

X 射线脉冲星累积轮廓建模及信号辨识*

谢强[†] 许录平 张华 罗楠

(西安电子科技大学工程学院, 西安 710071)

(2011年8月24日收到; 2011年10月26日收到修改稿)

为减少 X 射线脉冲星信号辨识所需的观测时间, 提出一种基于轮廓光子分布统计量的辨识算法. 用该方法分析了观测数据按不同周期累积所获轮廓的光子分布差异, 按累积周期正确与否, 对轮廓进行分类建模. 基于两类轮廓模型, 研究了光子分布统计量的性质差异, 以此进行信号辨识. 利用罗西 X 射线时变探测器数据进行了辨识实验, 结果表明该算法有效地减少了辨识所需的观测时间, 且不存在误检问题.

关键词: 脉冲星, 信号辨识, 累积轮廓模型, 光子分布统计量

PACS: 97.60.Gb, 98.70.Qy, 96.60.tk

1 引言

X 射线脉冲星辐射信号具有稳定的周期和轮廓, 利用其作为信号源在定时、导航等方面的应用受到越来越多的关注^[1-5]. 基于 X 射线脉冲星的自主导航可为航天器提供位置、姿态、速度以及时间等信息, 满足航天器从近地轨道、深空乃至星际飞行的导航需要. 为确保航行过程中 X 射线探测器一直对准目标脉冲星, 一般将其安装在万向节上^[6], 并根据航天器姿态变化对其进行调整. 对于深空乃至星际飞行而言, 传统的卫星导航系统无能为力, 航天器姿态主要由惯性导航系统提供. 由于惯性姿态敏感器存在漂移, 长时间的累积误差可能导致 X 射线探测器所指方向偏离目标脉冲星, 因此需要通过信号辨识来确定探测器所指方向, 修正航天器姿态误差. 此外, 在导航系统故障重启情况下, 航天器姿态为未知量, 此时需要依靠脉冲星信号辨识来确定探测器所指方向, 使其重新对准目标脉冲星, 并根据探测器与航天器夹角判断航天器的姿态. 因此, 脉冲星信号快速准确的辨识对脉冲星自主导航系统有着重要意义.

X 射线脉冲星辐射信号的特征参数包括信号周期、轮廓形状以及信号强度, 信号辨识可围绕这三类特征参数展开. 其中信号周期识别常利用频域变换实现^[7], 此类方法易受谐波影响, 存在周期误

判的问题^[8], 影响信号辨识结果的准确性. 而现有基于信号强度的方法仅能进行信号存在性检验, 尚无法实现信号分类. 目前, 更常用的辨识方法为轮廓特征比对法^[9-11], 此类算法利用频域方法提取累积轮廓的平移不变特征, 将之与标准轮廓特征模板库进行相关运算, 通过寻找最大相关系数来完成脉冲星辨识. 此类算法要求累积轮廓与标准轮廓具有相近的轮廓特征, 其辨识所需的观测时间较长. 而且当特征模板库未包含待辨识脉冲星时, 算法仍会获得一个最大相关系数, 并由此给出一个错误的辨识结果.

基于上述情况, 本文提出一种新的脉冲星信号辨识方法. 根据观测数据按不同周期累积所获轮廓的光子分布差异确定脉冲星身份, 利用该脉冲星的轮廓、强度等先验知识对辨识结果进行验证. 该方法不要求累积轮廓与标准轮廓有较高的相似度, 减少了辨识所需观测时间, 另外, 综合脉冲星信号的周期、轮廓以及强度进行辨识, 避免了误检情况的出现.

2 累积轮廓建模

2.1 累积周期确定

X 射线脉冲星辐射信号的基本观测量为光子到达时间, 并不能直接代表脉冲轮廓. 针对这种情

* 国家自然科学基金 (批准号: 61172138) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA12Z323) 资助的课题.

[†] E-mail: qxie@mail.xidian.edu.cn

况, 一般将观测数据按信号周期进行折叠累积来获得稳定脉冲轮廓^[12,13]. 在折叠累积过程中, 只有按照正确的周期进行累积才能获得信号的真实脉冲轮廓. 而脉冲星信号辨识的问题在于: 此时脉冲星身份未知, 无法确定累积周期正确与否, 因此累积轮廓的正确性无法保证, 进而影响信号辨识结果的正确性.

对于 X 射线脉冲星定时或导航应用而言, 需预先挑选若干颗适于进行定时和导航应用的 X 射线脉冲星, 根据这些脉冲星的参数建立导航数据库. 因此, 一般情况下, 导航数据库必包含待辨识脉冲星, 可将导航数据库中的各脉冲星周期作为信号的备选周期, 按备选周期对观测数据进行折叠累积. 图 1 描述了 X 射线脉冲星信号辨识流程, N 为导航数据库中脉冲星的数量. 可以看到, 同一观测数据经过不同备选周期折叠累积后获得 N 个轮廓, 脉冲星信号辨识应基于这 N 个轮廓进行.

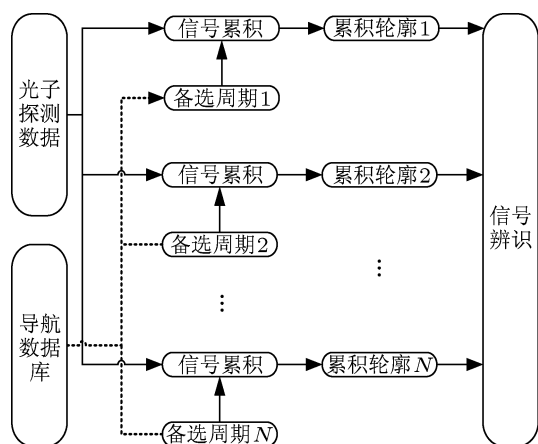


图 1 X 射线脉冲星信号辨识流程

2.2 累积轮廓模型

一般认为单位时间内到达探测器的 X 射线脉冲星辐射光子数服从泊松分布^[14], 这些光子分别来自宇宙背景辐射和脉冲星辐射两部分, 其中背景辐射光子在整个周期内均存在, 而脉冲星辐射光子只出现在特定的相位区间. 将脉冲星光子出现的区域称为脉冲辐射区, 而其他区域称为背景辐射区, 任意时刻的总辐射强度为

$$\lambda(t) = \lambda_b + \lambda_s h(\varphi(t)), \quad (1)$$

其中 λ_b 为背景辐射强度, λ_s 为脉冲星辐射强度, $h(\varphi(t))$ 为脉冲轮廓, $\varphi(t)$ 为 t 时刻的信号相位, $\varphi(t)$ 为周期函数, 其周期为信号周期 T . 设脉冲星观测起始时间为 t_0 , 终止时间为 t_f , T_{obs} 表示观测

时间长度, 有

$$T_{\text{obs}} = t_f - t_0. \quad (2)$$

用 N_{t_s} 表示由 t_0 时刻到 t_s 时刻观测到的光子数, 而 (t_s, t_e) 时段内观测到的光子数可以用 N_{t_e, t_s} 表示, 其值为

$$N_{t_e, t_s} = N_{t_e} - N_{t_s}. \quad (3)$$

根据泊松分布公式, N_{t_e, t_s} 为 k 的概率为

$$P(N_{t_e, t_s} = k) = \frac{\left(\int_{t_s}^{t_e} \lambda(t) dt\right)^k \exp\left(-\int_{t_s}^{t_e} \lambda(t) dt\right)}{k!}. \quad (4)$$

在脉冲星观测中, 由于光子到达的随机性, 观测时段 T_{obs} 内观测到的光子数为一变量, 在此用 M 表示. 其中第 i 个光子的到达时间记为 t_i , t_i 与光子所处周期及相位的关系为

$$t_i = (j-1)T + \frac{\varphi(t_i)}{2\pi}T, \quad (5)$$

式中 j 表示 t_i 所处的周期. 在信号累积时, 需要根据信号周期来计算 t_i 对应的相位, 以便将所有光子到达时间按相位归算到一个周期内. t_i 时刻光子的归算相位为

$$\hat{\varphi}(t_i) = 2\pi \frac{\text{rem}(t_i/T_c)}{T_c}, \quad (6)$$

式中 T_c 为信号累积周期, $\text{rem}(\cdot)$ 为取余运算. 所有光子归算到一个周期后, 将信号周期划分为 N_b 个相位间隔, N_b 的时间长度为 T_b , 其中第 x 个相位间隔用 b_x 表示. 该相位间隔的光子数 $c(b_x)$ 可以统计出来, 其中的任一光子到达时间归算相位满足

$$\varphi((x-1)T_b) \leq \hat{\varphi}(t_i) < \varphi(xT_b). \quad (7)$$

这些光子属于不同周期相同的相位区间, 因此有

$$c(b_x) = \sum_{j=1}^{N_p} c_j(b_x), \quad (8)$$

式中 N_p 为 T_{obs} 中包含的周期数, $c_j(b_x)$ 表示第 j 个周期 b_x 对应相位区间的光子数. 用 $t_j(b_x)$ 表示第 j 个周期中 b_x 的时间终点,

$$t_j(b_x) = (j-1)T_c + \frac{x}{N_b}T_c. \quad (9)$$

$c_j(b_x)$ 对应的时间范围为 $[t_j(b_{x-1}), t_j(b_x)]$, 因此其中的光子数可由 (3) 式得到

$$c_j(b_x) = N_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})}. \quad (10)$$

$c_j(b_x)$ 服从强度为 $A_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})}$ 的泊松分布, $A_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})}$ 为 $\lambda(t)$ 在该时段上的积分

$$A_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})} = \int_{t_j(b_{x-1})}^{t_j(b_x)} \lambda(t) dt. \quad (11)$$

2.3 累积轮廓分类

当 $T_c = T$ 时, 由 (5) 和 (6) 式可得光子到达时间的归算相位为真实相位

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}(t_j(b_x)) &= \hat{\varphi}\left(\frac{x}{N_b}T\right) \\ &= \varphi\left(\frac{x}{N_b}T\right) = \frac{x}{N_b}2\pi. \end{aligned} \quad (12)$$

因此 $A_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})}$ 为 $\lambda(t)$ 在同一相位区间的积分, 其值为常数, $c_j(b_x)$ 满足独立同分布条件. 根据大数定理, 随着观测时间的增加, 该相位间隔的光子数平均值逼近 $A_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})}$,

$$\begin{aligned} &\lim_{T_{\text{obs}} \rightarrow \infty} \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} c_j(b_x) \\ &= \lim_{N_p \rightarrow \infty} \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} c_j(b_x) \\ &= A_{t_j(b_x), t_j(b_{x-1})}. \end{aligned} \quad (13)$$

此时的累积轮廓为真实脉冲轮廓, 服从非齐次泊松分布.

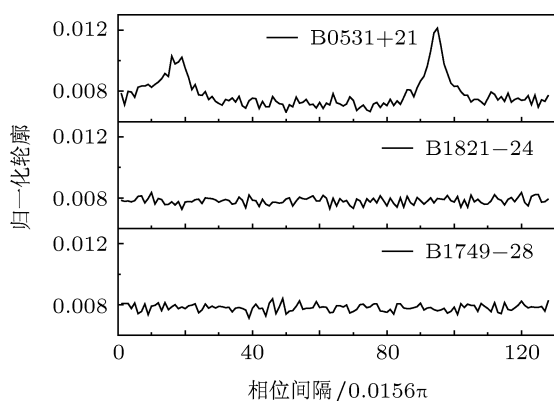


图2 不同周期对应累积轮廓

当 $T_c \neq T$ 且不存在整数倍关系时, 光子到达时间的归算相位不等于真实相位, 观测数据在累积过程中未保证相位对齐, 使得脉冲辐射区和背景辐射区的光子发生混叠, 累积轮廓无明显的脉冲出现. 图2为脉冲星 B0531+21 的罗西 X 射线时变探测器 (RXTE) 观测数据利用 FTOOLS 工具分别按照 B0531+21, B1821-24 以及 B1749-28 的周期

进行累积后获得的脉冲轮廓, 其中 B1821-24 的周期小于 B0531+21 的周期, 而 B1749-28 的周期大于 B0531+21 的周期. 可以观察到正确周期累积所获轮廓存在明显的脉冲成分, 而其他周期累积获得的轮廓无论累积周期小于或大于信号周期, 累积轮廓均无明显脉冲存在. 此时认为累积轮廓近似服从齐次泊松分布, 其强度为

$$\tilde{\lambda}_c = \frac{M}{N_p T}. \quad (14)$$

3 轮廓的光子分布统计量及其性质

3.1 轮廓的光子分布统计量

用 $c(b)$ 表示整个累积轮廓, $c(b_x)$ 和 $c(b_y)$ 分别为第 x 和第 y 相位间隔的光子数, 其光子分布情况可由两相位间隔光子数均值和光子数之差描述. 由于不同的累积周期不会改变总光子数 M , 因此在此对光子数均值并不感兴趣. 由图2可发现, 真实轮廓光子分布差异性比虚假轮廓光子分布差异性更加明显, 因此仅对两间隔的光子数之差进行统计. 两个间隔的光子数之差 $\Delta C(x, y)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta C(x, y) &= c(b_x) - c(b_y) \\ \text{或 } \Delta c(x, y) &= c(b_y) - c(b_x). \end{aligned} \quad (15)$$

上式中两种计算方法得到的光子数之差绝对值相同, 符号相反, 这会使得轮廓的光子分布统计量为零. 为避免这种情况, $c(b_x)$ 和 $c(b_y)$ 的光子分布差异用光子数之差的平方描述

$$v(c(b_x), c(b_y)) = (c(b_x) - c(b_y))^2. \quad (16)$$

$c(b_x)$ 与所有相位间隔的光子数差异为

$$v(c(b_x)) = \sum_{y=1}^{N_b} v(c(b_x), c(b_y)). \quad (17)$$

整个轮廓的光子分布统计量定义为

$$\begin{aligned} v(c(b)) &= \sum_{x=1}^{N_b} v(c(b_x)) \\ &= \sum_{x=1}^{N_b} \sum_{y=1}^{N_b} v(c(b_x), c(b_y)). \end{aligned} \quad (18)$$

$v(c(b_x), c(b_y))$ 的数学期望为

$$\begin{aligned} &E(v(c(b_x), c(b_y))) \\ &= E(c^2(b_x)) + E(c^2(b_y)) \\ &\quad - 2E(c(b_x)c(b_y)). \end{aligned} \quad (19)$$

3.2 两类轮廓的光子分布统计量性质

当累积轮廓为真实脉冲轮廓, 服从非齐次泊松分布, $c(b_x)$ 对应的泊松参数为

$$\begin{aligned} A_{t(b_x), t(b_{x-1})} &= \int_{\varphi(t(b_{x-1}))}^{\varphi(t(b_x))} \lambda(\varphi) d\varphi \\ &= T_b \lambda_b + \int_{\varphi(t(b_{x-1}))}^{\varphi(t(b_x))} \lambda_s(\varphi) d\varphi. \end{aligned} \quad (20)$$

而根据泊松过程性质有

$$\begin{aligned} E(c^2(b_x)) &= (A_{t(b_x), t(b_{x-1})})^2 \\ &\quad + A_{t(b_x), t(b_{x-1})}. \end{aligned} \quad (21)$$

因此, 对于真实轮廓, $c(b_x)$ 和 $c(b_y)$ 的光子差平方的数学期望为

$$\begin{aligned} &E(v(c(b_x), c(b_y))) \\ &= (A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))} - A_{s(t(b_y), t(b_{y-1}))})^2 \\ &\quad + A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))} + A_{s(t(b_y), t(b_{y-1}))} \\ &\quad + 2T_b \lambda_b, \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))}$ 为 λ_s 在该时段的积分

$$A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))} = \int_{\varphi(t(b_{x-1}))}^{\varphi(t(b_x))} \lambda_s(\varphi) d\varphi. \quad (23)$$

则 $\nu(c(b))$ 的数学期望为

$$\begin{aligned} &E(\nu(c(b))) \\ &= E\left(\sum_{x=1}^{N_b} \sum_{y=1}^{N_b} (A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))} - A_{s(t(b_y), t(b_{y-1}))})^2\right) \\ &\quad + 2N_b \left(E\left(\sum_{x=1}^{N_b} A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))}\right) + N_b T_b \lambda_b\right). \end{aligned} \quad (24)$$

当 $T_c \neq T$ 时, 累积轮廓为虚假轮廓, 近似服从齐次泊松分布, $c(b_x)$ 对应的泊松参数可由 (14) 式及 T_b 计算得到

$$A'_{t(b_x), t(b_{x-1})} = T_b \tilde{\lambda}_c. \quad (25)$$

$\nu(c(b_x), c(b_y))$ 的数学期望为

$$E(\nu(c(b_x), c(b_y))) = 2T_b \tilde{\lambda}_c. \quad (26)$$

因此, 对于虚假轮廓, $\nu(c(b))$ 的数学期望为

$$\begin{aligned} E(\nu(c(b))) &= E\left(\sum_{x=1}^{N_b} \sum_{y=1}^{N_b} \nu(c(b_x), c(b_y))\right) \\ &= 2N_b^2 T_b \tilde{\lambda}_c. \end{aligned} \quad (27)$$

对于背景辐射强度、脉冲辐射强度以及 $\tilde{\lambda}_c$, 其在信号周期内的和均等于 $\lambda(t)$ 在 T_{obs} 时段的积分, 因此有

$$\begin{aligned} &E\left(\sum_{x=1}^{N_b} A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))}\right) + N_b T_b \lambda_b \\ &= \int_{t_0}^{t_f} \lambda(t) dt = N_b T_b \tilde{\lambda}_c. \end{aligned} \quad (28)$$

结合 (24) 式, 可以得到真实轮廓与虚假轮廓光子分布统计量之差的数学期望

$$\begin{aligned} &E(\nu(c(b)) - \nu'(c(b))) \\ &= E\left(\sum_{x=1}^{N_b} \sum_{y=1}^{N_b} (A_{s(t(b_x), t(b_{x-1}))} - A_{s(t(b_y), t(b_{y-1}))})^2\right) \\ &> 0, \end{aligned} \quad (29)$$

式中 $\nu'(c(b))$ 表示虚假轮廓光子分布统计量. 由上述分析可得光子分布统计量的如下性质:

1) 对同一观测数据, 真实轮廓的光子分布统计量大于虚假轮廓光子分布统计量, 即

$$\nu(c(b)) > \nu'(c(b)); \quad (30)$$

2) 虚假轮廓光子分布统计量随累积时间增加线性增长, 而真实轮廓光子分布统计量随累积时间增加非线性增长, 后者增长速度大于前者.

4 基于光子分布统计量的脉冲星信号辨识方法

4.1 辨识步骤

基于真实轮廓与虚假轮廓的光子分布统计量性质差异, 本文提出一种新的脉冲星信号辨识算法, 算法步骤如下.

1) 观测数据累积. 以导航数据库中各脉冲星周期为备选周期进行数据累积, 计算各累积轮廓的光子分布统计量.

2) 信号辨识. 设定虚假轮廓光子分布统计量上界, 若某轮廓光子分布统计量超出该上界, 则进一步观察其随累积时间变化规律, 若其满足性质 2), 则认为该轮廓为真实轮廓. 其中虚假轮廓光子分布统计量上界设定如下: 由标准差定义可知, 标准差表示随机变量离开均值偏差的平均值, 因此利用两相位间隔光子数之差的均值以及标准差来设定虚假轮廓光子分布统计量的上界

$$\nu'(c(b))_{\max} = \sum_{x=1}^{N_b} (E(\nu(c(b_x), c(b_y))))$$

$$+ \text{std}(v(c(b_x), c(b_y))) \Big), \quad (31)$$

式中 $\text{std}(v(c(b_x), c(b_y)))$ 为 $v(c(b_x), c(b_y))$ 的标准差.

3) 结果验证. 从导航数据库中调取步骤 2) 中判定脉冲星的标准轮廓、背景辐射强度、脉冲星辐射强度. 利用 (25) 式计算其光子分布统计量均值, 设定 $1 + \alpha$ 倍均值为光子分布统计量上界, $1 - \alpha$ 倍均值为光子分布统计量下界. 若累积轮廓的光子分布统计量在该范围内, 则认为该脉冲星即为待辨识脉冲星, 反之则认为导航数据库中不包含待辨识脉冲星.

4.2 观测时间分析

基于上述信号辨识判别步骤, 可估计利用此方法对具体某颗 X 射线脉冲星信号辨识所需的观测时间. 以脉冲星 B0531+21 为例, 以 RXTE 15731.010647 s 的有效观测数据累积轮廓为 B0531+21 的标准轮廓, 详见图 3. 利用如下方法估计背景辐射强度

$$\lambda_b = \frac{\min(c(b_x))}{T_b N_p S}, \quad (32)$$

式中 S 为 RXTE 有效探测面积, 为 6500 cm^2 , 在得到背景辐射强度后, 可进一步得到脉冲星辐射强度

$$\lambda_s = \frac{\max(c(b_x))}{T_b N_p S} - \lambda_b. \quad (33)$$

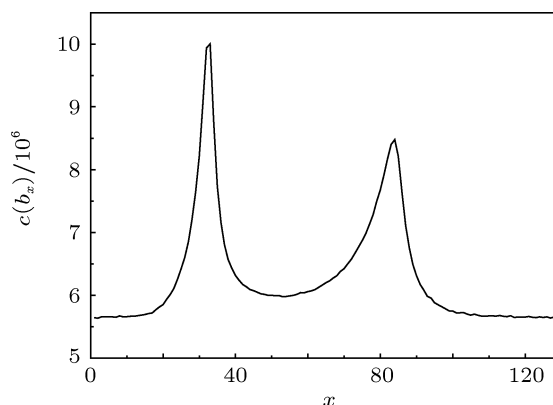


图 3 B0531+21 标准轮廓

而 $\tilde{\lambda}_c$ 可由 (28) 式计算得到. 根据 B0531+21 的标准轮廓、背景辐射强度、脉冲星辐射强度以及 λ_c , 可分别计算不同时间累积轮廓光子分布统计量均值和虚假轮廓光子分布统计量上限, 其中使得累积轮廓光子分布统计量均值大于虚假轮廓上界的最小累积时间即为信号辨识所需观测时间的理论估计值. 图 4 显示了不同累积时间 B0531+21 累积轮廓光子分布统计量均值以及虚假轮廓对应的光子分布统计量上界. 可以观察到, 当累积时间小于 3 s 时, 均值小于上界, 累积时间等于及大于 3 s 时, 累积轮廓光子分布统计量均值大于虚假轮廓上界, B0531+21 的信号辨识所需累积时间的估计值为 3 s.

5 实验与讨论

选取 10 颗 X 射线脉冲星建立导航数据库, 详见表 1. 其中脉冲星 B0531+21 为待辨识对象, 辨识实验采用 RXTE 观测数据, 数据源为 HEASARC 网站, 数据格式为 FITS. 使用 HEASARC 网站提供的 FTOOLS 工具对下载数据进行处理, 依次完成数据选取、滤波文件生成以及轮廓累积. 在累积过程中, 通过对 Source Name 选项设定不同的脉冲星名称, 实现以导航数据库中 10 颗脉冲星的周期分别对观测数据进行累积, 相位间隔数量设定为 128. 利用 FV 工具修改滤波文件中 gti (Good Time Interval) 文件来设定观测时间, 观测时间由 1 s 递增到 10 s.

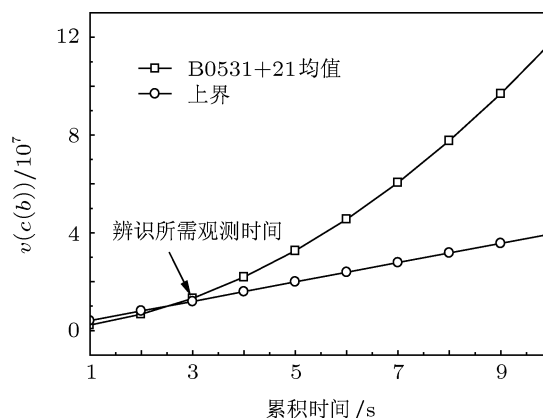


图 4 B0531+21 信号辨识所需观测时间估计

表 1 导航数据库脉冲星

脉冲星名称	B0531+21	B1046-58	B1055-52	B1323-62	B1509-58	B1719-37	B1749-28	B1821-24	B1929+10	B1951+32
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

5.1 基于轮廓光子分布统计量的信号辨识

利用 (15) 式计算各累积轮廓光子分布统计量, 并根据光子数 M 及 (31) 式计算虚假轮廓的光子分布统计量上界. 图 5 显示了各轮廓光子分布统计量和虚假轮廓的光子分布统计量上界. 可以观察到, 当观测时间小于 3 s 时, 各轮廓光子分布统计量差别并不明显, 当观测时间增加到 4 s 时, B0531+21 周期对应累积轮廓的光子分布统计量超出上界, 随着观测时间的增加, 该轮廓与其他轮廓光子分布统计量的区别逐渐增大. 图 6 给出了各轮廓光子分布统计量随观测时间变化的规律. 可以观察到, B0531+21 周期对应的累积轮廓光子分布统计量增长呈非线性规律, 而其他轮廓光子分布统计量随观测时间近似线性增长, B0531+21 的周期对应的累积轮廓光子分布统计量增长速度明显大于其他轮廓, 因此判断该轮廓为真实轮廓, 其所需观测时间略大于理论估计值.

根据 B0531+21 的标准轮廓、脉冲星辐射强度、背景辐射强度等参数, 计算其累积轮廓光子分布统计量范围, α 值设为 0.1, 结果如图 7 所示, 可以观察到, 累积轮廓光子差在该范围之内, 据此认定待辨识脉冲星为 B0531+21.

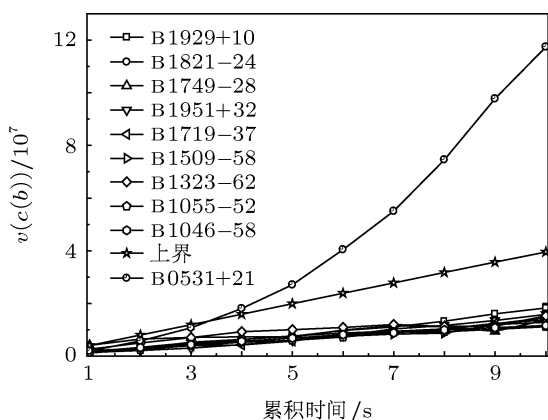


图 5 光子分布统计量与上界比较

5.2 对比实验

本文实验在文献 [11] 算法比对轮廓形状特征的基础上引入周期约束, 对辨识结果进行有效性验证. 当轮廓累积周期与辨识结果相一致时, 辨识结果有效, 否则为无效辨识结果. 图 8 给出了基于轮廓形状比对的信号辨识结果. 其中横轴代表累积时间, 纵轴表示辨识结果, 图中标示了各辨识结果对应的累积周期. 以观测时间为 4 s 时的辨识结果为例, 由图 8 可知, 数据累积周期为脉冲星 B0531+21

的周期, 而辨识结果为 B1055-52, 辨识结果无效. 观察 1—10 s 的辨识结果可以发现, 仅在观测时间为 5 s 时, 辨识结果为有效结果, 但结果并不正确.

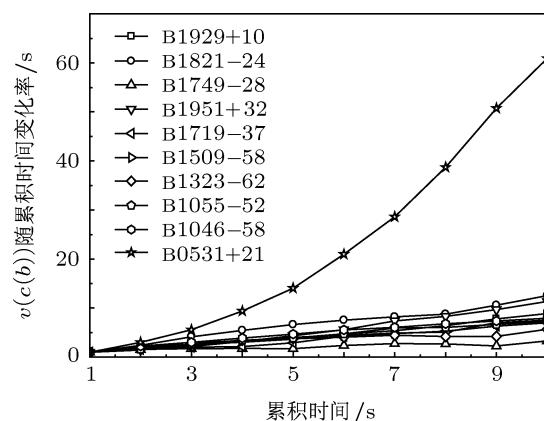


图 6 光子分布统计量随观测时间变化规律

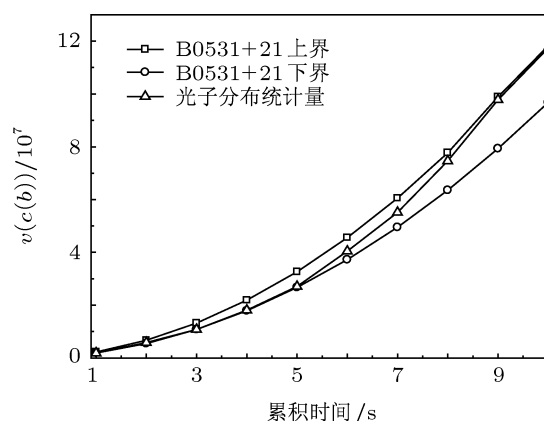


图 7 辨识结果验证

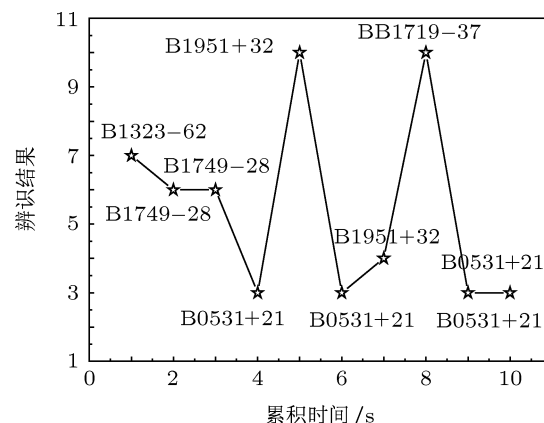


图 8 文献 [11] 方法辨识结果

卡方检验是一种常用的非参数检验方法, 利用它可以方便地检验出轮廓光子是否均匀分布. 图 9 给出了 0.05 显著性水平下卡方检验结果. 图中纵轴

数值“0”表示轮廓光子服从均匀分布,数值“1”表示相反结果.观察图9发现,在10 s的观测时间内,卡方检验未能得到惟一符合非均匀分布的累积轮廓,利用其结果无法完成脉冲星信号辨识.

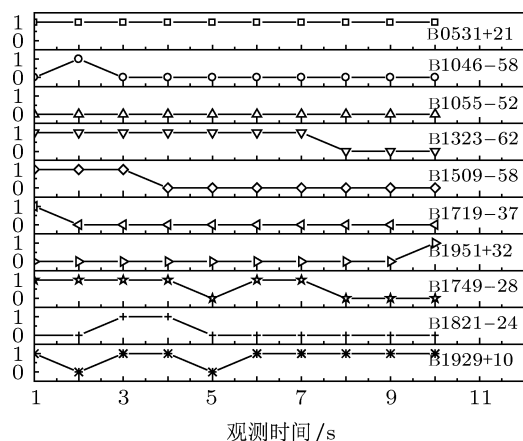


图9 卡方检验结果

5.3 结果对比与讨论

以获得正确辨识结果的时间为方法辨识所需观测时间,本文方法所需观测时间为4 s,对比实验中其他方法在10 s观测时间内均未获得正确辨识结果,本文方法所需的观测时间更短.这是因为文献[11]方法要求累积轮廓和标准轮廓具有相近的轮廓特征,卡方检验方法要求错误周期对应轮廓服从均匀分布,上述要求均需要进行长时间信号累积方可满足.而本文方法利用两类轮廓光子分布统计量性质差异进行信号辨识,不需要累积轮廓满足上述要求.

对于误检情况,由图8可观察到文献[11]方法在观测时间为5 s时产生了错误辨识结果,这是因为该方法不但要求累积轮廓与标准轮廓有较高的相似度,还要求标准轮廓之间具有较好的可辨识性.图10给出了脉冲星B0531+21标准轮廓与导航数据库中各脉冲星标准轮廓的相关系数,除其自相关系数为1外,B0531+21与3,8,10号脉冲星也具有较大的相关系数,这解释了图8中累积周期为B0531+21的周期时,辨识结果为3号脉冲星的原因.更为常见的一种误检情况是本文第一节中指出的当导航数据库不包含所观测脉冲星时,辨识方法仍会得到一个辨识结果.假设不对文献[11]方法辨识结果增加有效性检验,其在1—10 s观测时间内均会根据最大相关系数给出一个辨识结果,当特征模板库不包含待辨识脉冲星,辨识结果不可能为正确结果.利用卡方检验方法进行辨识,

在备选周期不包括B0531+21的周期的情况下,由图9可以观察到,在观测时间为5 s时,辨识结果为B1323-62,观测时间为8和9 s时,辨识结果为B1929+10,在10 s的观测过程中,该方法出现了三次误检情况.反观本文方法,在同样情况下,由图5可观察到,光子分布统计量没有超出上界,未出现误检情况.分析原因,文献[11]方法仅利用最大相关系数进行信号辨识,未考虑特征模板库不包含待辨识脉冲星情况,无法避免误检的出现.卡方检验方法以轮廓是否服从均匀分布为判别标准,在观测时间较短的情况下,累积轮廓可能不满足该要求,当只存在一个累积轮廓不服从均匀分布时,即会产生错误辨识结果.本文方法设定了光子分布统计量上界,当备选周期中不包含B0531+21周期时,其余累积轮廓光子分布统计量未超出上界,因此未出现误检情况.

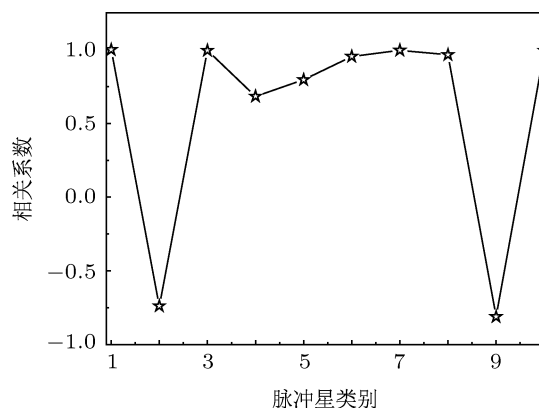


图10 B0531+21标准轮廓与其他标准轮廓相关系数

综上所述,利用本文方法进行信号辨识有以下几点优点:1)当探测器对准目标脉冲星时,本文方法可在更短的时间内完成信号辨识;2)当探测器所指方向由于航天器姿态误差偏离目标脉冲星,探测器仅观测到宇宙背景辐射时,利用累积轮廓光子分布统计量及其上界可判断出观测信号不属于导航数据库,即探测器指向存在偏差,而利用其他方法则有可能产生误检,错误的确定探测器所指方向;3)当导航系统发生故障重启,利用信号辨识使探测器重新对准目标脉冲星,确定航天器姿态时,本文方法可以快速准确地确定探测器所指方向,而其他方法由于所需观测时间长,易产生误检情况,此时并不适用.

6 结论

本文分析了累积周期对轮廓光子分布的影响,

定义了光子分布统计量, 基于两类轮廓模型分析了光子分布统计量的性质差异, 并以此进行信号辨识. 实验结果表明: 与轮廓特征比对方法以及卡方检验方法相比, 本文算法进行信号辨识所需观测时间更短, 且未出现误检情况. 在导航应用中, 本文方法可快速准确地确定探测器所指方向, 适用于航天器姿

态误差修正. 在导航系统故障重启状态下, 可利用本文方法确定探测器所指方向, 并进一步获得航天器姿态, 提高自主导航能力. 此外, 对于具体的某颗脉冲星, 可预先估计出利用本文方法进行辨识所需的观测时间, 为导航脉冲星的选择提供了参考依据.

- [1] Zhong C X, Yang T G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6157 (in Chinese) [仲崇霞, 杨廷高 2007 物理学报 **56** 6157]
- [2] Shuai P, Chen S L, Wu Y F, Zhang C Q, Li M 2007 *J. Astronautics* **28** 1543 (in Chinese) [帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 张春青, 李明 2007 宇航学报 **28** 1543]
- [3] Sheikhs I 2005 *Ph. D. Dissertation* (Maryland: Maryland University)
- [4] Emadzadeh A A, Speyer J L 2011 *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* **19** 1021
- [5] Yin H L, Yang G L, Wang Y Y, Zhang W H 2011 *Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2011 International Conference on Nanjing, Nanjing, China, June 24–26, 2011* 6225
- [6] Qiao L, Liu J Y, Zheng G L, He L, Xiong Z 2008 *Transducer and Microsystem Technologies* **27** 9 (in Chinese) [乔黎, 刘建业, 郑广楼, 贺亮, 熊智 2008 传感器与微系统 **27** 9]
- [7] Su Z, Xu L P, Wang G Y 2009 *J. Astronautics* **30** 2243 (in Chinese) [苏哲, 许录平, 王光耀 2009 宇航学报 **30** 2243]
- [8] Zhang H, Xu L P, Xie Q, Luo N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 049710 (in Chinese) [张华, 许录平, 谢强, 罗楠 2011 物理学报 **60** 049710]
- [9] Xie Z H, Xu L P, Ni G R, Wang Y 2007 *J. Infrared Millim. Waves* **26** 187 (in Chinese) [谢振华, 许录平, 倪广仁, 王岩 2007 红外与毫米波学报 **26** 187]
- [10] Liu J, Ma J, Tian J W 2009 *Information and Control* **28** 249 (in Chinese) [刘劲, 马杰, 田金文 2009 信息与控制 **28** 249]
- [11] Su Z, Wang Y, Xu L P, Luo N 2010 *J. Astronautics* **31** 1563 (in Chinese) [苏哲, 王勇, 许录平, 罗楠 2010 宇航学报 **31** 1563]
- [12] Li J X 2008 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an University of Technology) [李建勋 2008 博士学位论文 (西安: 西安理工大学)]
- [13] Wu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029710 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣 2011 物理学报 **60** 029710]
- [14] Emadzadeh A A, Speyer J L 2010 *IEEE Trans. Sig. Proc.* **58** 4484

Modeling of X-ray pulsar cumulation profile and signal identification*

Xie Qiang[†] Xu Lu-Ping Zhang Hua Luo Nan

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 24 August 2011; revised manuscript received 26 October 2011)

Abstract

In order to reduce the observation time of X-ray pulsar signal identification, a new identification algorithm based on the photon distribution statistics is proposed. The influence of cumulation period variation on photons distribution is analyzed, according to whether the cumulation period is correct, two kinds of Poisson models are developed to characterize the cumulation profiles. The photon distribution statistics is constructed, and the difference of photon distribution statistics between two kinds of profiles is presented. Rossi X-ray timing explorer observation data is used for simulation, and the simulation result verifies the effectiveness of the suggested method.

Keywords: pulsar, signal identification, cumulation profile model, photons distribution

PACS: 97.60.Gb, 98.70.Qy, 96.60.tk

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172138) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA12Z323).

[†] E-mail: qxie@mail.xidian.edu.cn