勒采样

相关双采样在一个积分周期内的开始时刻和结束时刻各采样一次, Fowler 等在相关双采样的基础

上提出一种多次相关双采样技术,又称作佛勒采样^[1]。具体为在复位后一个新的积分周期开始时,读出 N 帧信号,即进行 N 次采样,并对每个像元各自 N 次采样数据进行平均;到这个积分周期结束前,再读出 N 帧信号,并对每个像元各自 N 次采样数据进行平均;对每个像元的两个平均值做差,得到该像元信号值,佛勒采样的信号可以用式(2)表示。图6为佛勒采样示意图,图中 $N = 4$, t_f 为相邻两次采样间隔,即每帧的读出周期。佛勒采样可以将白噪声降低为相关双采样的 $\frac{1}{\sqrt{N}}$,且通过积分开始时刻和积分结束时刻 N 帧信号的平均值做差,可以降低复位噪声。

$$S_{\text{FOWLER}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i - \sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (2)$$

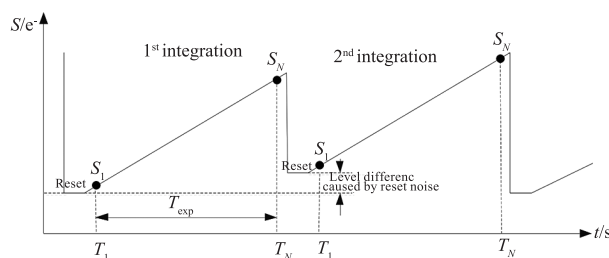


图5 相关双采样

Fig.5 Correlated double sampling

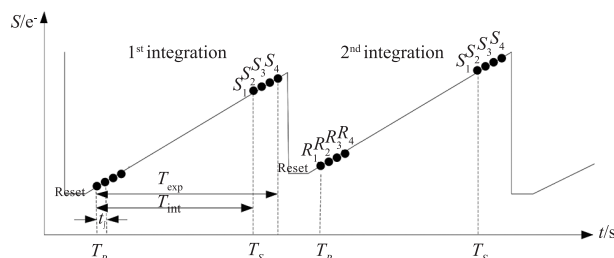


图6 佛勒采样

Fig.6 Fowler sampling

4.3 斜坡采样

在佛勒采样中,每个积分周期,仅在积分开始和积分结束前读出 N 次采样信号,积分周期中的中间

信号均不读出。Chapman 提出了在一个积分周期内等间隔读出信号的斜坡采样技术^[10],如图7所示。斜坡采样技术是在每个积分周期内,从积分开始到积分结束连续读出 N 帧信号,即进行 N 次采样,将每个像元的 N 次采样信号进行拟合,得到本次积分每个像元的积分斜率 K (即光子通量),对多个积分周期的斜率 K 进行统计计算,得到斜率的标准差 σ_K 。在斜坡采样中,积分斜率 K 与一次积分的信号大小 S 成正比 $S = K(N-1)t_f$, 信号噪声则为斜率的标准差乘以 $(N-1)t_f$, 即 $\sigma_s = \sigma_K(N-1)t_f$ 。斜坡采样通过对像素立方体中每个像素的输出信号按照普通最小二乘拟合或加权进行最小二乘拟合,得到统计的光子通量,然后根据光子通量得到该积分周期的积分信号,这不但可以降低复位噪声也可以降低白噪声。普通最小二乘拟合的积分斜率 K 用下式表示:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N S_i(i - \frac{N+1}{2})}{t_f \frac{N(N^2-1)}{12}} \quad (3)$$

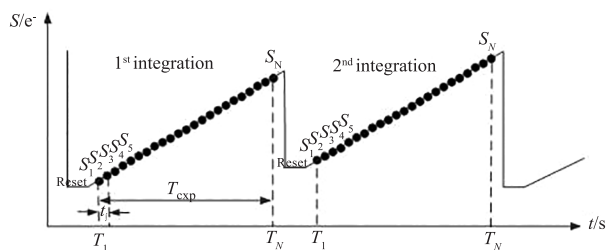


图7 斜坡采样

Fig. 7 Up the ramp sampling

4.4 多次累积采样

斜坡采样将一次积分周期内每次采样的数据直接输出,未对输出的数据做任何处理,数据量大。若将 N 次采样数据分为 n 组,每组内的 m 帧数据累加求平均作为该组的积分信号,则既可以使每组图像数据读出噪声中的白噪声成分降低 $\frac{1}{\sqrt{n}}$,同时也可以

降低空间望远镜的数据量,这样的采样方法为多次累积采样法^[11]。图8为多次累积采样算法的示意图,图中 $m=4, n=6$, 即每4帧数据平均后输出,一次积分得到6帧平均后的数据。在在轨处理资源受限或图像处理时间受限的应用中,通常每组 m 帧图像数据取前 m_f 帧求平均,后 d 帧图像数据不参与平均,也不下传地面,这里 $m = m_f + d$ 。对于最后一组直接积分 m_f 帧, $d=0$ 。图9为 $m_f=3, d=1, n=6$ 时多次累积采样示意图。

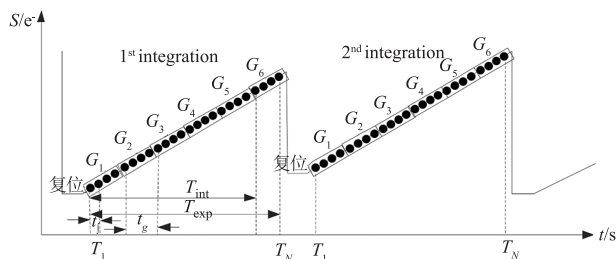


图8 多次累积采样

Fig. 8 Multi-accumulate sampling

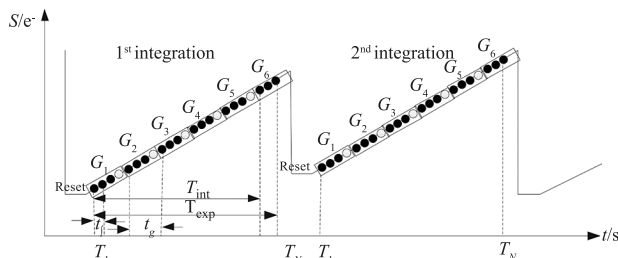


图9 丢帧的多次累积采样

Fig. 9 Multi-accumulate sampling with drop frames

多次累积采样一个积分周期内输出 n 帧图像数据, n 帧图像数据通过拟合得到每个像元的积分斜率,同样可以抑制宇宙射线干扰。

5 几种采样技术分析对比

5.1 探测器读出模式要求

由四种采样技术的工作原理可以看出,相关双采样技术在每次复位后的积分开始时刻和积分结束时刻分别对信号采样,并相减得到本次积分的信号值,探测器每次积分读出后直接复位准备开始下一次积分即可;而对于后三种采样技术,需要探测器一个积分周期内连续多次读出采样,且读出一帧信号不能破坏探测器积分。因此,相关双采样对探测器的读出方式无特殊要求,破坏性读出或非破坏性读出均可以,而佛勒采样、斜坡采样、多次累积采样均需要探测器设计为非破坏性读出方式。

5.2 噪声抑制

假设一个积分周期内多次采样的组数为 n , 每组内的参与平均的帧数为 m_f , 读出噪声为白噪声,多次累积采样后的总噪声方差可以用公式(4)表示^[12]。公式中第一项为读出噪声项, σ_{read} 为单次采样的读出噪声(单位 $e^- \cdot \text{rms}$);第二项为光子噪声项, f 为每个像素的光通量(单位为 $e^- \cdot s^- \cdot \text{pixel}^-$), t_g 为当前组第一帧与下一组第一帧之间的时间间隔, $(n-1)t_g f = T_{\text{int}} f$ 为 n 组采样的积分信号;第三项为考虑非破坏性读出时各组积分信号的相关性而引

入的协方差项,用于修正光子噪声项, t_f 为两次采样的间隔,即每帧读出周期。多次累积采样的时间示意图见图9。

$$\sigma^2 = \frac{12(n-1)}{nm_f(n+1)}\sigma_{\text{read}}^2 + \frac{6(n^2+1)}{5n(n+1)}(n-1)t_g \cdot f - \frac{2(m_f+1)(n-1)}{nm_f(n+1)}(m_f-1)t_g f \quad (4)$$

根据以上定义,相关双采样、佛勒采样和斜坡采样均为特殊的多次累积采样。在相关双采样中, $m_f = 1, n = 2$; 佛勒采样中, $m_f =$ 佛勒对数, $n = 2$; 斜坡采样中, $m_f = 1, n =$ 一个积分周期内的采样次数。因此四种采样技术的总噪声均可以由上式得到。下面按弱目标探测(读出噪声限)和强目标探测(光子噪声限)两种情况进行分析:

5.2.1 读出噪声限时

当光通量 f 小,目标和背景信号弱,读出噪声为系统主要噪声时,公式(4)可以简化为式:

$$\lim_{f \rightarrow 0} \sigma^2 = \frac{12(n-1)}{nm_f(n+1)}\sigma_{\text{read}}^2 \quad (5)$$

由式(5),相关双采样系统噪声为 $\sigma_{\text{CDS}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{read}}$;

佛勒采样系统噪声为 $\sigma_{\text{FOWLER}} = \sqrt{\frac{2}{m_f}}\sigma_{\text{read}} = \frac{\sigma_{\text{CDS}}}{\sqrt{m_f}}$,

佛勒采样对数 m_f 直接决定噪声抑制效果,佛勒采样后的系统噪声是相关双采样的 $\frac{1}{\sqrt{m_f}}$,当 $m_f \geq 3$ 时,

佛勒采样后的系统噪声低于单帧读出噪声;对于斜坡

采样 $N = n$,系统噪声为 $\sigma_{\text{UTR}} = \sqrt{\frac{12(n-1)}{n(n+1)}}\sigma_{\text{read}}$

$= \sqrt{\frac{6(n-1)}{n(n+1)}}\sigma_{\text{CDS}}$,当 $n > 3$ 时,斜坡采样的系统噪

声低于相关双采样的系统噪声 $\sigma_{\text{UTR}} < \sigma_{\text{CDS}}$,当 $n \geq 10$ 时,斜坡采样后的系统噪声低于单帧读出噪声 $\sigma_{\text{UTR}} < \sigma_{\text{read}}$,即当积分时间较短,一个积分周期内采样帧数小于 10 帧时,斜坡采样对读出噪声抑制无优势,当 $n \geq 10$ 时,对读出噪声抑制有效,且随 n 的增加,噪声抑制效果越好;多次累积采样噪声抑制效果依赖于每组参与累加平均的帧数 m_f 和采样组数 n ,当 $n \geq 3, m_f \geq 3$ 时,多次累积采样后的系统噪声低于单帧读出噪声 $\sigma_{\text{MACC}} < \sigma_{\text{read}}$,参与累加平均的帧数 m_f 和采样组数 n 越多,噪声抑制效果越好。

5.2.2 光子噪声限时

当光通量 f 大,目标和背景信号强,光子噪声为

系统主要噪声时,公式(4)可以简化为式(6):

$$\lim_{\sigma_{\text{read}} \rightarrow 0} \sigma^2 = \frac{6(n^2+1)}{5n(n+1)}(n-1)t_g f - \frac{2(m_f^2-1)(n-1)}{nm_f(n+1)}t_g f \quad (6)$$

由式(6),对于相关双采样技术 $t_g = T_{\text{int}}$,相关双采样总噪声 $\sigma_{\text{CDS}} = \sqrt{t_g f} = \sqrt{T_{\text{int}} f}$,即积分信号的光子噪声;

佛勒采样总噪声为 $\sigma_{\text{FOWLER}} = \sqrt{T_{\text{int}} f + t_g f(\frac{1}{3m_f} - \frac{m_f}{3})}$,

当 $m_f \geq 2$ 时,佛勒采样总噪声小于积分信号的光子

噪声;斜坡采样总噪声为 $\sigma_{\text{UTR}} = \sqrt{\frac{6(n^2+1)}{5n(n+1)}T_{\text{int}} f}$,

可以看出当 $n = 2, 3$ 时 $\sigma_{\text{UTR}} = \sqrt{T_{\text{int}} f}$,当 $n > 3$ 时

$\sigma_{\text{UTR}} > \sqrt{T_{\text{int}} f}$, n 越大,斜坡采样系统噪声逼近 1.095

倍的光子噪声;对于多次累积采样,总噪声依赖于每组参与累加平均的帧数 m_f 和采样组数 n 。

由以上分析可以看出,读出噪声限时,佛勒采样、斜坡采样以及多次累积采样的噪声抑制效果优于相关双采样技术。在光子噪声限时,相关双采样技术的系统噪声低于斜坡采样技术和多次累积采样技术的系统噪声,佛勒采样技术的噪声抑制效果优于相关双采样技术。无论读出噪声限还是光子噪声限,当采样组数 n 相等时,多次累积采样的系统噪声均低于斜坡采样的系统噪声。

5.3 数据量

相关双采样每个积分周期读出两帧数据,两帧数据做差后产生一帧数据,若将原始采样图像及处理后的图像均下传,则下传数据量为三帧数据。佛勒采样在积分开始和结束时刻分别读出 m_f 帧,在轨首先将两组数据分别累加,然后将两帧累加和做差求平均,若将原始采样图像(对于佛勒采样是 m_f 帧累加平均后的图像数据)及处理后的图像均下传,佛勒采样技术的下传数据量为三帧数据。斜坡采样对整个积分周期内的 N 次采样信号均读出,记录整个积分周期内每个像元积分电平的变化,若将所有像元数据下传地面处理,则需下传 N 帧图像数据;斜坡采样的在轨拟合处理,处理和存储的数据量取决于拟合方法;若在轨按普通最小二乘法拟合,根据公式(3)计算每个像元的积分斜率,需要计算 $S_i \cdot i$ 的累加和以及 S_i 的累加和,并将两帧累加和存储,根据公式计算出每个像元的积分斜率,将原始采样图像和积分斜率均下传,

需要下传 $N + 1$ 帧数据。多次累积采样的数据量取决于一个积分周期内的分组数 n 和每组的帧数 m , 对于相同的积分周期, 多次采样技术下传原始采样(对于多次累积采样是 m_f 帧累加平均后的图像数据)的数据量是斜坡采样的 $\frac{1}{m}$ 。

5.4 宇宙射线干扰识别与剔除

宇宙射线为偶发事件, 其打到探测器光敏面上时, 感光像元会产生额外的电荷, 使像元的输出信号会突然增大, 通过连续监测每个积分周期内每个像元的信号变化, 即可实现宇宙射线干扰的识别。图 10 为探测器受宇宙射线干扰示意图。

相关双采样和佛勒采样仅在积分周期的开始和结束前对像元信号进行采样, 无法连续监测每个积分周期内像元信号的变化, 因此无法识别宇宙射线干扰; 斜坡采样, 将整个积分周期内的所有像元信号进行读出, 可实现对每个像元积分信号进行连续监测, 通过两点差值法、拟合偏差法、Y 截距法对每个像元的积分斜率、相邻采样信号差值等参数进行判

断, 可以检测出异常像元并剔除^[6]; 多次累积采样当分组数 n 较大时, 对每组平均后的数据进行监测, 同样可以识别并剔除宇宙射线干扰。

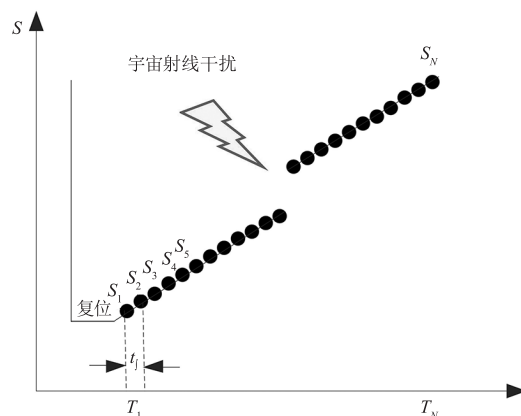


图 10 宇宙射线干扰

Fig. 10 Cosmic ray hits

表 1 给出了相关双采样技术、佛勒采样技术、斜坡采样技术、多次累积采样技术四种技术在对探测器读出模式要求、噪声抑制、数据量、宇宙射线干扰识别与剔除等四个方面的对比总结。

表 1 四种采样技术比较

Tab. 1 Contrast of four signal sampling techniques

采样技术	探测器读出模式要求	噪声抑制		数据量 (每个积分周期)		宇宙射线干扰识别与剔除
		读出噪声限	光子噪声限	下传(原始图像+处理后图像)	在轨处理	
相关双采样技术	非破坏性读出、破坏性读出均可	$\sqrt{2}\sigma_{\text{read}}$	$\sqrt{T_{\text{int}}f}$	3 帧	两帧相减, 存储一帧数据	无法识别
佛勒采样技术	非破坏性读出	$\sqrt{\frac{2}{m_f}}\sigma_{\text{read}}$	$\sqrt{T_{\text{int}}f + t_{\text{pf}}(\frac{1}{3m_f} - \frac{m_f}{3})}$	3 帧	两组 m_f 帧累加, 两帧累加和相减, 存储一帧累加和数据	无法识别
斜坡采样技术 ($n = N$)	非破坏性读出	$\sqrt{\frac{12(n-1)}{n(n+1)}}\sigma_{\text{read}}$	$\sqrt{\frac{6(n^2+1)}{5n(n+1)}T_{\text{int}}f}$	$N + 1$ 帧	根据公式(3), 需要进行 N 帧 $S_i \cdot i$ 累加和 N 帧 S_i 累加, 存储两帧累加和数据	可以识别与剔除
多次累积采样技术 ($n = \frac{N}{m}$)	非破坏性读出	$\sqrt{\frac{12(n-1)}{nm_f(n+1)}}\sigma_{\text{read}}$	$\sqrt{\frac{6(n^2+1)}{5n(n+1)}T_{\text{int}}f - \frac{2(m_f^2-1)(n-1)}{nm_f(n+1)}t_{\text{pf}}f}$	$\frac{N}{m} + 1$ 相同积分周期情况下, 下传原始图像数据量是斜坡采样的 $\frac{1}{m}$	若在轨按最小二乘拟合得到积分斜率, 则需要进行 n 帧 $G_i \cdot i$ 累加和 n 帧 G_i 累加, 存储两帧累加和数据	可以识别与剔除

通过对比可以看出, 在暗弱目标探测(读出噪声限)时, 积分时间长, 宇宙射线干扰大, 采用采样组数多的多次累积采样既可以识别与剔除宇宙射

线干扰, 又可以有效降低系统噪声; 在较强目标探测时, 积分时间较短, 但宇宙射线干扰仍不可忽略时, 可以采用斜坡采样技术, 既可以识别与剔除宇

宙射线干扰,又可以保持一定的信噪比;对于超强目标探测(光子噪声限),为避免像元饱和,积分时间短,宇宙射线干扰的影响可以忽略,则可以采用

相关双采样技术或佛勒采样技术,降低系统噪声。表2为国外典型空间红外望远镜采样技术的选用情况。

表2 国外典型空间红外望远镜采样技术

Tab.2 Adopted sampling technique of foreign space infrared telescope

项目	主要研制单位	采样技术	备注
詹姆斯韦伯空间望远镜近红外相机 NIR-Cam ^[13]	U. Arizona/ Lockheed Martin	DEEP8:多次累积采样,采样组数 $n \leq 20, m = 20, m_f = 8, d = 12$	在读出噪声限时获得高 SNR
		DEEP2:多次累积采样,采样组数 $n \leq 20, m = 20, m_f = 2, d = 18$	/
		MEDIUM8:多次累积采样,采样组数 $n \leq 10, m = 10, m_f = 8, d = 2$	在读出噪声限时获得高 SNR
		MEDIUM2:多次累积采样,采样组数 $n \leq 10, m = 10, m_f = 2, d = 8$	/
		SHALLOW4:多次累积采样,采样组数 $n \leq 10, m = 5, m_f = 4, d = 1$	在读出噪声限时获得高 SNR
		SHALLOW2:多次累积采样,采样组数 $n \leq 10, m = 5, m_f = 2, d = 3$	在读出噪声限时获得高 SNR
		BRIGHT2:多次累积采样,采样组数 $n \leq 10, m = 3, m_f = 2, d = 1$	在读出噪声限时获得高 SNR
		BRIGHT1:多次累积采样,采样组数 $n \leq 10, m = 3, m_f = 1, d = 2$	在读出噪声限时获得高 SNR
		RAPID:斜坡采样,采样组数 $n \leq 10, m = m_f = 1, d = 0$, 每帧均输出并存储	在读出噪声限时获得高 SNR
詹姆斯韦伯空间望远镜近红外光谱仪 NIR-Spec ^[14]	NASA/ESA	NRS:多次累积采样,最小采样组数是2,最大采样组数在像元未饱和且未达到最大积分时间1500 s的前提下,选择更多的组数, $m = m_f = 4, d = 0$	用于长积分时间弱目标的探测
		NRSRAPID:斜坡采样,最小采样组数是2,最大采样组数在像元未饱和且未达到最大积分时间1500 s的前提下,选择更多的组数, $m = m_f = 1, d = 0$	用于短积分时间强目标的探测,采样组数2时(即相关双采样)用于超强目标探测
		NRSIRS2:带有参考像元校正的多次累积采样,最小采样组数是2,最大采样组数在在像元未饱和且未达到最大积分时间1500 s的前提下,选择更多的组数, $m = m_f = 5, d = 0$	用于长积分时间弱目标的探测
		NRSIRS2RAPID:带有参考像元校正的斜坡采样,最小采样组数是2,最大采样组数在像元未饱和且未达到最大积分时间1500 s的前提下,选择更多的组数,带有参考像元校正的斜坡采样, $m = m_f = 1, d = 0$	用于短积分时间强目标的探测,采样组数2时(即相关双采样)用于超强目标探测
詹姆斯韦伯空间望远镜近红外成像仪 NIRISS ^[15]	CSA	NIS:多次累积采样, $n \leq 200, m = m_f = 4, d = 0$	用于长积分时间弱目标探测
		NISRAPID:斜坡采样, $n \leq 30, m = m_f = 1, d = 0$	用于短积分时间强目标探测
系外行星特征观测系统 ECHO ^[16-17]	ESA	斜坡采样和多次累积采样相结合	采样次数根据目标强弱确定 ^[17]
欧几里得空间望远镜近红外光谱光度仪 NISP ^[18-20]	ESA	MACC(15,16,11):多次累积采样, $n = 15, m = 27, m_f = 16, d = 11$	光谱测量模式
		MACC(15,16,13):多次累积采样, $n = 15, m = 29, m_f = 16, d = 13$	
		MACC(4,16,4):多次累积采样, $n = 4, m = 20, m_f = 16, d = 4$ MACC(2,16,D):佛勒采样, $n = 2, m_f = 16$	光度测量模式
大气遥感红外系外监测系统红外光谱仪 AIRS ^[21-22]	ESA	3.5 s~7 s的曝光周期内实现多次相关双采样	超强目标探测(0.1 s积分时间即饱和)
		3.5 s~7 s的曝光周期内实现多次斜坡采样	强目标探测
		3.5 s~7 s的曝光周期内实现单次斜坡采样(一次积分3.5 s~7 s)	弱目标探测

6 结 论

本文在对空间红外望远镜系统噪声和读出模式分析的基础上,对相关双采样技术、佛勒采样技术、斜坡采样技术和多次累积采样技术四种采样技术进

行了研究,并在探测器读出模式要求、噪声抑制、数据量及宇宙射线干扰抑制等四个方面对四种采样技术进行了分析对比,同时给出了国外典型空间红外望远镜的采样技术选取策略。可以看出,在暗弱目

标探测时,采用采样组数多的多次累积采样是最优选择,在进行较强目标探测时,斜坡采样技术是最优选择;在强目标、超强目标探测时,佛勒采样技术、相关双采样是最优选择。望远镜实际设计时,探测器需设计为非破坏性读出模式,然后根据观测目标光子流率(决定目标强弱)、数据传输带宽、运行轨道的宇宙射线粒子流量等多个因素综合评估不同观测任务的最优采样技术,通过软件实现采样模式和数据处理算法的切换,使系统信噪比达到最优。

此外,在探测器读出速率足够快、读出时间足够短的情况下,本文介绍的非破坏性读出模式和采样技术,同样可以应用与对地观测相机中,发挥其降低系统噪声、记录积分过程、可根据目标强弱动态选择采样次数以提高系统动态范围等优势。

参考文献:

- [1] Fowler A, Gatley I. Demonstration of an algorithm for read-noise reduction in infrared arrays[J]. *Astrophysical Journal*, 1990, 353: L33 – L34.
- [2] Fowler A M, Gatley I. Noise reduction strategy for hybrid IR focal-plane arrays[C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. San Diego: SPIE, 1991: 127 – 133.
- [3] Yang Chaowei, Zhao Peng, Huang Wei, et al. Research on high operating temperature p-on-n medium wave mercury cadmium telluride infrared focal plane device[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 2022, 51(12): 20220150. (in Chinese)
杨超伟,赵鹏,黄伟,等.高工作温度 p-on-n 中波碲镉汞红外焦平面器件研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(12): 2022, 51(12): 20220150.
- [4] Chen Boliang, Li Xiangyang. Space infrared imaging detector[M]. Beijing: Science Press, 2016: 96 – 100. (in Chinese)
陈伯良,李向阳.航天红外成像探测器[M].北京:科学出版社,2016:96 – 100.
- [5] Rauscher B J, Arendt R G, Fixsen D J. Improved reference sampling and subtraction: a technique for reducing the read noise of near-infrared detector systems[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2017, 129(980): 105003.
- [6] Anderson R E, Gordon K D. Optimal cosmic-ray detection for nondestructive read ramps[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2011, 123: 1237 – 1248.
- [7] Robberto M. NIRCAM optimal readout modes[R]. JWST-STScI-001721, 2009: 1 – 23.
- [8] Giardino G, Birkmann S, Robberto M, et al. The impact of cosmic rays on the sensitivity of JWST/NIRSpec[C]//*Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2019, 131: 1003.
- [9] Robberto M. A generalized least square algorithm to process infrared data taken in non-destructive readout mode[C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. Canada: SPIE, 2014.
- [10] Chapman R, Beard S, Mountain M, et al. Implementation of a charge integration system in a low background application[C]//*Proceedings of SPIE*, 1990: 34 – 42.
- [11] Rauscher B J, Fox O. Detectors for the James Webb Space Telescope Near-Infrared Spectrograph. I. readout mode, noise model, and calibration considerations[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, 119: 768 – 786.
- [12] Robberto M. Derivation of the correct noise equation for general MULTIACCUM readout [R]. JWST-STScI-001853, 2009, 1 – 13.
- [13] JWST Near infrared camera handbook[R]. <https://jwst-docs.stsci.edu>, 2022, 189 – 196.
- [14] JWST NIRSpec handbook[R]. <https://jwst-docs.stsci.edu>, 2020, 502 – 507.
- [15] JWST NIRISS handbook[R]. <https://jwst-docs.stsci.edu>, 2020, 101 – 106.
- [16] Adriani G, Bellucci L, Gambicorti M, et al. The visible and near infrared module of EChO[J]. *Experimental Astronomy*, 2015, 40(2/3): 753 – 769.
- [17] M Focardi, A M Di Giorgio. EChO payload electronics architecture and SW design[J]. *Experimental Astronomy*, 2015, 40: 813 – 839.
- [18] Kubik B, Barbier R, Chabanat E, et al. Optimization of the multiple sampling and signal extraction in nondestructive exposures[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instrument, and Systems*, 2015, 1(3): 038001.
- [19] Jimenez Munoz A, Macias-Perez J, Secroun A, et al. Euclid: estimation of the impact of correlated readout noise for flux measurements with the Euclid NISP instrument[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2021, 133: 094502.
- [20] Barbier R, Buton C, Clemens J-C, et al. Detector chain calibration strategy for the Euclid Flight IRH2RGs[C]//*Proceedings of SPIE*, Austin: SPIE, 2018: 10709.
- [21] Focardi M, Pace E, Farina M, et al. The ARIEL instrument control unit design; for the M4 mission selection review of the ESA's cosmic vision program[J]. *Experimental Astronomy*, 2018, 46(1): 1 – 30.
- [22] Amiaux J. ARIEL Infra-Red Spectrometer (AIRS)[R]. <https://www.cosmos.esa.int/>, 2020, 26.