

一种聚焦型X射线探测器在轨性能标定方法

周庆勇 魏子卿 姜坤 邓楼楼 刘思伟 姬剑锋 任红飞 王奕迪 马高峰

A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar

Zhou Qing-Yong Wei Zi-Qing Jiang Kun Deng Lou-Lou Liu Si-Wei Ji Jian-Feng Ren Hong-Fei Wang Yi-Di Ma Gao-Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 050701 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172352

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172352>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于空间应用的透射式微型微束调制X射线源](#)

Transmission-type miniature micro-beam modulated X-ray source based on space application

物理学报.2016, 65(14): 140703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140703>

[X射线通信系统的误码率分析](#)

Bit error rate analysis of X-ray communication system

物理学报.2015, 64(12): 120701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120701>

[一种设计环形汇聚光栅反射镜的新方法](#)

A new approach to designing circular grating focusing reflector

物理学报.2014, 63(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240702>

[用于空间X射线通信的栅极控制脉冲发射源研究](#)

Grid-controlled emission source for space X-ray communication

物理学报.2014, 63(16): 160701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.160701>

[锥束CT平板探测器成像的余晖建模与校正方法](#)

Image lag modeling and correction method for flat panel detector in cone-beam CT

物理学报.2013, 62(21): 210702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210702>

一种聚焦型 X 射线探测器在轨性能标定方法*

周庆勇^{1)2)3)†} 魏子卿²⁾³⁾ 姜坤⁴⁾ 邓楼楼⁵⁾ 刘思伟²⁾³⁾
姬剑锋²⁾³⁾ 任红飞²⁾³⁾ 王奕迪⁶⁾ 马高峰¹⁾

1)(信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450052)

2)(西安测绘研究所, 西安 710054)

3)(地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

4)(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

5)(北京控制工程研究所, 北京 100090)

6)(国防科技大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)

(2017年10月31日收到; 2017年12月11日收到修改稿)

X 射线探测器是 X 射线天文观测及脉冲星导航的核心器件, 受发射振动、高能粒子辐射损伤及元器件老化等影响, X 射线探测器空间观测性能会逐渐变化, X 射线探测器在轨标定有利于观测天体 X 射线辐射信息的准确获取及精确建模. 研究利用了脉冲星辐射能谱标定 X 射线探测器性能的方法, 能较好地消除探测器本底及空间环境噪声的影响, 通过处理脉冲星导航试验卫星 (XPNAV-1 卫星) 的 Crab 脉冲星观测数据, 评估了我国首款聚焦型 X 射线探测器的在轨性能. 计算结果表明, XPNAV-1 卫星上聚焦型 X 射线探测器的有效面积在 0.6—1.9 keV 能段内优于 2 cm^2 , 其中在 0.7 keV 能量处取得最大值 3.06 cm^2 , 探测效率约 10%; 有效面积随着探测能量增大而减小, 在 2—3.5 keV 能段内有效面积约为 1 cm^2 , 而大于 5 keV 能段的有效面积约为 0.1 cm^2 , 且此能段估计精度明显受光子统计误差影响. 同时研究了考虑能量响应矩阵的探测器有效面积标定新方法, 利用地面性能测试中五个特征能谱处的能量分辨率重构其能量响应矩阵, 重新标定了聚焦型 X 射线探测器有效面积, 发现该能量响应矩阵对结果影响较小. 最后建议观测某些超新星遗迹监测能量分辨率及能量线性等指标的变化.

关键词: 脉冲星导航试验卫星, X 射线脉冲星, 能量响应矩阵, 硅漂移型探测器

PACS: 07.85.Fv, 97.60.Gb

DOI: 10.7498/aps.67.20172352

1 引言

人类科学技术的发展, 促进空间探测手段多样和研究方法完善, 有效地拓展了人类对于宇宙和宇宙中天体的认识, X 射线天文学就是接收天体 X 射线辐射信息探索宇宙的一门学科^[1]. 国际上以研究宇宙大尺度结构的特性和早期宇宙、黑洞的形成和演化、太阳高能辐射机理为出发点, 开展大量的空间高能天文观测和科学研究^[2-4]. 此外, 利用

X 射线脉冲星的信号实现航天器自主定位和导航, 已成为当前国内外导航领域的一个研究热点^[5-8]. 自 20 世纪 60 年代以来, 约有上百台空间 X 射线天文望远镜发射升空, 现仍有 10 余个空间 X 射线观测卫星在轨运行^[1], 极大地拓展了人类对宇宙空间的认识. 随着我国科技实力及综合国力的增强, 近几年 X 射线空间科学及应用的发展也得到了重视. 2016 年 11 月 10 日, 我国发射了 XPNAV-1 卫星, 核心目的是在轨验证国产探测器性能和开展脉冲星导航空间试验^[9,10].

* 国家自然科学基金 (批准号: 41374003, 41304006, 41574013, 41374042) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zjlzqy1986@163.com

X射线探测器是空间X射线天文观测卫星的核心器件,其性能直接影响观测数据的可靠性及可用性. X射线探测器就是利用高能粒子通过光电效应、康普顿效应、电子对效应等将自身能量转换为可量测的信号,从而实现X射线光子的探测^[11]. X射线探测器主要包括准直型和聚焦型两种类型,准直型探测器通过有限视场来约束非目标源光子的入射,聚焦型X射线探测器通过聚焦光学系统将平行X射线光会聚于焦平面,可较好地减小空间背景噪声的影响^[12]. X射线探测器在地面标定之后,受发射冲击、空间电磁照射等影响,探测器性能可能会发生一些变化. 随着运行时间增加, X射线探测器内部元器件老化导致性能下降,如果按照之前模型参数处理,会使结果发生畸变,因此对X射线探测器进行定期标定. X射线探测器在轨标定通常选择亮且辐射稳定的X射线源作为观测目标,其中星系团和超新星遗迹的能谱相对稳定^[3],通常被用于X射线探测器标定^[13,14]. 蟹状星云脉冲星(PSR J0534+2200,也称Crab脉冲星)及其星云的X射线辐射流量强,且辐射信号具有明显的脉冲轮廓特征^[15,16],易于识别;其辐射能谱为幂律谱,且星云背景辐射稳定,故常作为X射线探测器在轨标定的观测源^[17].

Crab脉冲星诞生于公元1054年的一次超新星爆发,该次爆发被我国宋朝天文学家记录在《宋史·天文志》中,其自转周期约33.4 ms,距离约2 kpc ($1 \text{ kpc} = 3.08 \times 10^{19} \text{ m}$),辐射覆盖了射电、红外、可见光、X射线、 γ 射线能段^[8,18]. 自1970年来,许多X射线空间天文卫星对Crab脉冲星进行大量观测,如RXTE, Chandra, XMM-Newton等,得到了大量的Crab脉冲星辐射信息,测定了Crab脉冲星的X射线辐射能谱参数^[13,14],还对Crab脉冲星的自转、辐射特性等进行了详尽的研究^[19-21]. 国外主要的X射线空间卫星也选择强且稳定的星源(含星云)进行探测器有效面积的标定,并观测超新星遗迹来确定X射线探测器的能量分辨率,对能量线性进行标定^[14].

当前我国开展了多类型X射线探测器的研制,建设了专用的地面测试系统,开展了大量的试验,测试了原理样机或工程样机的各种性能参数^[22-26]. 由于XPNAV-1卫星搭载我国首款聚焦型X射线探测器^[10],国内暂无聚焦型X射线探测器性能在轨标定的文献. 针对XPNAV-1卫星空间

观测噪声大的问题,提出一种利用脉冲星的脉冲能谱进行探测器标定的方法,可以有效地消除本底的影响. 本文介绍了聚焦型X射线探测器的性能及在轨标定方法,研究了探测器有效面积标定的方法,利用我国XPNAV-1卫星的Crab脉冲星观测数据初步标定掠入射Wolter-I聚焦型X射线探测器的有效面积,并对结果进行充分的讨论.

2 聚焦型X射线探测器介绍

XPNAV-1卫星是我国致力于脉冲星导航空间试验验证的首颗卫星,于北京时间2016年11月10日在酒泉卫星发射中心发射成功. XPNAV-1卫星采用整星零动量三轴稳定姿态控制方式,运行在太阳同步轨道上,轨道半长轴为6878.137 km,倾角为 97.4° ^[10]. 卫星的主要载荷掠入射Wolter-I聚焦型X射线探测器(下文简称聚焦型X射线探测器)为我国在轨工作的首款该类型X射线探测器,由北京控制工程研究所研制. 聚焦型X射线探测器采用了四层嵌套的Wolter-I型聚焦光学镜头,可将平行的X射线光子聚焦到硅漂移探测器(SDD探测器)敏感元件上. 聚焦型X射线探测器主要包括Wolter-I光学系统、硅漂移室探测器件、电子线路、磁偏转器、高能粒子防护罩、机械结构和微型星敏七部分.

聚焦型X射线探测器的工作原理如图1所示. X射线光学特性决定了其很难通过折射的方式实现聚焦. 聚焦型X射线探测器采用Wolter-I型掠入射光学系统,基于掠入射和全反射原理将脉冲星辐射的X射线光子聚焦在较小面积探测器件上,具有高达上千倍的光学增益. 磁偏转器(MDS)能够使带电粒子发生偏转,屏蔽带电粒子的影响. SDD探测器采用平面工艺,在硅片两表面制造特殊结构的电极,在适当的偏压下使硅片处于完全耗尽状态,形成一个平行于上下两表面的均匀强电场. 当X射线光子作用于SDD探测器时,会产生电子-空穴对,空穴被就近的阴极电极吸收,电子在电场驱动下向探测器的阳极漂移. 阳极收集这些电子转换为电信号,并根据电信号幅值读出其能量,上升沿超过一定阈值会触发一个时刻,采用全球定位系统(GPS)秒脉冲和星载铷钟标记该时刻,记为光子的到达时刻. 聚焦型X射线探测器的主要性能指标如表1所示.

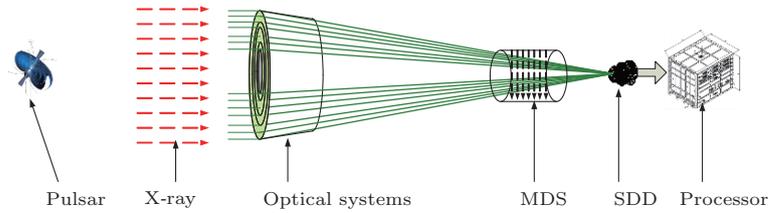


图1 聚焦型X射线探测器工作原理

Fig. 1. Work principle of the focusing X-ray detector.

表1 聚焦型X射线探测器主要性能指标
Table 1. Main performance parameters of the focusing X-ray detector.

Item	Index
Spectrum range	0.5—10 keV
Area	30 cm ²
Angle of field	2ω = 15'
Time resolution	< 1.5 μs
Energy resolution	< 200 eV@5.9 keV

XPNAV-1 卫星的主要观测目标之一为Crab 脉冲星, 以验证 X 射线探测器的性能. 卫星采用“九宫格”并配置微型星敏实现在轨粗搜索和精确定位, 基于整星自旋和主动控制技术实现脉冲星的实时跟踪, 指向控制精度优于 2' [9,10]. 掠入射 Wolter-I 聚焦型 X 射线探测器的光学系统安装在舱外, 镜头通过包覆和加热片进行热控, 其余部分置于舱内, 电子线路采用内部制冷和外部涂导热脂进行控制, 确保硅漂移室探测器件工作在较好的状态. 高能粒子挡板组件在载荷进入南大西洋电磁异常区 (SAA 区) 和强辐射带时关闭, 避免高能粒子对探测器件的损伤. 结合卫星轨道、南大西洋异常区等观测约束条件, 每次 Crab 脉冲星观测时间长度约为 50 min [9,10].

3 X 射线探测器性能在轨标定方法

聚焦型 X 射线探测器性能标定方法如图 2 所示. 对于脉冲星的信号, X 射线探测器主要记录光

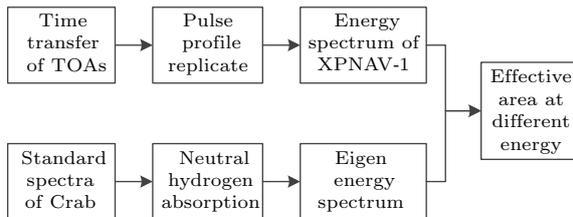


图2 X 射线探测器性能标定流程图

Fig. 2. Flow chart of X-ray detector performance calibration.

子到达时间 (TOA) 和能量信息, 需要通过这些信息重构脉冲星的观测脉冲轮廓, 并获取观测能谱. 结合脉冲星辐射模型及宇宙中性氢吸收系数, 分析 X 射线探测器各能段的性能.

3.1 X 射线探测器空间观测数据处理方法

为了恢复出稳定的周期性脉冲轮廓, 需要将探测器光子到达时刻转换至太阳系质心处 (SSB) 真空到达时刻 (也有文献称质心瞬时). 此外, 真实记录的光子到达时间由航天器携带的时钟进行测量, 时间为固有时间, 需转换成质心坐标时 (TCB), 故 X 射线光 TOA 转换需考虑真空几何传播时延、太阳系天体引力时延及时间尺度转换等效应 [27], 然后基于质心处光子 TOA 和能量分别恢复出脉冲星观测轮廓和能谱.

3.1.1 光子 TOA 的转换

对于太阳系外脉冲星观测事件的处理, 光子 TOA 转换公式如下 [28]:

$$\begin{aligned}
 t_n - t_{nSSB} &= -\frac{1}{c} \mathbf{k} \cdot \mathbf{b}_n + \frac{1}{2cB_n} |\mathbf{k} \times \mathbf{b}_n|^2 \\
 &\quad - 2 \frac{GM_\odot}{c^3} \ln(\mathbf{k} \cdot \mathbf{s}_{n\odot} + s_{n\odot}), \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 t_n 为探测器接收到第 n 个光子的时刻, t_{nSSB} 为光子在 SSB 处真空到达时刻, \mathbf{b}_n 为观测者的瞬时质心坐标, c 为光速, G 为万有引力常数, M_\odot 为太阳的质量, $\mathbf{s}_{n\odot}$ 为观测者的日心坐标, \mathbf{k} 为脉冲星的质心方向矢量. 等号右边第一项为真空几何传播时延, 第二项为视差效应, 第三项为太阳系内引力时延 [28]. (1) 式中光子到达时间 t 为太阳系质心坐标时, 故需要将航天器记录的光子到达原时转换成质心坐标时. 然而, 在实际卫星工程中, 航天器的时间系统由全球导航定位系统 (GNSS) 或地面测控进行校正, 其时间尺度一般不采用星载时钟记录的固有时. XPNAV-1 卫星的时间系统采用协调世界时 (UTC), 因此只需要将 UTC 时间转换到 TCB 时间

即可. UTC 到 TCB 的转换步骤如下: 1) 根据调秒数将 UTC 转换为国际原子时 (TAI), 将 TAI 转换为地球时 TT ($TT = TAI + 32.184 \text{ s}$); 2) 将 TT 转换为地心坐标时 TCG,

$$\begin{aligned} & TCG - TT \\ &= \left(\frac{L_G}{1 - L_G} \right) \times (JD_{TT} - T_0) \times 86400 \text{ s}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中 JD_{TT} 为 TT 儒略日, $T_0 = 2443144.5003725$ 为 1977 年 1 月 1 日 0 时 TAI 时刻, $L_G \equiv 6.969290134 \times 10^{-10}$; 3) 地球时 TCG 需转换为太阳系质心坐标时 TCB, 依据 IERS 2010 公报, 两者转换关系如下 [27]:

$$\begin{aligned} & TCB - TCG \\ &= c^{-2} \left\{ \int_{t_0}^t \left[\frac{v_e^2}{2} + U_{\text{ext}}(x_e) \right] dt + v_e(x - x_e) \right\} \\ &+ o(c^{-4}), \quad (3) \end{aligned}$$

式中 x_e, v_e 分别为地球质心在 BCRS 中的位置和速度矢量, U_{ext} 为除地球外所有太阳系天体在地球质心处的牛顿引力位, t 为 TCB 时刻, t_0 等同于 (2) 式中的 T_0 . 在实际应用中还需转换至质心动力学时 (TDB), 如喷气推进实验室 (JPL) 行星历表采用 TDB. TCB 和 TDB 的线性转换关系为

$$\begin{aligned} & TDB = TCB - L_B \times (JD_{TCB} - T_0) \times 86400 \\ & - 6.55 \times 10^{-5}, \quad (4) \end{aligned}$$

式中 JD_{TCB} 为以 TCB 表示的儒略日, $L_B \equiv 1.550519768 \times 10^{-8}$ 为调整的速率.

3.1.2 脉冲轮廓重建及观测能谱生成 [29]

将 X 射线探测器接收到的光子 TOA 转换至太阳系质心处后, 通过脉冲轮廓重建算法可从离散的光子 TOA 系列 $\{t_i\}$ 恢复出脉冲轮廓函数 $p(t)$, 光子历元折叠过程如图 3 所示. 折叠周期为观测脉冲周期 P , 记折叠周期的起点为 t_0 , 将折叠周期分为 N_b 个间隔 (Bin), 每个 Bin 的长度 $\tau_b = P/N_b$, 依次计算光子序列中每个光子 TOA 在折叠周期中的位置, 若位于第 i 个 Bin, 则相应 Bin 处光子计数 C_i 加 1, 这样 C_i 便以离散的形式代表了折叠后的脉冲轮廓, 进行归一化处理得到观测脉冲轮廓 $p(t)$.

通过光子的能量系列 $\{E_i\}$ 恢复出观测能谱 $f(t)$ 时, 观测能谱生成方法与脉冲轮廓重建方法类似, 根据能量统计光子在工作能区的分布概率, 得到观测能谱.

X 射线探测器在观测 Crab 脉冲星时, 同时受到高能粒子、弥散空间背景、电子学噪声等干扰, 而 X 射线探测器对来自脉冲星和干扰源的 X 射线光子具有相同的作用机理, 无法甄别不同来源的 X 射线光子. Crab 脉冲星高能辐射主要由同步辐射和逆康普顿散射两部分组成, 表现为典型的脉冲非热辐射, 其脉冲轮廓为典型的双峰结构 [30-32]. 脉冲轮廓是脉冲星计时观测及导航应用的主要信息源, 而随机的空间背景噪声及稳定的星云辐射, 对脉冲轮廓结构没有影响, 但会降低脉冲信噪比. 脉冲轮廓的脉冲部分受脉冲星信号及各种噪声的影响, 非脉冲部分主要受星云背景、弥散空间背景及探测器本底等影响, 因此, 分析脉冲与非脉冲部分的能谱, 可得来自脉冲星的能谱 f_{crab} .

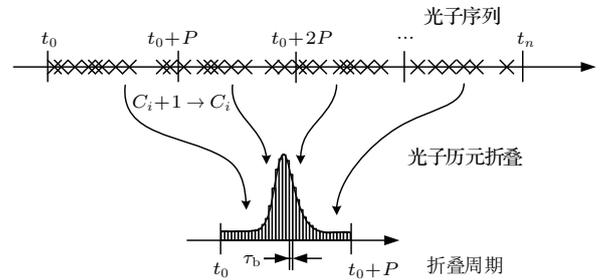


图 3 光子历元折叠过程示意图

Fig. 3. Process of X-ray photons epoch folding.

3.2 X 射线探测器有效面积标定方法研究

XMM-Newton 卫星的 EPIC-pn.CCD 相机对 Crab 脉冲星云进行了详细的观测, 确定了 Crab 脉冲星的能谱参数和辐射流量. Crab 脉冲星脉冲信号辐射的标定流量为 [13]

$$\begin{aligned} & F_{\text{crab}} = 726E^{-1.276} \exp(-0.074 \ln E) \\ & + 146E^{-1.665} \exp[-0.159(\ln E)^2] \\ & + 2021E^{-2.022}, \quad (5) \end{aligned}$$

式中 E 为 X 射线光子的能量. Crab 脉冲星的辐射流量如图 4(a) 所示, 单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$. Crab 脉冲星的光子辐射流量随着能量增加而减小, 在 1 keV 处光子辐射流量为 $0.42 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$, 在 10 keV 处衰减至 $0.00692 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$. 由于软 X 射线辐射受到的星际介质吸收十分严重, 当 Crab 脉冲星辐射的 X 射线光子穿过星际介质时, 光子能量大于原子、离子或分子中电子的束缚能, 将使电子电离而被吸收. 氢是宇宙中丰度最大的元素 [3], 为了简化吸收效应的计算, 主要考虑了

宇宙中性氢的吸收效应,如图4(b)所示.可见,中性氢对能量0.5 keV以下的X射线光子吸收率达到99%,在1 keV处为58.4%,大于2.3 keV吸收率就小于1%,故本文主要讨论聚焦型X射线探测器能量在0.5 keV以上的有效面积. Crab脉冲星的观测能谱如图4(c)所示, Crab脉冲星最大脉冲流量集中于1 keV附近,约 $0.18 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{keV}^{-1}$,在低能段主要受中性氢吸收的影响,高能段主要受脉冲星本身低流量辐射的影响.

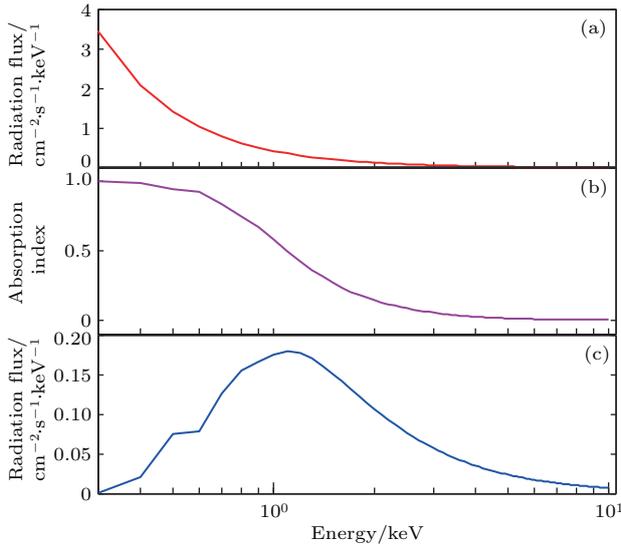


图4 Crab脉冲星的(a) X射线辐射能谱, (b)吸收系数及(c)观测能谱

Fig. 4. (a) Original spectrum, (b) absorption index and (c) observational spectrum of X-ray photons from Crab pulsar.

根据Crab脉冲星辐射能谱(图4(c))与聚焦型X射线探测器得到的脉冲能谱,可计算探测器各能段的有效面积 A ,计算公式为

$$A = \frac{f_{\text{crab}}}{F_{\text{crab}}\Gamma_{\text{H}}}, \quad (6)$$

式中 Γ_{H} 为中性氢吸收柱密度函数.

对于硅基X射线探测器性能标定,可以进一步考虑探测器的能量响应矩阵. 聚焦型X射线探测器采用SDD作为光子信号收集转换器件. 探测器的能量响应矩阵是特定能量的X射线光子在探测器上能量响应的概率分布,在全能峰附近近似高斯分布. 由于探测器没有地面标定,简化为正态高斯分布. 根据探测器的能量响应矩阵 \mathbf{H} ,修正后探测器获得Crab脉冲星观测能谱 $f_{\text{Det-Crab}}$,重新可得探测器各能段的有效面积 A 为

$$A = \frac{f_{\text{crab}}}{f_{\text{Det-Crab}}} = \frac{f_{\text{crab}}}{F_{\text{crab}} \cdot \Gamma_{\text{H}} \cdot \mathbf{H}}. \quad (7)$$

4 XPNAV-1卫星观测数据处理

分析的数据为XPNAV-1卫星上聚焦型X射线探测器的Crab脉冲星观测数据,时间跨度为2016年11月20日至12月19日,共29天124次Crab脉冲星观测,总时长为357299.0 s. 依据第2节处理方法,数据处理主要包括三个步骤:数据预处理,质心修正,脉冲轮廓叠加.

1) 数据预处理. 首先选择正确使用GPS授时的X射线光子数据,并去除能量信息错误及冗余记录的X射线光子数据,采用动力学修补部分卫星轨道遗失信息. 删掉光子流量大于50 photon/s的观测时段,以减弱空间粒子环境的影响,最后整理出124次观测共4308574个光子.

2) 质心修正^[29]. 脉冲星的信号处理一般在太阳系质心参考系内,需将X射线光子到达时刻转换至太阳系质心(SSB)处. XPNAV-1卫星携带高精度的GPS接收机,采用GPS技术定位授时,遥测下传卫星轨道值为WGS-84地心坐标,光子到达时刻基准为UTC时间. 首先根据地球自转参数(岁差、章动、极移及地球自转),将卫星轨道值转换至J2000地心惯性坐标系下,并线性内插得到光子到达时刻的卫星轨道;其次,考虑到JPL行星历表的时间尺度为TDB时间,按照IERS 2010公报决议先将UTC时间转换至TT时间,然后转换为TDB时间;最后,考虑几何传播时延及相对论效应,计算公式见第2节,太阳系内大天体位置的计算基于JPL DE405行星历表,并考虑大天体的一阶后牛顿引力时延.

3) 脉冲轮廓叠加. 精确的脉冲星自转参数是脉冲轮廓重构的基础,可基于质心修正后光子TOA序列进行周期搜索得到,或可基于脉冲星星历表中自转参数外推得到. 本文使用的脉冲星星历参数参考文献[6],如表1所示,RAJ为脉冲星的赤经,DEC为赤纬, F_0, F_1, F_2, F_3 分别代表Crab脉冲星于参考历元(PEPOCH)的自转频率及高阶导数. 据脉冲相位预报模型,可计算每个X射线光子的相位信息,统计相位分布,得到Crab脉冲星的观测脉冲轮廓.

根据上述处理流程,对每次Crab脉冲星观测数据进行处理,得到124次观测的脉冲轮廓,如图5所示.

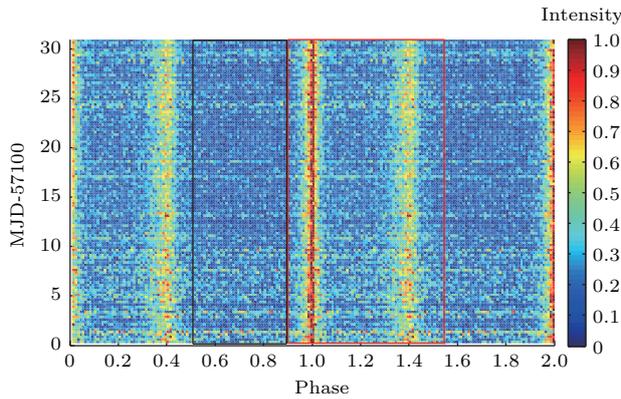


图5 XPNV-1卫星的124次Crab脉冲星观测的脉冲轮廓图,其中脉冲轮廓扣除空间及星云本底,图中红色表示脉冲部分能谱的区域,而黑色代表非脉冲部分能谱的区域

Fig. 5. Normalized pulse profile of Crab pulsar for 124 observations with background subtracted, the red box represents the extraction region for the pulse spectrum and the black box represents the extraction region for the non-pulse spectrum.

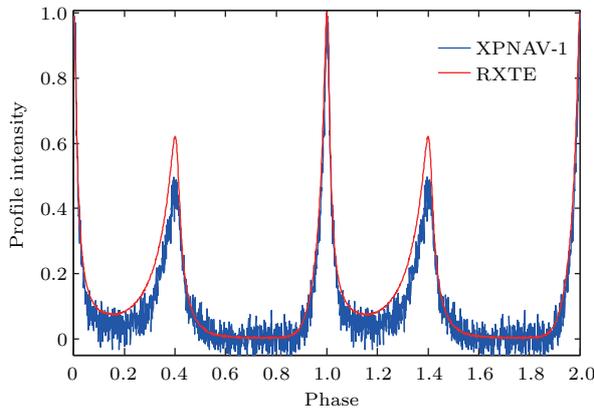


图6 XPNV卫星在29 d内观测到的归一化累积脉冲轮廓与RXTE卫星观测轮廓比较,蓝色为XPNV卫星的脉冲轮廓,红色为RXTE卫星的观测脉冲轮廓

Fig. 6. Comparison between the total normalized pulse profile in 29 d by XPNV and the one by RXTE satellite, blue profile represents the result of XPNV, the red one represents the result of RXTE.

聚焦型X射线探测器收集到4308574个有效X射线光子,其中非脉冲光子数约4077512个,脉冲光子数为231062个,脉冲光子占总光子数比率为5.36%,与其他研究团队公布结果5.3%一致^[10].按照星历表参数计算每一个X射线光子的脉冲相位,脉冲周期分成1000个Bin,相同相位的光子进行累加可得观测累加轮廓,如图6所示,为了方便与RXTE卫星观测脉冲轮廓比较,将本底部分扣除并进行归一化处理. XPNV-1卫星的Crab脉冲星脉冲轮廓与RXTE卫星观测轮廓的相似度为97.63%,差异主要在于两颗卫星上X射线探测器工

作能段不同,聚焦型X射线探测器的工作能段为0.3—10 keV,而RXTE卫星的准直型光电导天线(PCA)探测器的工作能段为2—60 keV.

表2 Crab脉冲星的星历表参数^[6]
Table 2. Timing model parameters of Crab pulsar^[6].

Parameter	Value (error)
RAJ/h:m:s	05:34:31.973
DECJ/d:m:s	+22:00:52.06
F_0/Hz	29.6484272933(3)
$F_1/10^{-10} \text{ Hz}\cdot\text{s}^{-1}$	$-3.689865(1) \times 10^{-10}$
$F_3/10^{-28} \text{ Hz}\cdot\text{s}^{-1}$	$3.3(3) \times 10^{-28}$

5 聚焦型X射线探测器有效探测面积标定

XPNV-1卫星上聚焦型X射线探测器具有较好的能量响应,记录了每个X射线光子的能量.按照第2节所述方法,统计所有光子的能量分布,绘制出聚焦型X射线探测器获取的Crab脉冲星观测能谱,如图7所示.聚焦型X射线探测器在0.1 keV处观测到4个孤立光子,为探测器电子学噪声导致,故探测器工作能区为0.3—10 keV,Crab脉冲星的观测流量在0.5 keV以下小于 $1 \text{ keV}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,在0.6—2 keV范围内流量最强,接近 $10 \text{ keV}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,然后随着能量增大光子流量减小,但在9—9.5 keV范围内又增大,这可能与探测器本底噪声或空间背景噪声有关.9.5 keV以上能段探测的X射线光子较少,流量强度急剧减小.

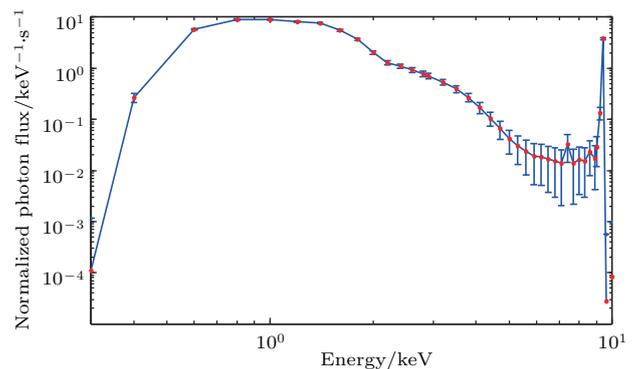


图7 聚焦型X射线探测器得到的Crab能谱曲线
Fig. 7. Spectrum of Crab pulsar from the focusing X-ray detector on XPNV-1.

脉冲部分取图5所示红色区域,占整个轮廓周期的60%,非脉冲部分取图3中黑色区域,约占整个轮廓周期的40%.Crab脉冲星的辐射能谱计算

公式为

$$f_{\text{crab}} = 6 \left(\frac{f_{\text{Pulse}}}{6} - \frac{f_{\text{non-Pulse}}}{4} \right), \quad (8)$$

式中 f_{crab} 代表脉冲星的观测能谱, f_{Pulse} 为脉冲部分的能谱, $f_{\text{non-Pulse}}$ 为非脉冲部分的能谱.

根据探测器收集到的 X 射线光子的能量及质心到达时刻, 统计每个光子的脉冲相位及能量关系, 获取 X 射线探测器的总能谱与非脉冲能谱, 得到 Crab 脉冲星的观测能谱, 如图 8 所示. 图中红色曲线代表聚焦型 X 射线探测器的观测总能谱, 黑色曲线代表各种噪声干扰的非脉冲部分能谱, 蓝色曲线为两者之差, 代表 Crab 脉冲星的观测能谱. 脉冲部分与非脉冲部分能谱趋势基本一致, 特别是在 8—10 keV 范围内, 总能谱与非脉冲能谱基本重合, 可见, 此能段内 X 射线光子主要来自空间背景和探测器本底辐射.

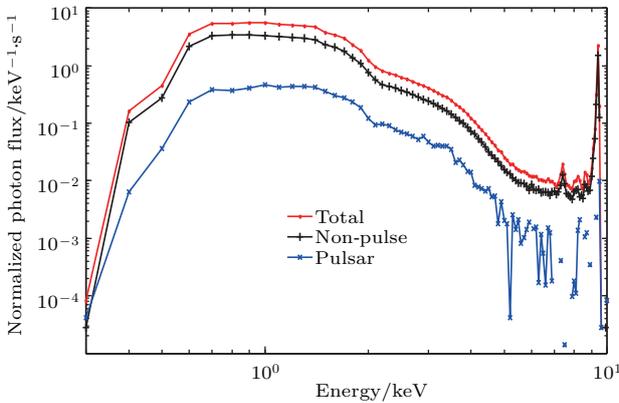


图 8 XPNAV 卫星观测到的总能谱、非脉冲能谱及 Crab 脉冲星能谱

Fig. 8. Total spectrum, non-pulse spectrum and the spectrum of Crab pulsar gained from the data of XPNAV.

根据 Crab 脉冲星辐射能谱(图 4(c))与聚焦型 X 射线探测器得到的观测能谱(图 8 蓝色曲线), 按照(6)式进行计算, 结果如图 9 所示.

聚焦型 X 射线探测器在 0.5 keV 处有效面积为 0.48 cm², 在 0.6—1.9 keV 能段内有效面积优于 2 cm², 其中在 0.7 keV 处为最大值 3.06 cm², 在典型值 1 keV 处为 2.67 cm². 探测器有效面积随着能量增大而减小, 在 2—3.5 keV 能段内有效面积约 1 cm², 大于 5 keV 能段的 X 射线探测器有效面积很小, 约 0.1 cm², 且估计精度较差, 主要受 X 射线脉冲星光子统计误差影响. 考虑几何光学面积为 30 cm², 那么聚焦型 X 射线探测器在 0.7 keV 处探测效率约 10%, 1 keV 处约 8.9%, 且随能量增加, 有效面积减小, 探测效率降低.

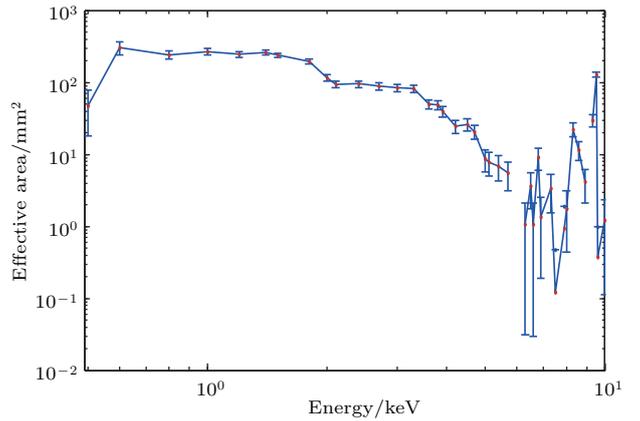


图 9 基于脉冲部分能谱的聚焦型 X 射线探测器各能段有效探测面积

Fig. 9. Effective area at different energy bands of the focusing X-ray detector on XPNAV.

聚焦型 X 射线探测器观测 Crab 脉冲星, X 射线信号主要受 Crab 脉冲星星云辐射主导, 也可按照总能谱进行 X 射线探测器性能标定. Crab 星云辐射机理为同步辐射, 也呈幂律谱辐射, 其公式为

$$F_{\text{nebula}} = 9.71E^{-2.11}. \quad (9)$$

脉冲星星云的总能谱 $F_{\text{sum}} = F_{\text{nebula}} + F_{\text{crab}}$, 同样考虑中性氢吸收作用, 基于总能谱的 X 射线探测器性能计算方法同前述一致, 计算结果如图 10 所示.

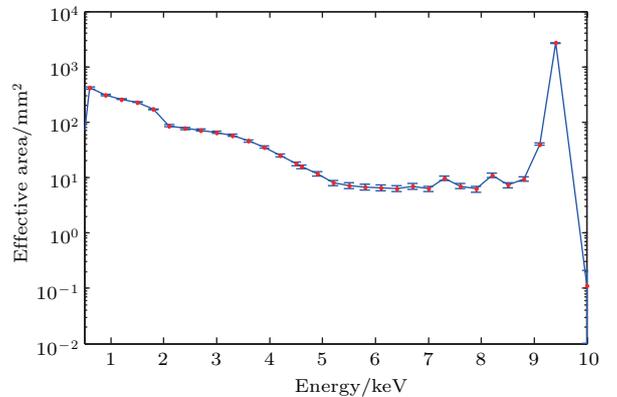


图 10 基于总能谱的聚焦型 X 射线探测器各能段有效探测面积

Fig. 10. Effective area at different energy bands of the focusing X-ray detector on XPNAV based on total spectrum.

由图 10 可知, 基于总能谱的聚焦型 X 射线探测器, 在 0.5 keV 处有效面积为 0.54 cm², 在 0.6—1.7 keV 能段内有效面积优于 2 cm², 在 0.6 keV 处取得最大值 4.13 cm², 在 1 keV 处取得典型值 2.88 cm². 探测器有效面积随着能量增大而减小, 在 1.8—2 keV 能段内有效面积优于 1 cm², 在 2—9.2 keV 能段内有效面积优于 0.1 cm², 但在

9.3—9.6 keV 能段有效面积增大, 其中在 9.4 keV 处有效面积为 26.88 cm². 可见, 基于总能谱标定的探测器有效面积整体上比基于脉冲部分能谱标定的面积大, 特别是在高能段上. 两者差异的主要原因是探测器本底及空间背景噪声的影响无法通过建模精确扣除. XPNV-1 卫星轨道为太阳同步轨道, 即为穿过南北磁极的轨道, 其空间粒子干扰种类多且流量强, 基于总能谱的探测器标定无法消除该部分噪声的影响, 故本文主要讨论基于脉冲能谱的探测器标定方法.

聚焦型 X 射线探测器的光学部分主要将平行入射的 X 射线光子聚焦至 SDD 探测器上, 能量响应矩阵也是影响探测器有效面积标定的一个因素. SDD 探测器是一款新型核辐射探测器, 常作为其他探测器性能标定的标准 X 射线探测器. 由于当前国内缺乏大型单色 X 射线标定源, 聚焦型 X 射线探测器没有在地面进行精确能量响应矩阵的标定. 2016 年 1 月, 组织过此款聚焦型 X 射线探测器的能量响应测试 [16], 使用 5 种靶材辐射的特征谱线对探测器的能量分辨率进行了测试, 能量分辨率采用能谱的半峰全宽表示, 测试结果如表 3 所示.

表 3 聚焦型 X 射线探测器能量分辨率地面测试结果 [26]
Table 3. Energy resolution of the focusing X-ray detector [26].

特征能量/keV	1.49	4.51	5.41	6.40	8.05
分辨率/keV	0.103	0.152	0.169	0.175	0.192

据表 3 可拟合能量分辨率 $\varphi(E)$ 与特征能量 E 的关系表达式为

$$\varphi(E) = 0.014E + 0.087. \quad (10)$$

假设能量 E 的 X 射线光子在探测器上的能量响应函数为

$$f(\lambda; \sigma, E) = \exp\left[-\frac{(\lambda - E)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (11)$$

式中 $\sigma = \varphi(E)/2.3482$, 如果能量分辨率为 150 eV, 那么 $\sigma = 0.06369$; λ 为探测器的读出能量. 实际上, 对于能量为 E 的 X 射线光子, 探测器的读出能量在 $(E - 3\sigma, E + 3\sigma)$ 区间内分布概率超过 97%. 能量响应矩阵的元素

$$H(\lambda, E) = \frac{f[\lambda; \sigma(E), E]}{\sum_{\lambda=0}^{10} f[\lambda; \sigma(E), E]},$$

E, λ 的能量范围分别为 0.1—10 keV, 计算可得聚焦型 X 射线探测器的能量响应矩阵 H , 如图 11 所示.

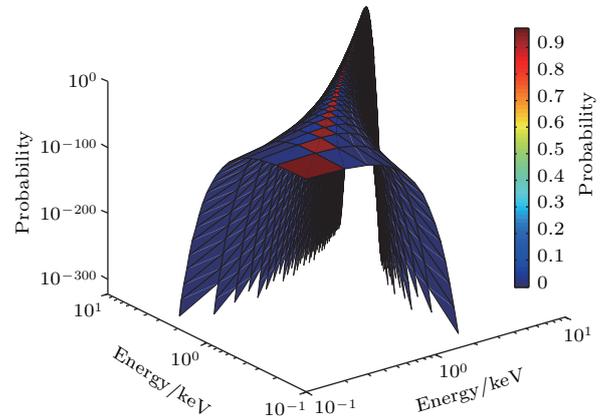


图 11 聚焦型 X 射线探测器的能量响应矩阵
Fig. 11. Energy response matrix of the focusing X-ray detector.

由图 11 可知, 当入射 X 射线光子能量较低时, 其在探测器上的主要响应在低能段范围, 随着能量增加, 能量分辨率增大, 较高能量 X 射线光子的能量响应范围增大.

根据聚焦 X 射线探测器的能量响应矩阵可得理想情况下探测器获得的 Crab 脉冲星观测能谱, 如图 12 (a) 所示.

由图 12 (a) 与图 4 (c) 可知, 考虑 X 射线探测器的能量响应矩阵, Crab 脉冲星的观测能谱基本一致, 低能段光子流量较小, 主要受宇宙中性氢吸收的影响, 在高能段由于幂律谱辐射机理光子流量较小. 两者结果的差异如图 12 (b) 所示, 考虑能量响应矩阵主要对低能段 X 射线光子流量有影响, 约为 $2 \times 10^{-3} \text{ keV}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. 类似地, 可计算考虑能量响应矩阵的聚焦型 X 射线探测器的有效面积, 如图 13 (a) 所示.

由图 13 可知, 考虑能量响应矩阵的聚焦型 X 射线探测器有效面积与图 9 中的结果基本一致, 在 0.7 keV 处取得最大值 3.08 cm², 在 1 keV 处取得典型值 2.676 cm², 两者的差异如图 13 (b) 所示. 是否考虑能量响应矩阵计算得到的探测器有效面积差异很小, 最大差值为 8.2 mm², 能量大于 0.9 keV 时两者基本一致, 这也证明在卫星运行初期, 聚焦型 X 射线探测器的能量分辨率变化很小, 与地面测试值一致.

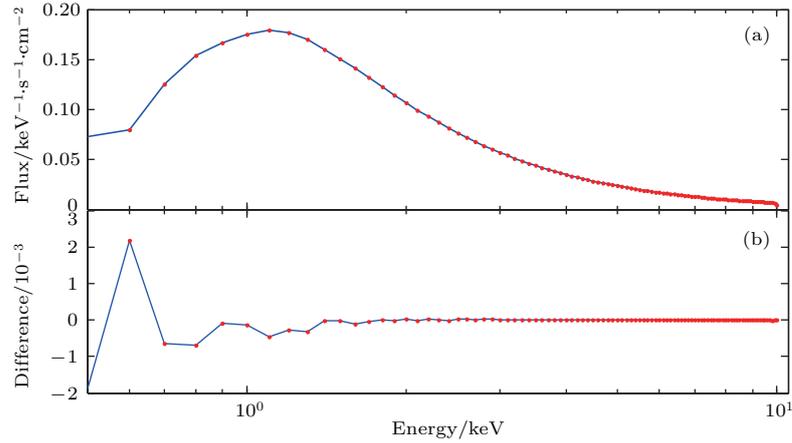


图 12 (a) 考虑能量响应矩阵的 Crab 脉冲星观测能谱; (b) 与不考虑能量响应矩阵的能谱差异
 Fig. 12. (a) Ideal spectrum of Crab pulsar when considering the energy response matrix of detector; (b) difference between the above result and that when the effect of the energy response matrix of detector is not considered.

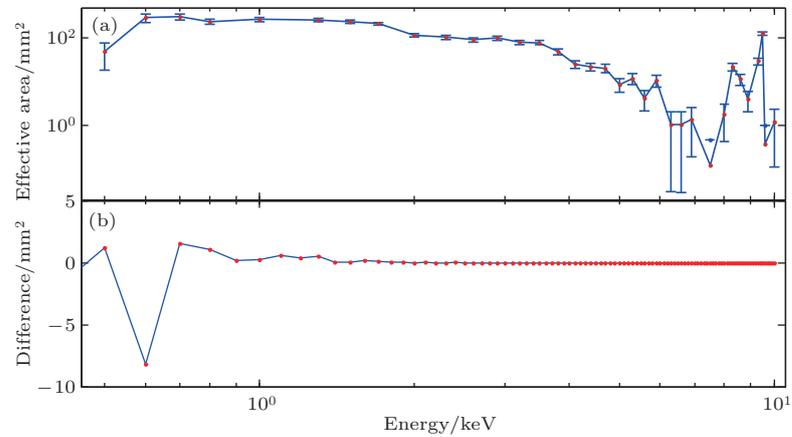


图 13 (a) 考虑能量响应矩阵的聚焦型 X 射线探测器的有效面积; (b) 与不考虑能量响应矩阵的探测器面积的差异
 Fig. 13. (a) Effective area of the focusing X-ray detector on XPNAV when considering the energy response matrix; (b) difference between the above result and that when the effect of the energy response matrix of detector is not considered.

6 讨论与结论

研究了一种基于脉冲能谱的探测器标定方法, 可以有效地消除空间噪声及探测器本底的影响, 特别适用于本底不确定情形. 首次利用在轨 X 射线观测卫星的数据, 测定了我国自主研发的聚焦型 X 射线探测器的有效面积. 分析处理了 XPNAV-1 卫星近一个月的观测数据, 结合 Crab 脉冲星 X 射线辐射能谱, 得出卫星上聚焦型 X 射线探测器在 1 keV 处有效面积为 2.67 cm^2 , 探测效率约 8.9%. 同时研究了考虑能量响应矩阵的探测器有效面积测试方法, 利用聚焦型 X 射线探测器的能量分辨率地面测试值, 建立其能量响应矩阵, 重新标定了探测器的

有效面积, 发现两者结果差异很小. 可见, XPNAV-1 卫星有限的有效面积对开展脉冲星导航空间试验提出了较大的技术挑战, 导航观测需要收集尽量多 X 射线光子以恢复出满足一定信噪比要求 (一般至少为 5) 的观测脉冲轮廓.

聚焦型 X 射线探测器采用 SDD 探测器作为 X 射线光子的读出器件. SDD 探测器由 SDD、铍窗、致冷器及安装螺柱组成. SDD 探测器的探测效率取决于探测器窗与 Si 耗尽层厚度 ($500 \mu\text{m}$, 即 Si 片的厚度), 如图 14 所示. 在 2—10 keV 能段, 由于铍窗的透过率高, 且 X 射线光子被耗尽层完全吸收, 因而 SDD 探测器的探测效率接近于 1; 在 1 keV 以下能段, 铍窗对低能 X 射线的透过率减小, 导致探测效率下降.

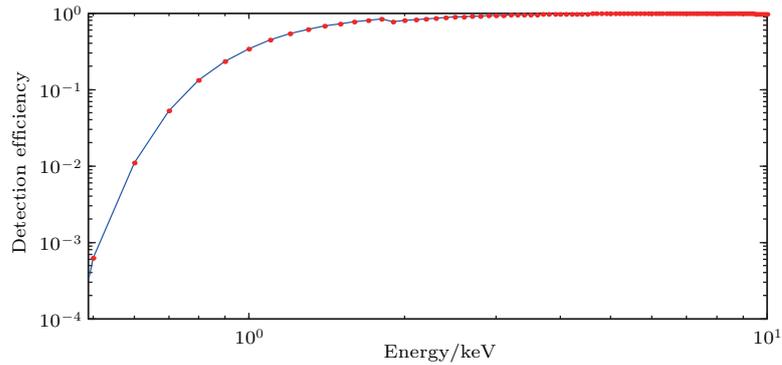


图 14 SDD 探测器探测效率 [产品手册]

Fig. 14. Detection efficiency of SDD from user book.

由图 14 可知, SDD 探测器在低能段探测效率较低, 在 0.8 keV 处探测效率小于 10%, 特别是 0.6 keV 以下能段探测效率小于 1%。此外, 宇宙中大量中性氢气体可吸收大量软 X 射线光子, 对能量低于 0.8 keV 的 X 射线光子的吸收率高于 75%, 对能量低于 0.5 keV 的光子的吸收率高达 99%。综合考虑两者的影响, 聚焦型 X 射线探测器的有效面积较小, 可预见接收能量在 0.8 keV 以下的 X 射线光子应该较少, 在 0.5 keV 以下的 X 射线光子会更少。然而聚焦型 X 射线探测器在低能段上观测到的 Crab 脉冲星能谱值较大, 利用这部分数据不能准确地标定 X 射线探测器低能段有效面积, 利用地面测试的能量分辨率构建的能量响应矩阵也无法解释该问题, 可能由于空间背景噪声大, 聚焦型 X 射线探测器的能量分辨率在低流量照射下测量误差较大, 下一步可通过观测超新星遗迹对探测器的能量分辨率及线性关系进行标定。此外, 由图 6 可知, 聚焦型 X 射线探测器在 9—9.5 keV 能段探测的光子流量很大, 而在 9.5—10 keV 能段的光子流量急剧减小, 笔者怀疑此能段的 X 射线光子可能来自于仪器重金属的 X 荧光。下一步结合仪器结构材料组成及背景观测来定性判别, 以峰位和荧光能量对应关系进行验证。

X 射线探测器性能测试是一项基础性工作, 随着在太空运行时间增加, X 射线探测器的性能会逐渐衰退, 需要定期对稳定的 X 射线脉冲星进行观测, 在轨标定 X 射线探测器的探测效率、能量分辨率等各种性能参数。

感谢为 XPNAV-1 卫星研制、发射、运控做出贡献的所有科研人员, 对试验卫星数据开放共享态度表示感谢! 感谢

中科院高能物理研究所葛明玉和郑世界博士的指导与交流, 感谢航天工程所的全林博士对论文写作的指导。

参考文献

- [1] Zhang S N 2012 *Science in China G* **42** 1308 (in Chinese) [张双南 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 1308]
- [2] Andrew L, Francis G S 2006 *Pulsar Astronomy* (3rd Ed.) (London: Cambridge University Press)
- [3] Wang S G, Zhou Y Y 1999 *X-Ray Astrophysics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [王绥瑄, 周又元 1999 X 射线天体物理学 (北京: 科学出版社)]
- [4] Lorimer D R, Kramer M 2005 *Handbook of Pulsar Astronomy* (London: Cambridge University Press)
- [5] Shuai P, Li M, Chen S L, Huang Z 2009 *The Principle and Methods of X-Ray Pulsar Navigation System* (Beijing: China Aerospace Press) (in Chinese) [帅平, 李明, 陈绍龙, 黄震 2009 X 射线脉冲星导航系统原理与方法 (北京: 中国宇航出版社)]
- [6] Zheng S J, Ge M Y, Han D W, Wang W B, Chen Y, Lu F J, Bao T W, Chai J Y, Dong Y W, Feng M Z, He J J, Huang Y, Kong M N, Li H C, Li L, Li Z H, Liu J T, Liu X, Shi H L, Song L M, Sun J C, Wang R J, Wang Y H, Wen X, Wu B B, Xiao H L, Xiong S L, Xu H H, Xu M, Zhang J, Zhang L Y, Zhang L, Zhang X F, Zhang Y J, Zhao Y, Zhang S N 2017 *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy* **47** 099505 (in Chinese) [郑世界, 葛明玉, 韩大炜, 王文彬, 陈勇, 卢方军, 鲍天威, 柴军营, 董永伟, 冯旻子, 贺健健, 黄跃, 孔敏南, 李汉成, 李陆, 李正恒, 刘江涛, 刘鑫, 师昊礼, 宋黎明, 孙建超, 王瑞杰, 王源浩, 文星, 吴伯冰, 肖华林, 熊少林, 许寒晖, 徐明, 张娟, 张来宇, 张力, 张晓峰, 张永杰, 赵一, 张双南 2017 中国科学: 物理学 力学 天文学 **47** 099505]
- [7] Wang Y D, Zheng W, Sun S M, et al. 2014 *Aerospace Sci. Technol.* **36** 27
- [8] Sheikh S I 2005 *Ph. D. Dissertation* (Maryland: University of Maryland)

- [9] Shuai P, Zhang X Y, Huang L W, et al. 2017 *Aerospace Control and Application* **43** 1 (in Chinese) [帅平, 张新源, 黄良伟 2017 空间控制技术与应用 **43** 1]
- [10] Huang L W, Shuai P, Zhang X Y, Chen S L, Xu L H, Yang Z, Deng L L, Chen J W, Shi Y Q, Xue L J, Ding Q Q, Wu Y J, Bei X M, Meng J, Lin Q Q, Chen Q, Zhang Q, Zhang H B 2017 *Chinese Space Science and Technology* **37** 1 (in Chinese) [黄良伟, 帅平, 张新源, 陈绍龙, 徐立宏, 杨哲, 邓楼楼, 陈建武, 石永强, 薛力军, 丁强, 吴耀军, 贝晓敏, 蒙静, 林晴晴, 陈强, 张倩, 张恒彬 2017 中国空间科学技术 **37** 1]
- [11] Ding H L 2010 *Nuclear Particle Detector* (Harbin: Harbin Engineering University Press) (in Chinese) [丁洪林 2010 核辐射探测器 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社)]
- [12] Zhao D C 2016 *Ph.D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS) (in Chinese) [赵大春 2016 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [13] Kirsch M G F, Briel U G, Burrows D, et al. 2005 *Proc. SPIE* **5898** 589803
- [14] Matteo G, Marcus K, Frank H 2017 XMM-Newton Calibration Technical Note <http://xmm2.esac.esa.int/docs/documents/CAL-TN-0083.pdf>. [2017-12-08]
- [15] Sun H F, Bao W M, Fang H Y, Li X P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069701 (in Chinese) [孙海峰, 包为民, 方海燕, 李小平 2014 物理学报 **63** 069701]
- [16] Xu C X, He H L, He H H, Chen Y Z, Li H D, Jiang Y L 1999 *Acta Phys. Sin.* **8** 63 (Overseas Edition)
- [17] Jia J J, Tang A P S, Takata J, Chang H K, Cheng K S 2007 *Adv. Space Res.* **40** 1425
- [18] Cheng A F, Runderman M A 1977 *APJ* **216** 865
- [19] Patt B L, Ulmer M P, Zhang W, Cordes J M, Arzoumanian Z 1999 *APJ* **E443** 522
- [20] Kuiper L, Hermsen W, Walter R, Foschini 2003 *A&A* **41** L31
- [21] Jain C, Paul B 2011 *Res. Astro. Astrophys.* **11** 1134
- [22] Song J 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [宋娟 2014 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [23] Yang Y J 2014 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [杨彦佶 2014 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [24] Liu X Y 2015 *Ph.D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [刘晓艳 2015 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [25] Zhao D C 2016 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS) (in Chinese) [赵大春 2016 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [26] Zhou Q Y, Li S W, Jiang K, Shi Y F, Ma G F 2017 *Geomatics Science and Engineering* **37** 6 (in Chinese) [周庆勇, 刘思伟, 姜坤, 史钰锋, 马高锋 2017 测绘科学与工 **37** 6]
- [27] Ren H F 2011 *Ph.D. Dissertation* (Zhengzhou: PLA Information Engineering University) (in Chinese) [任红飞 2011 博士学位论文 (郑州: 解放军信息工程大学)]
- [28] Zhao M, Huang T Y 2009 *Science in China G* **39** 1671 (in Chinese) [赵铭, 黄天衣 2009 中国科学: 物理学 力学 天文学 **39** 1671]
- [29] Zhou Q Y, Ji J F, Ren H F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139701 (in Chinese) [周庆勇, 姬剑锋, 任红飞 2013 物理学报 **62** 139701]
- [30] Ge M Y, Lu F J, Qu J L, Zheng S J, Chen Y, Han D W 2012 *APJS* **199** 32
- [31] Li H C, Ge M Y, Wu B B 2017 *35th International Cosmic Ray Conference—ICRC2017* Bexco, Busan, Korea July 10–20, 2017 P820
- [32] Ge M Y 2012 *Ph.D. Dissertation* (Beijing: Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [葛明玉 2012 博士学位论文 (北京: 中国科学院)]

A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar*

Zhou Qing-Yong^{1)2)3)†} Wei Zi-Qing²⁾³⁾ Jiang Kun⁴⁾ Deng Lou-Lou⁵⁾ Liu Si-Wei²⁾³⁾
Ji Jian-Feng²⁾³⁾ Ren Hong-Fei²⁾³⁾ Wang Yi-Di⁶⁾ Ma Gao-Feng¹⁾

1) (Geographic Spatial Information Institute, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

2) (Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

3) (State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China)

4) (Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

5) (Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100090, China)

6) (College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 31 October 2017; revised manuscript received 11 December 2017)

Abstract

X-ray detector is a core component for X-ray astronomical observation and pulsar navigation. The on-orbit observation performance of X-ray detector will change gradually, owing to the influences of emission vibration, radiation damage of high-energy particles, and the aging of the components. The on-orbit calibration of X-ray detector facilitates the accurate acquisition and the precise modeling of X-ray radiation of the observation celestial bodies. In this paper a new method of calibrating the performance of X-ray detector is studied by using the radiation spectrum of the pulsar, which can effectively eliminate the influences from detector background and space environment noise. The on-orbit performance of the first focusing X-ray detector in China has been evaluated by analyzing the observations of the X-ray pulsar-based navigation satellite-1 (XPNAV-1) for the Crab pulsar. The XPNAV-1 was launched in November 2016, with the aim of conducting the test of the feasibility of applying the regular emission of X-ray signals from pulsars to spacecraft navigation. Now, the first batch of scientific data about the Crab pulsar observations gained by the focusing X-ray detector for almost one month has been released. The pulse profiles of 124 observations and the total observational spectrum of Crab pulsar are achieved from those data. According to the international accurate X-ray radiation parameters of Crab pulsar, which have been determined by other X-ray space satellites, together with the absorption effect of the neutral hydrogen gas in the universe, the effective area of the focusing X-ray detector is estimated. The result shows that the effective area of the focusing X-ray detector on XPNAV-1 in an energy range of 0.6–1.9 keV is better than 2 cm². The maximum effective area is 3.06 cm² at an energy of 0.7 keV, which means that its detection efficiency is about 10%. As the observed energy increases, the effective area decreases. The area of the focusing X-ray detector in an energy range of 2–3.5 keV is about 1 cm², and it is about 0.1 cm² at energies above 5 keV, and its estimation accuracy is affected seriously by the statistical errors of X-ray photons. At the same time, another method of calibrating the effective area is studied by considering the energy response matrix of detector. The energy response matrix of the focusing X-ray detector is estimated by using the five ground test values of energy resolution. The effective area of the focusing X-ray detector is re-calibrated. However, the result shows that the energy response matrix exerts little effect on the effective area of the focusing X-ray detector. Finally, we suggest that the XPNAV-1 should observe some supernova remnants to monitor the changes of energy resolution and energy linearity and so on.

Keywords: XPNAV-1, X-ray pulsar, energy response matrix, silicon drift detector

PACS: 07.85.Fv, 97.60.Gb

DOI: 10.7498/aps.67.20172352

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41374003, 41304006, 41574013, 41374042).

† Corresponding author. E-mail: zjlzqy1986@163.com