

X 射线毫秒脉冲星 J0437-4715 的多波段 观测研究*

杨树启^{1,2,3†} 陈鼎¹ 蔡宏兵² 周建锋⁴ 杜源杰¹

(1 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

(2 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

(4 清华大学工程物理系天体物理中心 北京 100084)

摘要 基于澳大利亚 PARKES 天文台射电数据和 RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) 中 ASM (All Sky Monitor) 的 X 射线数据对毫秒脉冲星 J0437-4715 进行两个波段的研究。对 J0437-4715 在射电波段的观测运用 TEMPO2 软件对不同终端系统的计时数据进行校准，提高了计时模型精度。用结构函数法，利用 RXTE 全天候扫描 ASM 的观测数据，对 J0437-4715 在 X 射线波段的光变进行中长期研究，发现它在 X 射线波段存在一个 620 d 的光变周期。

关键词 天体测量学，脉冲星：个别，时间，X 射线：普通

中图分类号：P 145; **文献标识码：**A

1 引言

脉冲星是一种自转速度很快并且具有强磁场的中子星，周期在毫秒量级的脉冲星又称为毫秒脉冲星^[1]。自从 20 世纪 60 年代被发现以来，脉冲星受到了越来越多的关注，对它的研究工作也趋于多样和具体化，如脉冲星的辐射机制、磁场特性、自转周期等，但是不管研究应用于哪个方向，研究的途径首先都是获取脉冲星的辐射脉冲，通过不同波段的观测数据进行研究，完成对脉冲星本身机制的研究和在不同方向的应用。

目前在脉冲星的应用中，一个非常重要的方向就是脉冲星自主导航应用。在进行空间 X 射线脉冲星导航试验和应用中，选择脉冲星目标源很重要的参考指标就是 X 射线辐射强度和稳定度，应尽量选择有较强 X 射线辐射的毫秒脉冲星，以保证空间 X 射线脉冲信号探测灵敏度和导航精度的要求^[2]。

J0437-4715 是一颗距离地球较近的 X 射线毫秒脉冲星，周期为 5.757 ms^[3]，属于双星系统中的一颗，双星系统的旋转周期为 5.741 d，是 Johnston 等人于 1993 年在澳大利亚国家望远镜中心 (ATNF) 的 PARKES 天文台首先发现的^[3]。PARKES 天文台 64 m 射

2011-12-26 收到原稿，2012-02-21 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10803006, 11010250) 以及空间科学预先研究项目 (XDA04070000) 资助

† qiqi1102072@163.com

电望远镜是世界上最大的射电望远镜之一，在南半球甚至全球也是最好的脉冲星发现和观测研究设备^[4-5]。在进行射电观测时，不同时间、不同终端的观测要想整合在一起，需要进行 level 校准，否则计时残差高，精度低。TEMPO2 是一款基于 TEMPO 开发的新一代脉冲星计时处理软件^[6]，能去除不同终端之间的数据跳跃，降低计时残差，提高计时精度。

另外，脉冲星自主导航应用的过程中，辐射强度变化直接关联到探测器灵敏度的设置和导航脉冲星模型的建立，因此，脉冲星的光变是必须要考虑和研究的一个方面。另外未来的脉冲星导航中应用的主要是在 X 射线波段，所以研究脉冲星 X 射线波段的光变显得尤为重要。观测 X 射线波段的探测器必须是卫星探测器或在太空中，因为高能波段的射线很难穿过大气层到达地面，所以，本文使用 RXTE 的 X 射线探测器的观测数据，进行毫秒脉冲星 J0437-4715 的 X 射线波段的相关研究。

美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的 RXTE 是以天文学家布鲁诺·罗希 (Bruno Rossi) 命名的 X 射线时变探测器，它从 1995 年 12 月 30 日运行至今，特点是具有非常大的观测范围和对亮源的全天候观测。它的观测能段范围是 2~250 keV，包含以下 3 个部分：

(1) 正比计数器阵 PCA (Proportional Counter Array): 由 5 个氙气正比计数器组成，接收辐射时，X 射线会与氙气中的电子互相作用，它们对 2~60 keV 波段的 X 射线很灵敏。同时，PCA 有一个巨大的约 6 250 cm² 的收集区。PCA 的指向区又与高能 X 射线时变试验装置重叠，又增加了额外的 1 600 cm²。

(2) 高能 X 射线时变试验装置 HEXTE (High Energy X-ray Timing Experiment): HEXTE 使 RXTE 对 X 射线的灵敏度拓展到了 200 keV，因此和 PCA 一道，这两组设备组成了具有极高分辨率和灵敏度的 X 射线探测器。

(3) 全天监视器 ASM (All Sky Monitor): 在 2~10 keV 的范围每 1.5 h 对天空中的大部分区域进行一次扫描，以监视一些亮的 X 射线源的长期变化，并且使观测者有机会发现一些新的快变现象，灵敏度为 30 mCrab。

作为一颗有较强 X 射线辐射的毫秒脉冲星，目前对 J0437-4715 X 射线光变的研究工作还比较缺乏。在研究光变的方法中，结构函数分析是一种定量研究光变的有效方法。与传统的傅里叶分析相比，该方法无需考虑窗口、频谱混迭等问题。它能更进一步给出光变过程的本质信息^[7]。相比来说，尽管这种方法使用繁杂一些，但仍被许多研究者用于活动星系核的内禀光变^[8]、射电源闪烁^[9] 和射电源光变特征等分析^[10]。本文将通过结构函数分析法讨论研究脉冲星 X 射线光变。基于 RXTE ASM 从 1996 年到 2011 年的观测数据，利用结构函数分析法对毫秒脉冲星 J0437-4715 的光变进行了分析。

第 2 节使用 TEMPO2 软件实现射电观测的不同终端系统之间的校准以提高计时精度。第 3 节使用结构函数分析法对脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段的光变进行分析。

2 脉冲星 J0437-4715 射电计时残差校准

2.1 射电计时观测

在脉冲星导航应用中, 需要研究和建立一组脉冲星钟模型。用射电望远镜对脉冲星射电波段的观测和对脉冲星射电脉冲到达的预报是脉冲星钟模型建立中非常重要的研究基础。本文讨论的目标源是毫秒脉冲星 J0437-4715, 使用的数据是 PARKES 天文台 1996 年到 2006 年观测的原始计时数据^[3]。

脉冲星导航应用中, 对导航脉冲星建立的钟模型精度的要求比较高。为满足相应的导航定位精度, 对导航脉冲星建立的钟模型精度有较高的要求, 因此, 对脉冲星进行的射电计时观测, 希望获得高的精度和稳定性^[3]。在进行射电计时观测时, 需要多次对脉冲到达时间 TOA 进行预测, 然后进行校准和排除误差等工作^[11-13]。另外, 因为不同的终端系统在不同时期对同一目标源进行观测, 得到的数据之间会有跳跃, 这可能会影响最终的残差拟合精度和准确度, 因此要把所有观测时期的观测整合成一组数据, 以获取残差更好的数据, 就需要对不同终端的数据进行校准。在 Dick Manchester 教授的指导下, 本文作者基于澳大利亚 PARKES 天文台开发的 TEMPO2 软件, 对 J0437-4715 的计时数据进行了校准, 以提高拟合的精度。

2.2 观测系统

本文的射电计时数据由 PARKES 64 m 射电望远镜在 20 cm 波段获得。观测一共使用两个接收机, H-OH 接收机和 20 cm 多波束接收机, 并采用多种不同的观测系统。第 1 个是加州理工学院的快速脉冲星计时机器 FPTM (the Caltech Fast Pulsar Timing Machine), 运行时间是 1996 年到 2001 年 11 月, 是一个总带宽高达 256 MHz 的自相关光谱仪。第 2 个是 256 MHz 带宽的模拟滤波器 FB (filterbank), 运行时间为 2002 年至 2003 年。第 3 个是加州理工学院 CPSR1、CPSR2 (the Caltech-Parkes-Swinburne Recorder), 从 2002 年 11 月开始使用。CPSR2 是两个 64 MHz 带宽的观测波段 (通常集中在 1 341 MHz 和 1 405 MHz) 和近实时发生的相位相干色散消除的基带数据记录。整个观测过程中在不同时间有不同的终端系统进行了观测^[3]。

FPTM 数据校准是使用实时系统产生 2 个或 4 个 Stokes 参数, 然后结合成 Stokes I。FB 数据是从一个没有极化校准可能的搜索系统产生的。该系统在折叠了 1 bit 内的数据后产生 Stokes I 轮廓。这两个系统的数据都集成了频率和时间, 可以生成任何一个观测的轮廓, 这些观测一般持续 25 min 左右。对于 CPSR2 数据, 为尽量减少混叠和频谱泄漏的影响, 每个带通边缘的 12.5% 通道数据也会被删除。要去除最坏的无线电频率干扰, 任何能量高过 local 的中值 4σ 的频率通道数据也会被删除, “local”的定义为最近的 21 通道, 标准偏差 σ 由迭代确定。CPSR2 还控制着一个在微秒时间尺度上并去除了多数干扰的总功率监视器^[3]。

本次观测的毫秒脉冲星 J0437-4715 的星历如表 1。

表 1 本次观测的脉冲星 J0437-4715 的星历

Table 1 The ephemeris of pulsar J0437-4715 in the observation

Item	Value	Error value
Pulsar name	J0437-4715	-
MJD range(MJD)	50191.0~53819.2	-
Right ascension	4 ^h 37 ^m 15.8147635 ^s	2.2×10 ⁻¹¹ h
Declination	-47° 15'08.62417''	1.5×10 ⁻¹¹ °
Barycentric rotation frequency(Hz)	173.68794618476802512	6.35×10 ⁻¹⁴
Time derivative of barycentric rotation frequency(s^{-2})	-1.728407863129812303×10 ⁻¹⁵	5.64×10 ⁻²²
Epoch of period or frequency(MJD)	52005	-
Dispersion measure($\text{cm}^{-3}\cdot\text{pc}$)	2.64476	-
Binary model	T2	-
Binary period of pulsar(s)	5.741046461664414798	0.0000011
Epoch of periastron(MJD)	52009.852429760504247	0.000583
Longitude of periastron(degree)	1.2224471797560462534	0.0366
Eccentricity	1.9179697738598622799×10 ⁻⁵	3.3×10 ⁻⁹

2.3 残差的校准

整个时间跨度内，不同的终端系统在不同的时间段进行了观测，每次观测都有自己对应的计时残差结果。为获取长时间的计时结果，本文将整体的数据放在一起进行拟合，图 1 是所有数据直接放在一起进行拟合的残差数据结果。

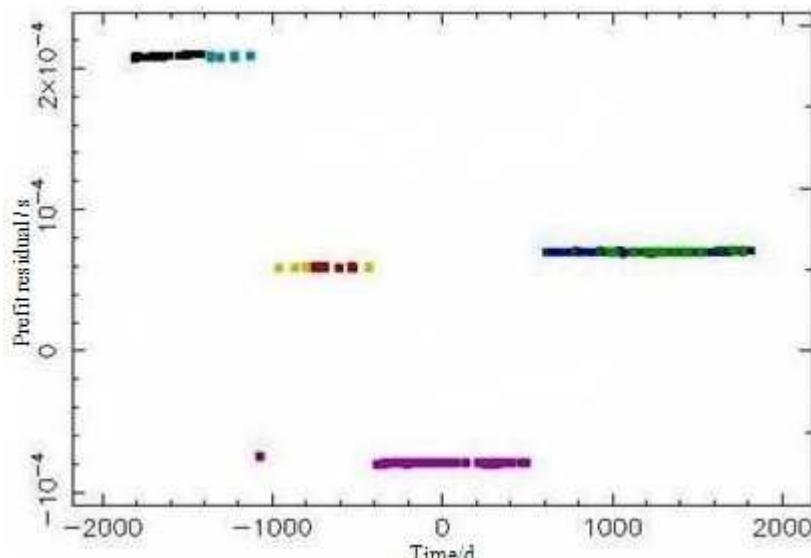


图 1 初步拟合结果

Fig. 1 The preliminary fitting results

图 1 中，横坐标是 MJD 时间，0 点对应的 MJD 为 52005.1，纵坐标是射电计时残差，不同的颜色代表不同终端系统进行的观测。黑色的是 FPTM，浅蓝色的是 S21 (System 21)，紫色的是 S22 (System 22)，黄色和红色的是 CPSR11 和 CPSR12，绿色和蓝色的分别

是 CPSR21 和 CPSR22. 空白的时间段为该时间段内没有观测数据. 由图的结果可见, 不同时间不同终端系统观测的数据之间有很大的跳跃间隔, 如果直接进行整体拟合的话, 数据之间的跳跃会影响计时精度.

用 TEMPO2 软件直接进行整体拟合的结果如图 2. 图 2 中, 横坐标是 MJD 时间, 纵坐标是射电计时残差, 不同的颜色代表不同终端系统进行的观测, 不同颜色对应的终端系统与图 1 相同. 每个值对应的残差值的上下限为残差误差线. 由图 2 结果可以看出, 用 TEMPO2 软件直接进行整体拟合得出的结果计时残差为 $0.449 \mu\text{s}$.

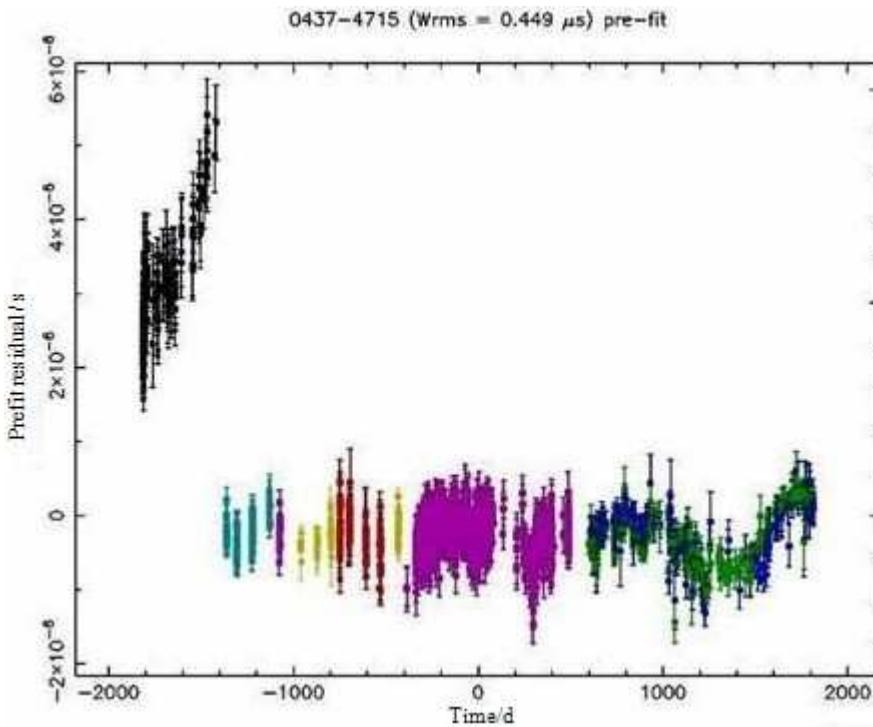


图 2 TEMPO2 直接整体拟合的结果

Fig. 2 The direct fitting results with TEMPO2

本文对不同终端系统观测数据之间的跳跃进行了两两精细校准, 图 3 是各种不同终端精细校准后的拟合结果. 由图 3 的结果可以看出, 对各终端系统的观测数据进行数据跳跃校准后, 计时残差为 $0.253 \mu\text{s}$. 说明不同终端之间的跳跃校准确实提高了计时精度, 降低了残差.

由此可见, 虽然脉冲星 J0437-4715 发现得比较晚, 数据观测时间不长, 但是计时精度水平较高. 然而对其进行综合计时, 不同时期的终端系统之间的数据跳跃还是存在一定干扰, 通过进一步的校准, 残差可以变得更小, 从而提高了计时精度. 在本次观测数据中有 $0.196 \mu\text{s}$ 变化和提高, 可见不同终端系统间的数据跳跃校准是非常有必要的.

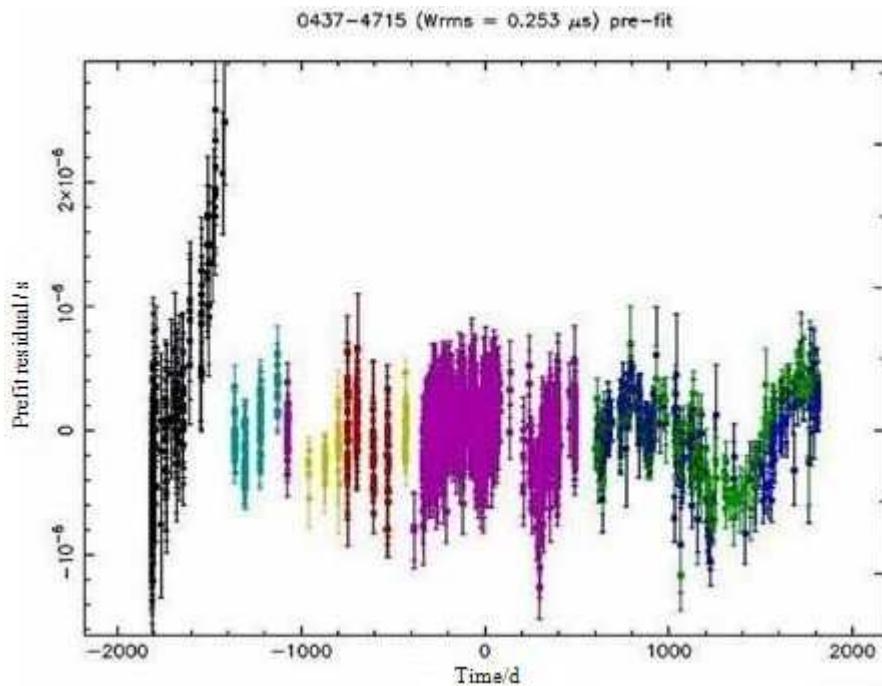


图 3 去除各终端系统观测之间的数据跳跃后的计时残差结果

Fig. 3 The results of timing residual after removing the data jump among different backend systems

3 脉冲星 J0437-4715 的 X 射线光变

3.1 光变曲线

在脉冲星导航应用中，需要长时间接收脉冲星发出的信号，所以，应用于导航的脉冲星发出的脉冲信号要相对稳定，保证导航时能相对连续地接收到脉冲信号。因此，在选择导航用的脉冲星时，光变是非常重要的一个参考参数，只有保证了所需要的脉冲星信号流量密度和稳定性，才能满足长时间导航的要求。由于射电探测器体积比较庞大，不适合被带到深空中，而小巧的 X 射线探测器正好可以应用于脉冲星导航，所以，X 射线脉冲星更适合被应用于脉冲星导航，探测器的灵敏度将直接限制脉冲星源的应用，X 射线脉冲星在 X 射线波段的流量变化就显得既突出又重要。

毫秒脉冲星 J0437-4715 的 X 射线辐射很强，在 2~10 keV 能段范围内的辐射流量为 7.9×10^{-6} photon·cm $^{-2} \cdot$ s $^{-1}$ ，在目前已知的 X 射线毫秒脉冲星中排在第 5 位，是一个脉冲星自主导航候选星。本文通过结构函数分析法研究毫秒脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段的光变。

3.2 结构函数

研究星体光变有很多不同方法，相对传统傅里叶分析技术，结构函数法不用考虑窗口频谱混迭等问题，从结构函数分析结果中能进一步获取整个时变过程中的本质信息^[14]。

对于分布不均匀的时间序列, 这种方法不需要插值, 并且需要定义的参数比较少, 所以在进行光变分析时有着无可比拟的优势, 被广泛应用于各种天体光变研究。结构函数能较好地反映光变曲线的时标特征, 所以, 尽管这一方法使用相对繁杂一点, 但仍被很多研究者应用于光变分析^[10,15-16]。

Simonetti 等人于 1985 年给出了结构函数的一般定义, 其 1 级结构函数定义为

$$S^{(1)}(\tau) = \{[D(t) - D(t - \tau)]^2\}, \quad (1)$$

其中, $D(t)$ 为 t 时刻的测量值, τ 为延时^[7]。

Hughes 等^[10] 还给出了结构函数的典型测量过程, 此外, Simonetti 等人又给出了结构函数的另一种表达形式, 假定一个有限的测量序列 $f(t_i)$, 其中 t_i 为时间序列, $i = 1, 2, \dots, N$, 对于任意延迟 τ , 则其第 1 级结构函数定义为^[17]

$$S^{(1)}(\tau) = \frac{1}{N^{(1)}(\tau)} \sum_{i=1}^n \omega(i)\omega(i + \tau)[f(t_i + \tau) - f(t_i)]^2, \quad (2)$$

其中, $N^{(1)}(\tau) = \sum_{i=1}^n \omega(i)\omega(i + \tau)$, 是数据点的记数个数, 对第 i 个测量值 $f(t_i)$, 如果存在测量值 $f(t_i + \tau)$, 则权重因子 $\omega(i) = 1$, $\omega(i + \tau) = 1$, 否则 $\omega(i) = 0$, 依次类推, 其 2 级结构函数定义为

$$S^{(2)}(\tau) = \frac{1}{N^{(2)}(\tau)} \sum_{i=1}^n \omega(i)\omega(i + \tau)\omega(i + 2\tau)[f(t_i + 2\tau) - 2f(t_i + \tau) + f(t_i)]^2, \quad (3)$$

其中, $N^{(2)}(\tau) = \sum_{i=1}^n \omega(i)\omega(i + \tau)\omega(i + 2\tau)$ ^[7]。

在用结构函数分析法研究光变曲线的时候, 一般只考虑 1 级结构函数。如果 τ_s 和 τ_l 分别为光变曲线的最短和最长光变时标, 并且观测的时间跨度远大于 τ_l , 结构函数的特征表现为: 若 $\tau > \tau_l$, 则 $S(\tau)$ 为常数; 若 $\tau < \tau_s$, 则 $S(\tau)$ 正比于 τ^2 ; 若 $\tau_s < \tau < \tau_l$, 则 $S(\tau)$ 正比于 τ^x , 其中 $x \leq 2$ 。

Hughes 等^[10] 在 Simonetti 等^[9] 的基础上, 比较详细地给出了理想的结构函数图, 如图 4 所示。

图 4 中, 横坐标是对 τ 求对数, 纵坐标是对结构函数 S 求对数。由图可以看出, 理想的结构函数 $S(\tau)-\tau$ 的对数图包括两个平台: 第 1 个平台对应 $S(\tau)$ 的值大约是测量值的标准偏差的 2 倍, 主要由测量误差造成; 然后 $S(\tau)$ 随 τ 的增大幂律上升, 最后又出现一个平台, 这个平台对应 $S(\tau)$ 的值大约是观测数据标准偏差的 2 倍, 该平台对应的 τ 即为最短光变时标。但实际情况往往跟上述的差别很大。一般来说, 用观测数据计算得出的结构函数可能表现为下面几种情况:

(1) $S(\tau)-\tau$ 的对数图上没有平台, 这说明典型光变时标比观测的时间跨度要长, 最大的对应典型光变时标的下限;

(2) $S(\tau)-\tau$ 的对数图上表现出 3 个平台, 这里可能对应两种不同的光变过程, 这种情况在射电波段出现的可能性较大;

(3) $S(\tau)-\tau$ 的对数图表现得非常不规则, 通常这种情况下光变可能包括多个爆发 (或 flare) 成分, 或者光变有着或多或少的周期性成分。

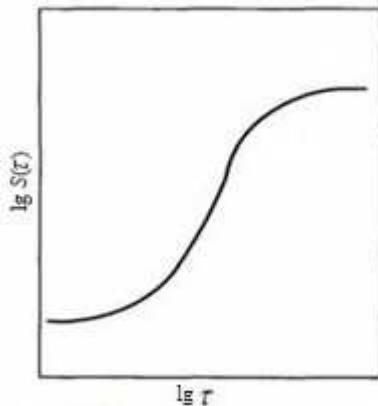


图 4 理想的结构函数图^[18]
Fig. 4 The perfect structure function curve^[18]

1993 年, Smith 等给出一个简单的辨认标准: 如果 $S(\tau)$ - τ 图上表现出 $S(\tau)$ 随 τ 增大而增大且出现一个极大, 则极大对应着周期的一半; 接着出现 $S(\tau)$ 随 τ 的增大而下降, 那么下降到极小时的 τ 对应于光变的一个周期^[18-20].

在应用过程中, 根据数据时间序列的不同, 又常分为两种情况, 一种时间序列是平均分布的, 即各相邻时间序列的点之间的间隔是相同的, 这种情况光变曲线的 1 级结构函数为以下形式:

$$S_x(k) = \langle [x_{i+k} - x_i]^2 \rangle, \quad (4)$$

另一种情况时间序列分布是不均匀的, 各相邻观测数据之间的时间差不同, 这时 1 级光变曲线的形式为

$$S_x(\tau, \delta) = \frac{1}{N(\tau, \delta)} \sum_{(i,j)|\tau-\delta/2 < t_j - t_i < \tau+\delta/2} [x_j - x_i]^2, \quad (5)$$

其中 δ 为人为选择的精度范围, δ 越大, 精度越低. 时间差落在 $\tau - \delta/2 < t_j - t_i < \tau + \delta/2$ 范围内的数据都被看作具有相同的时间延迟^[21].

3.3 RXTE ASM 及观测数据的介绍

RXTE 探测器中的全天监视器 ASM 类似于巡天扫描, 它每 1.5 h 对天空中的大部分区域进行一次扫描, 接收范围在 2~10 keV 的光子, 并进行记录, ASM 的数据格式有两种. 一种是原始数据, 另一种是 ASM 进行了“天平均”的数据.

每一个原始数据点代表对目标源的一个 90 s 时长的统计, 是对 2~10 keV 范围的光子以个数每秒 (count/s) 标记流量密度. 而对于“天平均”的数据点, 指的是对应目标源 1 d 中所有数据点的平均值, 误差值是该天中所有估计误差的正交平均.

RXTE 中 ASM 的观测数据可以用来研究天体在对应 X 射线波段的辐射流量变化, 探讨目标天体的光变特性^[22-23]. 本文获取的 ASM 的关于毫秒脉冲星 J0437-4715 的数

据是从 1996 年 2 月到 2011 年 9 月的巡天数据, 数据来源如表 2.

表 2 本次使用的脉冲星 J0437-4715 的数据来源

Table 2 The data source of pulsar J0437-4715

Pulsar	Start time(MJD)	End time(MJD)	Detector
J0437-4715	50133	55820	ASM

因为是研究长期的光变, 本文采用的是“天平均”数据。本文利用 IDL 程序语言编写程序, 导入获取的观测数据, 得出数据的光变曲线, 并调用结构函数程序过程, 得出对应的结构函数。根据结构函数, 分析毫秒脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段的光变。

3.4 获取光变曲线

根据获取的 ASM “天平均”数据, 可以得到脉冲星 J0437-4715 的光变曲线。由于整个 15 yr 多的时间跨度很长, 可以不用考虑每一天的光变, 根据 RXTE 中 ASM 的数据观测特征和观测频率, 本文以 30 d 为单位, 对原始数据进行平均处理, 研究 X 射线毫秒脉冲星 J0437-4715 长期的光变特性。平均后得出的光变信息如图 5。

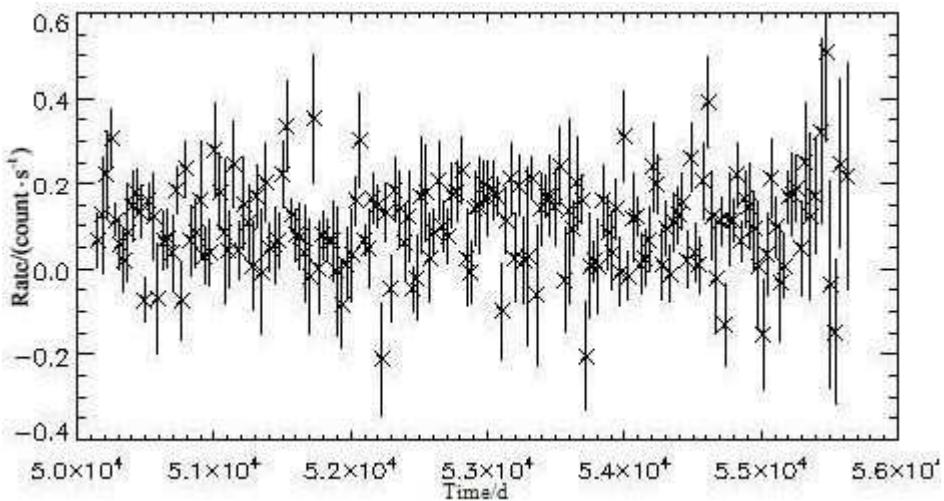


图 5 以 30 d 合并的数据的脉冲星 J0437-4715 的光变

Fig. 5 The light curve of pulsar J0437-4715 with 30-d combined data

图 5 中, 横坐标为 MJD 时间, 单位是 d, 纵坐标为 30 个“天平均”合并后平均的统计值, 单位是 count/s。由图可以看出, ASM 观测统计的脉冲星 J0437-4715 在 2~10 keV 范围内流量统计在长期跨度内整体变化趋势不大, 但短期内起伏比较明显, 对以 30 d 为合并单位的数据最高和最低之间流量统计的差值有 0.72 count/s。根据图中的误差棒显示可以看出, ASM 对脉冲星 J0437-4715 的观测相对误差较大, 所以短期内起伏明显很有可能是因为观测频次低和误差大。

ASM 采用的是 Coded Mask 成像, 视场很大。也就是说它可以同时观测多个源, ASM 组按照一定的算法对源成像, 然后抽出某个源总的光变曲线, 同时估计源的本底。本文

获取的数据的光变曲线是减掉本底的, 由于本底估计存在误差, 因此大多数的弱源有可能存在计数率为负值的情况。虽然说脉冲星 J0437-4715 已经算是 X 射线辐射比较强的脉冲星, 但在统计 X 射线每秒的接收量时, 统计值仍然很小, 所以, 在去除了本底 X 射线辐射后, 以 30 d 合并的数据值仍有可能落在 0 点以下。

根据该数据, 为了更好地研究毫秒脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段的光变, 本文使用结构函数法, 用该组数据得出结构函数, 通过结构函数分析目标脉冲星的光变。

因为该数据基本上是按时间平均分布的, 所以在求结构函数时, 可以用 $S_x(k) = \langle [x_{i+k} - x_i]^2 \rangle$ 来求结构函数, 求得 30 d 合并数据的结构函数如图 6。图 6 中, 横坐标为时间, 单位是 d, 纵坐标为结构函数值。根据同样的方法, 本文也求得以 60 d 为合并单位的数据的光变曲线和对应的结构函数, 如图 7 和图 8。

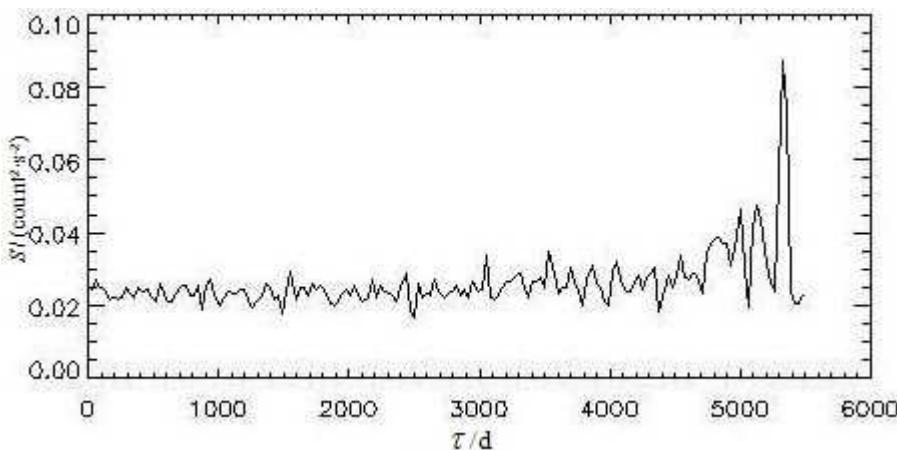


图 6 以 30 d 合并的数据的脉冲星 J0437-4715 的结构函数

Fig. 6 The structure function of pulsar J0437-4715 with 30-d combined data

比较两个结构函数图, 我们发现极大值和极小值在横坐标时间轴上对应的值差不多。为了更清楚地看清周期变化, 本文对以 30 d 为单位的合并数据的结构函数取自然对数, 进一步进行分析, 得到如图 9 的结构函数曲线。

在图 9 中, 横坐标是时间的自然对数值, 时间单位是 d, 纵坐标是对结构函数求自然对数。箭头处的极小值为本文下面讨论周期成分标出的位置。可能存在周期性成分的极小值在横坐标上的位置 $\ln\tau$ 和对应在时间坐标上的 τ 如表 3 所示, 单位是 d^[7]。

表 3 以 30 d 为合并单位的数据中可能存在周期成分的极小值位置

Table 3 The values corresponding to the possible periodic components

got from 30-d combined data

$\ln\tau$	5.88	6.25	6.48	6.78	6.91	7.14	7.30
$\tau(d)$	357.8	518.0	652.0	880.1	1002.2	1261.4	1480.3
$\ln\tau$	7.53	7.82	8.04	8.24	8.29	8.39	8.52
$\tau(d)$	1863.1	2489.9	3102.6	3789.5	3983.8	4402.8	5014.1

对 60 d 合并数据的结构函数取自然对数, 得到如图 10 的结构函数对数曲线。

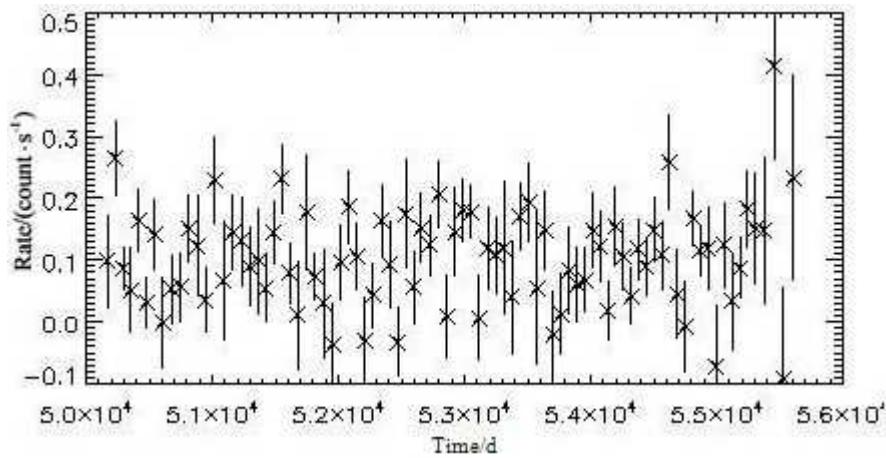


图 7 以 60 d 合并的数据的脉冲星 J0437-4715 的光变曲线

Fig. 7 The light curve of pulsar J0437-4715 with 60-d combined data

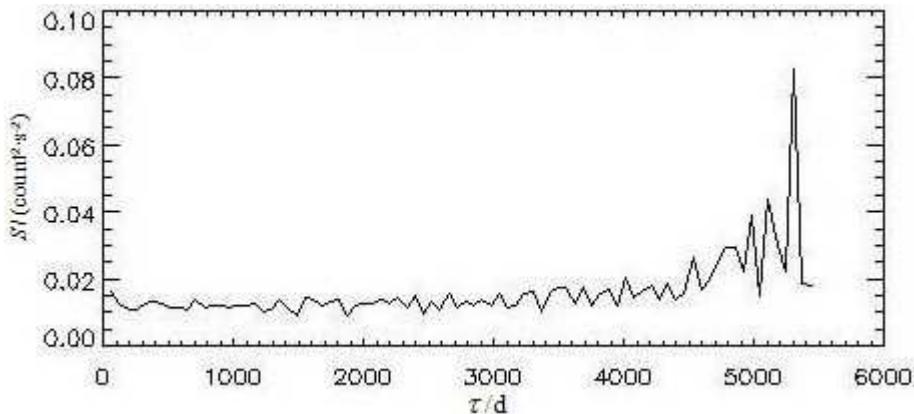


图 8 以 60 d 合并的数据的脉冲星 J0437-4715 的结构函数

Fig. 8 The structure function of pulsar J0437-4715 with 60-d combined data

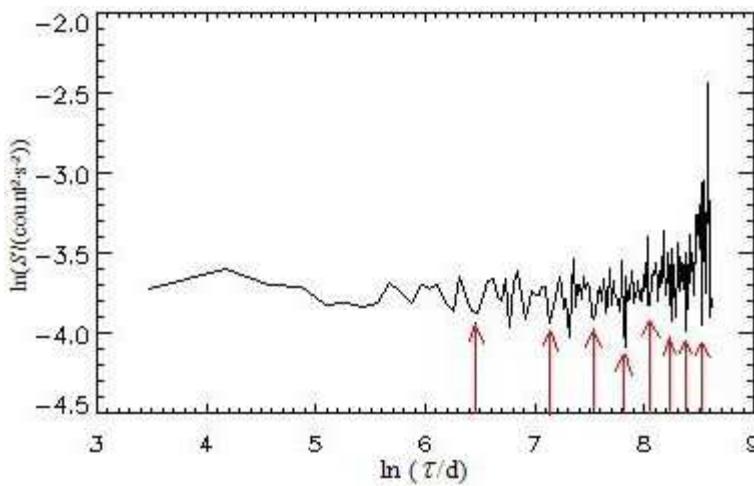


图 9 脉冲星 J0437-4715 以 30 d 为合并单位的结构函数对数图

Fig. 9 The structure function logarithmic curve of pulsar J0437-4715 with 30-d combined data

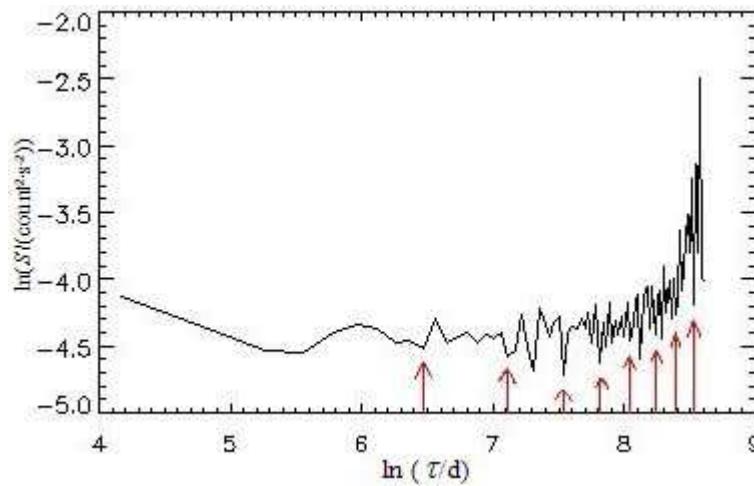


图 10 脉冲星 J0437-4715 以 60 d 为合并单位的结构函数对数图

Fig. 10 The structure function logarithmic curve of pulsar J0437-4715 with 60-d combined data

在图 10 中, 可能存在周期性成分的极小值在横坐标上的位置 $\ln\tau$ 和对应在时间坐标上的 τ 如表 4 所示, 单位是 d.

表 4 以 60 d 为合并单位的数据中可能存在周期成分的极小值位置

Table 4 The values corresponding to the possible periodic components

got from 60-d combined data

$\ln\tau$	6.48	7.12	7.30	7.53	7.81	8.04
$\tau(d)$	652.0	1236.4	1480.3	1863.1	2465.1	3102.6
$\ln\tau$	8.12	8.22	8.28	8.37	8.39	8.52
$\tau(d)$	3361.0	3714.5	3944.2	4315.6	4402.8	5014.1

结合以 30 d 平均和 60 d 平均的数据, 并参考它们的结构函数, 综合考虑脉冲星 J0437-4715 在该观测数据下的光变, 比较两个结构函数结果, 根据图 9 和图 10 中箭头标出的极小值在 X 轴的位置, 图中标有箭头的极小值对应的时间分别为 652.0, 1261.4(1236.4), 1863.1, 2489.9(2465.1), 3102.6, 3789.5(3714.5), 4402.8, 5014.1, 单位是 d, 由这些时间来推算, 基本上都是 620 ± 30 的倍数, 由此数据结构可以推测, 毫秒脉冲星 J0437-4715 在该 X 射线波段有一个 (620 ± 30) d 的光变周期^[7]. 因为选取的平均单位时间最小为 30 d, 30 d 内部的光变信息是无法知道的, 所以此取误差为 30 d. 由于毫秒脉冲星 J0437-4715 的 ASM 观测数据光变起伏比较明显, 而且存在很多不同的周期成分, 某些周期成分并不明显, 所以本文对个别在结构函数图中显示出的极小值位置没有考虑.

由毫秒脉冲星 J0437-4715 的光变曲线可以看出, ASM 观测统计的脉冲星 J0437-4715 在 2~10 keV 范围内的流量统计在长期时间跨度内整体变化趋势不大, 但短时期内起伏比较明显. 起伏明显的原因有很多: 可能是目标脉冲星在该 X 射线波段本身变化很明显; 也有可能是目标脉冲星发出的在该 X 射线波段的发向地球方向的光子在途中被吸收或散射等不确定原因而没到达探测器; 另外, 探测器本身的灵敏度、瞄准方向和观测方位受太阳影响等因素也会带来观测误差. 由于观测条件的限制, 这些短时间内观测到的 X 射线流量变化并不一定是目标脉冲星真正在该 X 射线波段的流量变化, 本文认为主要是短期的观测频次低以及相对误差较大引起的. 在研究长期光变时, 不再考虑这些短时光变. 毫秒脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段长期的流量整体变化趋势比较平缓, 稍有起伏, 本文通过 ASM 的数据得出其存在一个 (620 ± 30) d 的光变周期, 其它周期成分不明显.

本文采用的观测数据是 RXTE 中的 ASM 巡天部分的观测数据. 在脉冲星自主导航应用中, 需要空间 X 射线探测器对导航脉冲星进行实时的观测, 对探测器的灵敏度有一定的要求. 根据本文的结果可以看出, RXTE 中的灵敏度为 30 mCrab 的 ASM 对 X 射线脉冲星 J0437-4715 的观测误差相对较大, 在脉冲星导航应用中, 需要使用灵敏度更高的探测器来完成. 以目前最活跃的我国第 1 个 X 射线探测器 HXMT 为例, 它是目前已知的灵敏度最高的 X 射线探测器, 灵敏度可达到 0.5 mCrab, 是 ASM 的 60 倍, 所以, 配合 HXMT 这种高灵敏度的 X 射线探测器, 具有高 X 射线辐射流量并且流量相对稳定的 X 射线脉冲星是脉冲星自主导航的良好选择.

4 总结

毫秒脉冲星 J0437-4715 在射电波段的计时精度较高, 对不同时期不同终端系统的计时观测数据进行校准拟合后, 精度得到进一步提高, 说明不同终端系统计时观测数据之间的跳跃对计时精度有一定的影响, 对其进行校准是有必要的.

毫秒脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段的短期流量变化起伏明显, 这与 ASM 的观测频次及误差有一定的关系. 长期流量变化不大, 但有一定的起伏, 对以 30 d 为合并单位的数据最高和最低之间流量统计差为 0.72 count/s, 且有一个 (620 ± 30) d 的光变周期. 整体来说, 毫秒脉冲星 J0437-4715 在 X 射线波段的流量比较稳定, 又有较大的辐射流量, 适合脉冲星自主导航的需要.

致谢 感谢澳大利亚 PARKES 天文台的 George Hobbs 提供的 TEMPO2 软件指导和 PARKES 射电观测数据, 感谢 NASA RXTE 的 MIT/ASM 组提供的 ASM 观测数据.

参 考 文 献

- [1] Keith M J, Johnston S, Bailes M, et al. MNRAS, 2011, 419: 1752
- [2] 赵成仕, 陈鼎, 蔡宏兵, 等. 天文学进展, 2011, 25: 189
- [3] Verbiest J P W, Bailes M, Coles W A, et al. MNRAS, 2009, 400: 951
- [4] 陈鼎, 朱幸芝, 王娜. 天文学报, 2011, 52: 392
- [5] Chen D, Zhu X Z, Wang N. ChA&A, 2012, 36: 187
- [6] Champion D J, Hobbs G B, Manchester R N, et al. ApJ, 2010, 720: 201
- [7] 尹雄兵, 陈洛恩, 那维炜. 玉溪师范学院学报, 2007, 23: 29
- [8] Bregman J N, Glassgold A E, Huggins P J, et al. ApJ, 1988, 331: 746
- [9] Simonetti J H, Cordes J M, Heesen D S. ApJ, 1985, 296: 46
- [10] Hughes P A, Aller H D, Aller M F. ApJ, 1992, 396: 469
- [11] Liu K, Keane E F, Lee K J, et al. MNRAS, 2011, 420: 361
- [12] Coles W, Hobbs G, Champion D J, et al. MNRAS, 2011, 418: 561
- [13] Oslowski S, van Straten W, Hobbs G B, et al. MNRAS, 2011, 418: 1258
- [14] 周曙白, 陈洛恩, 张力, 等. 云南大学学报, 2005, 27: 485
- [15] Sagar R, Stalin C S, Gopal-Krishna, et al. MNRAS, 2004, 348: 176
- [16] Smith A G, Nair A D. PASP, 1995, 107: 863
- [17] Nandikotkur G, Sreekumart P, Carter-Lewis D A. AIPC, 1997, 410: 1361
- [18] Smith A G, Nair A D, Leacock R J, et al. ApJ, 1993, 105: 43
- [19] 王洪涛, 杨俊英. 天文学报, 2010, 51: 27
- [20] Wang H T, Yang J Y. ChA&A, 2010, 34: 343
- [21] Paltani S, Courvoisier T J L, Blecha A, et al. A&A, 1997, 327: 539
- [22] Del Monte E, Feroci M, Evangelista Y, et al. A&A, 2010, 520: 67
- [23] Icdem B, Baykal A, Inam S C. MNRAS, 2011, 419: 3109

A Research on the Multi-band Observations of X-ray Millisecond Pulsar J0437-4715

YANG Shu-qi^{1,2,3} CHEN Ding¹ CAI Hong-bing² ZHOU Jian-feng⁴ DU Yuan-jie¹

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(2 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

(3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 Center of Astrophysics, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT The observations of the X-ray millisecond pulsar J0437-4715 in the radio and X-ray bands are analyzed and explored. In the radio band, the timing observations observed by different backend systems are calibrated with TEMPO2, which improves the accuracy of timing model. Using the observation data of All Sky Monitor in Rossi X-ray Timing Explorer, the light curve of pulsar J0437-4715 in the X-ray band is generated with the structure function model. And a relative long-term period of (620 ± 30) days is found based on the 15-year data.

Key words astrometry, pulsars: individual, time, X-rays: general