doi:10.11887/j.cn.201805026 http://journal.nudt.edu.cn

考虑卫星位置误差的增广脉冲星方位误差估计算法*

王宏力,许 强,由四海,何贻洋,冯 磊
(火箭军工程大学 制导教研室,陕西 西安 710025)

摘 要:为了解决脉冲星方位误差估计中卫星位置误差对估计结果的影响,提出一种考虑卫星位置误差的增广脉冲星方位误差估计算法。为满足可观测性条件和保证尽可能低的矩阵运算维数,算法将卫星的位置误差标量作为增广状态。结合脉冲星方位误差估计基本原理,重新推得增广算法的状态及观测方程,并通过理论分析证明了算法的可观测性。最后仿真结果表明,当卫星位置误差导致传统算法的估计结果偏差较大时,该算法依然能够保证0.01 mas的赤经和0.3 mas的赤纬估计精度。不同方向的位置误差对方位误差估计精度影响较小。

关键词:脉冲星;星表方位误差;卫星位置误差;卡尔曼滤波
中图分类号:V324.2+1;P129 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)05-177-06

Augmented estimation algorithm for pulsar position error with satellite position error

WANG Hongli, *XU Qiang*, *YOU Sihai*, *HE Yiyang*, *FENG Lei*
(Guidance Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to solve the influence of the satellite position error on the pulsar position error estimation results, an augmented estimation algorithm for the pulsar position error with satellite position error was proposed. In order to satisfy the observability conditions and ensure the lowest possible number of matrix operations, the algorithm used the satellite's position error scalar as the augmented state. Combined with the basic principle of the pulsar position error estimation, the state equation and the observation equation of the augmented algorithm were deduced again. Furthermore, the theoretical analysis proved the observability of the algorithm. The simulation results show that when the position error of the satellite causes the estimation of the traditional algorithm to deviate greatly, the algorithm can still guarantee the 0.01 mas accuracy of right ascension and 0.3 mas accuracy of declination. The position errors in different directions have less effect on the accuracy of the estimation results.

Key words: pulsar; pulsar position error; satellite position error; Kalman filter

近年来,X射线脉冲星导航凭借其独特的工作方式,已经成为航天领域的研究热点。利用宇宙中周期稳定的X射线脉冲星辐射信号,X射线脉冲星自主导航技术可以同时实现航天器导航的定位、定姿及授时服务[1-6]。而且该技术具有较高的自主性和极强的抗干扰能力,能够保证航天器长时间独立运行,降低维护成本。

在X射线脉冲星导航工作过程中,脉冲星星表方位数据的精度能够对结果造成较大的影响,甚至1 mas的方位误差都会造成数百米的定位误差[5]。但由于测量设备和方法的限制,目前常用的甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术很难满足脉冲星导航的需要。以中国目前的VLBI观测网为例,其理论测角精度为13.5 nrad,约为2.79 mas[7]。目前,相关研究人员也针对导航中的脉冲星方位误差问题做了较为深入的研究。李敏等在文献[8]中提出了一种鲁棒扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filtering, EKF)算法,一定程度上克服了包括脉冲星星表方位误差在内的系统模型不确定性及乘性噪声等缺陷。文献[9]中将脉冲星导航与星光导航结合,可以降低脉冲星星表方位误差的影响。文献[10]中将鲁棒多模自适应估计用于脉冲星导航,同样可以减弱由此带来的系统误差。但是以上研究都集中在设计合适的鲁棒算法上,所涉及的算法虽然仿真效果较好,但是会存在计算时间长、工程实现复杂等问题。由于脉冲星的方位数据基本不会变化,并考虑基于人工信标

* 收稿日期:2018-01-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61503391)
作者简介:王宏力(1965—),男,陕西宝鸡人,教授,博士,博士生导师,E-mail:mr.xu1104@foxmail.com

的导航技术已经相对成熟,文献[11]中提出一种基于精确的卫星导航信息估计脉冲星星表方位误差的算法。与脉冲星导航相同,该算法也是利用脉冲到达时间作为观测量,不同的是将实际与理论推算的脉冲到达时间之差认为是由脉冲星的方位误差造成的而非卫星的导航误差。但在该算法中使用的卫星位置信息仍然不可避免地存在较小的偏差,这将给脉冲星星表方位的估计造成影响。

1 脉冲星方位误差估计原理

如图 1 所示,通过在已知导航信息的卫星上安装 X 射线探测器,将探测得到的脉冲到达时间转化为脉冲到达太阳系质心坐标系(Barycentric Celestial Reference System, BCRS)原点,也就是太阳系质心(Solar System Barycenter, SSB)的时间 $\tilde{t}_{\mathrm{SSB}}$,并通过脉冲星的相位时间模型计算出其真实到达 SSB 的时间。这两个时间项的差值反映了此时的脉冲星方位误差,通过卡尔曼算法便可估计出当前的脉冲星方位误差。

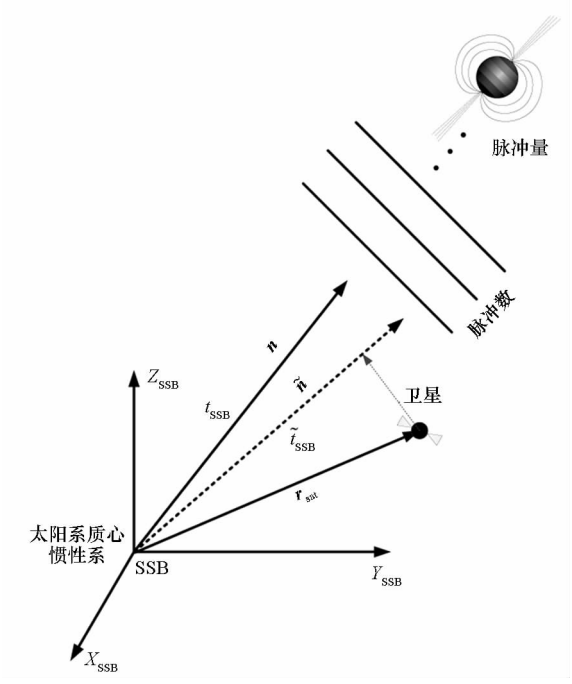


图 1 脉冲星方位误差估计基本原理

Fig. 1 Principle of pulsar position error estimation

$\tilde{t}_{\mathrm{SSB}}$的转化过程可通过式(1)实现[12]:

$$\tilde{t}_{\mathrm{SSB}} = t_{\mathrm{sat}} + \frac{\tilde{\boldsymbol{n}} \cdot \boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}}{c} + o(t) \tag{1}$$

式中,t_{sat}为脉冲到达航天器的时间,$\tilde{\boldsymbol{n}}$ 为通过带误差的脉冲星方位信息求得的 BCRS 中脉冲星单位方向矢量,$\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}$为卫星在 BCRS 中的位置,$c$ 为光速,$o(t)$为周年视差效应和 Shapiro 延迟效应等导致的高阶项。

由于式(1)中的时间高阶项 $o(t)$数量级普遍较小[13],所以在讨论脉冲星方位误差对脉冲到达时间的影响时可忽略不计。

假设脉冲星的赤经为 α,赤纬为 δ,则脉冲星在 BCRS 中的单位方向矢量为:

$$\boldsymbol{n} = \begin{bmatrix} \cos\delta\cos\alpha \\ \cos\delta\sin\alpha \\ \sin\delta \end{bmatrix} \tag{2}$$

带误差的脉冲星方位$(\tilde{\alpha},\tilde{\delta})$与真实方位$(\alpha,\delta)$满足如式(3)所示关系,其中$(\Delta\alpha,\Delta\delta)$为方位偏差。

$$\begin{cases} \alpha = \tilde{\alpha} + \Delta\alpha \\ \delta = \tilde{\delta} + \Delta\delta \end{cases} \tag{3}$$

则带误差的脉冲星方向矢量 $\tilde{\boldsymbol{n}}$ 满足:

$$\tilde{\boldsymbol{n}} = \begin{bmatrix} \cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha} \\ \cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha} \\ \sin\tilde{\delta} \end{bmatrix} \tag{4}$$

将式(3)代入式(2),进行泰勒展开并忽略二阶及其以上小项,有:

$$\boldsymbol{n} = \begin{bmatrix} \cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha} \\ \cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha} \\ \sin\tilde{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot\Delta\alpha - \sin\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot\Delta\delta \\ \cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot\Delta\alpha - \sin\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot\Delta\delta \\ \cos\tilde{\delta}\cdot\Delta\delta \end{bmatrix} \tag{5}$$

记

$$\Delta\boldsymbol{n} = \begin{bmatrix} -\cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot\Delta\alpha - \sin\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot\Delta\delta \\ \cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot\Delta\alpha - \sin\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot\Delta\delta \\ \cos\tilde{\delta}\cdot\Delta\delta \end{bmatrix} \tag{6}$$

则可以求得 $\boldsymbol{n}$ 和 $\tilde{\boldsymbol{n}}$ 满足:

$$\boldsymbol{n} = \tilde{\boldsymbol{n}} + \Delta\boldsymbol{n} \tag{7}$$

将式(7)代入式(1)中并忽略高阶项的影响,可得:

$$\tilde{t}_{\mathrm{SSB}} = t_{\mathrm{sat}} + \frac{(\boldsymbol{n} - \Delta\boldsymbol{n})\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}}{c} = t_{\mathrm{SSB}} - \frac{\Delta\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}}{c} \tag{8}$$

式中,t_{SSB}为脉冲真实到达 SSB 的时间。

脉冲到达时间之差满足:

$$\Delta t = t_{\mathrm{SSB}} - \tilde{t}_{\mathrm{SSB}} = \frac{\Delta\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}}{c} \tag{9}$$

将式(6)代入式(9),得:

$$\Delta t = \frac{1}{c}\boldsymbol{H}\begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} -\cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/x} + \cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/y} \\ \cos\tilde{\delta}\cdot r_{\mathrm{sat}/z} - \sin\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/x} - \sin\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/y} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

式中,$r_{\mathrm{sat}/x}$、$r_{\mathrm{sat}/y}$、$r_{\mathrm{sat}/z}$分别为 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}$ 在三个坐标轴的分量。

取状态量 $\boldsymbol{X}=[\Delta\alpha \quad \Delta\delta]^{\mathrm{T}}$,结合以上分析,传统脉冲星方位误差估计算法的状态方程和观测方程可分别表示为:

$$\boldsymbol{X}_{k+1}=\begin{bmatrix}\Delta\alpha_{k+1}\\ \Delta\delta_{k+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\boldsymbol{X}_k+\boldsymbol{W}_k=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_k+\boldsymbol{W}_k \tag{12}$$

$$\boldsymbol{Z}_k=c\Delta t=\boldsymbol{H}_k\begin{bmatrix}\Delta\alpha_k\\ \Delta\delta_k\end{bmatrix}+\boldsymbol{V}_k \tag{13}$$

其中,$\boldsymbol{A}$ 为状态转移矩阵,$\boldsymbol{H}_k$ 为观测矩阵,$\boldsymbol{W}_k$ 和 $\boldsymbol{V}_k$ 分别为系统噪声和观测噪声。

2　增广脉冲星方位误差估计算法

上一节分析的前提是卫星导航信息精确已知。但在实际情况中卫星的空间位置数据是存在误差的,此时传统的估计算法中就会引入一定的系统偏差[11]。为有效消除这部分系统偏差的影响,本文将卫星的位置偏差加入到状态量中,构造一种增广脉冲星方位误差估计算法。

假设卫星的真实位置 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}$ 与偏差位置 $\tilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{sat}}$ 满足:

$$\tilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{sat}}=\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}-\Delta\boldsymbol{r} \tag{14}$$

将式(14)代入式(8)中,得:

$$\begin{aligned}\tilde{t}_{\mathrm{SSB}}&=t_{\mathrm{sat}}+\frac{(\boldsymbol{n}-\Delta\boldsymbol{n})\cdot(\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}-\Delta\boldsymbol{r})}{c}\\&=t_{\mathrm{SSB}}-\frac{\boldsymbol{n}\cdot\Delta\boldsymbol{r}+\Delta\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}-\Delta\boldsymbol{n}\cdot\Delta\boldsymbol{r}}{c}\end{aligned} \tag{15}$$

即此时的 Δt 已不再满足式(9),而应表示为:

$$\Delta t=t_{\mathrm{SSB}}-\tilde{t}_{\mathrm{SSB}}=\frac{\Delta\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}+\boldsymbol{n}\cdot\Delta\boldsymbol{r}-\Delta\boldsymbol{n}\cdot\Delta\boldsymbol{r}}{c} \tag{16}$$

结合式(7)和式(14)进一步整理可得:

$$\Delta t=\frac{\Delta\boldsymbol{n}\cdot\tilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{sat}}+\tilde{\boldsymbol{n}}\cdot\Delta\boldsymbol{r}+\Delta\boldsymbol{n}\cdot\Delta\boldsymbol{r}}{c} \tag{17}$$

为保证算法的可观测性及控制运算矩阵的维数,增加的状态量选为卫星位置偏差的标量。忽略二阶以上小项,并将 $\tilde{\boldsymbol{n}}\cdot\Delta\boldsymbol{r}$ 项变换为数乘运算,则:

$$\Delta t=\frac{\Delta\boldsymbol{n}\cdot\tilde{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{sat}}}{c}+\frac{\Delta r\times\cos\theta}{c} \tag{18}$$

式中,Δr 为卫星位置偏差矢量 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的标量,θ 为 $\Delta\boldsymbol{r}$ 与 $\tilde{\boldsymbol{n}}$ 之间的夹角。

需要说明的是,θ 的大小是未知的,但是算法最终估计的是脉冲星的方位误差,只需要用到 Δr 与 $\cos\theta$ 的乘积。可先随意预设一个 $\hat{\theta}$,此时真实角度 θ 与 $\hat{\theta}$ 之间余弦的差值仅对 Δr 的估计值影响较大,对 Δr 与 $\cos\theta$ 的乘积影响较小,所以对脉冲星方位误差的估计也就影响较小。考虑实际情况下三个方向的定位误差量级相似,可先假设 $\Delta\boldsymbol{r}$ 在三个方向分量相同且都为正方向,求出其与不同脉冲星方向 $\tilde{\boldsymbol{n}}$ 之间的夹角作为观测方程中的 $\hat{\theta}$ 值。

故增广脉冲星方位误差估计算法的状态量 $\hat{\boldsymbol{X}}=[\Delta\alpha \quad \Delta\delta \quad \Delta r]^{\mathrm{T}}$,对应的状态方程和观测方程分别为:

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\hat{\boldsymbol{X}}_k+\hat{\boldsymbol{W}}_k=\hat{\boldsymbol{A}}\hat{\boldsymbol{X}}_k+\hat{\boldsymbol{W}}_k \tag{19}$$

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_k=c\Delta t=\hat{\boldsymbol{H}}_k\hat{\boldsymbol{X}}_k+\hat{\boldsymbol{V}}_k \tag{20}$$

其中,$\hat{\boldsymbol{H}}_k$ 为新算法的观测矩阵,满足

$$\hat{\boldsymbol{H}}_k=\begin{bmatrix}-\cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/x}^{(k)}+\cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/y}^{(k)}\\ \cos\tilde{\delta}\cdot r_{\mathrm{sat}/z}^{(k)}-\sin\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/x}^{(k)}-\sin\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha}\cdot r_{\mathrm{sat}/y}^{(k)}\\ \cos\hat{\theta}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{21}$$

$\hat{\boldsymbol{W}}_k$ 和 $\hat{\boldsymbol{V}}_k$ 分别为增广算法中的系统噪声和观测噪声,且对应的标准差为 $\hat{\boldsymbol{Q}}_w$ 和 $\hat{R}_w$;$r_{\mathrm{sat}/x}^{(k)}$、$r_{\mathrm{sat}/y}^{(k)}$、$r_{\mathrm{sat}/z}^{(k)}$分别为 k 时刻 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{sat}}$在三个坐标轴的分量。

考虑该系统是线性时变系统,故可以使用分段线性定常系统可观性分析法进行可观测性分析[14-15]。将系统分成 j 个时间段,每个时间段内认为系统为线性定常系统。

由于状态转移矩阵为单位阵,所以算法的可观测性矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 满足:

$$\boldsymbol{Q}(q)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_1\\ \boldsymbol{Q}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{Q}_j\end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{Q}_j=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_j\\ \boldsymbol{H}_j\\ \boldsymbol{H}_j\end{bmatrix} \tag{23}$$

其中,$\boldsymbol{Q}_j$ 为第 j 个时间段内系统的可观测性矩阵,$\boldsymbol{H}_j$ 为第 j 个时间段内系统的观测矩阵。

对于其中任意相邻的三个时间段内满足:

$$\operatorname{rank}(\boldsymbol{Q}(q)) \geqslant \operatorname{rank}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_i\\ \boldsymbol{Q}_{i+1}\\ \boldsymbol{Q}_{i+2}\end{bmatrix}\right) \tag{24}$$

通过矩阵求秩的性质可得：

$$\operatorname{rank}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_i\\ \boldsymbol{Q}_{i+1}\\ \boldsymbol{Q}_{i+2}\end{bmatrix}\right)=\operatorname{rank}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_i\\ \boldsymbol{H}_{i+1}\\ \boldsymbol{H}_{i+2}\\ \boldsymbol{0}_{6\times 3}\end{bmatrix}\right)=\operatorname{rank}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_i\\ \boldsymbol{H}_{i+1}\\ \boldsymbol{H}_{i+2}\end{bmatrix}\right) \tag{25}$$

假设：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_i\\ \boldsymbol{H}_{i+1}\\ \boldsymbol{H}_{i+2}\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{N} \tag{26}$$

其中：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} r_{\mathrm{sat}/x}^{(i)} & r_{\mathrm{sat}/y}^{(i)} & r_{\mathrm{sat}/z}^{(i)} & 1\\ r_{\mathrm{sat}/x}^{(i+1)} & r_{\mathrm{sat}/y}^{(i+1)} & r_{\mathrm{sat}/z}^{(i+1)} & 1\\ r_{\mathrm{sat}/x}^{(i+2)} & r_{\mathrm{sat}/y}^{(i+2)} & r_{\mathrm{sat}/z}^{i+2} & 1\end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix} -\cos\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha} & -\sin\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha} & 0\\ \cos\tilde{\delta}\cos\tilde{\alpha} & -\sin\tilde{\delta}\sin\tilde{\alpha} & 0\\ 0 & \cos\tilde{\delta} & 0\\ 0 & 0 & \cos\hat{\theta}\end{bmatrix} \tag{28}$$

由于卫星运动过程中相邻三个点基本不可能在一个平面，所以：

$$\operatorname{rank}(\boldsymbol{Q}(q)) \geqslant \operatorname{rank}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_i\\ \boldsymbol{Q}_{i+1}\\ \boldsymbol{Q}_{i+2}\end{bmatrix}\right)=3 \tag{29}$$

系统满足可观性条件。

3 仿真分析

仿真分析所用卫星轨道数据如表 1 所示。

表 1 卫星轨道参数

Tab. 1 Parameters of orbit

参数	数值
半长轴/km	7460
离心率	4.55×10^{-16}
轨道倾角/(°)	25
升交点赤经/(°)	0
近地点幅角/(°)	45
初始真近地点/(°)	30
起始时间	2015 - 07 - 01T12 - 00 - 00

选择脉冲星 B0531 + 21 作为观测脉冲星，分别采用传统估计算法和增广估计算法进行方位误差估计。脉冲星的参数如表 2 所示。

表 2 中，P 为脉冲周期，W 为脉冲宽度，F_x 为 X 射线脉冲星辐射光子流量，p_f 为在一个脉冲周期内的脉冲辐射流量与平均辐射流量之比。

表 2 脉冲星参数

Tab. 2 Parameters of pulsar

脉冲星参数	数值
赤经/(°)	83.63
赤纬/(°)	22.01
距离/kpc	2.0
P/ms	33.4
W/ms	1.7
F_x/(ph · cm^{-2} · s^{-1})	1.54
p_f/%	70

不同脉冲星的观测噪声方差可由式(30)求得[16]：

$$\sigma=\frac{cW\sqrt{[B_x+F_x(1-p_f)](At_{\mathrm{obs}}d)+F_xAp_ft_{\mathrm{obs}}}}{2F_xAp_ft_{\mathrm{obs}}} \tag{30}$$

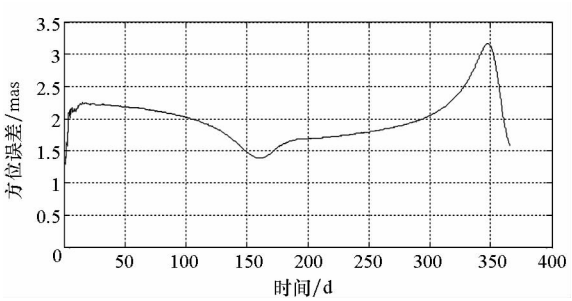
式中，$B_x=0.005$ ph · cm^{-2} · s^{-1} 为宇宙背景噪声，A 为探测器有效面积，t_{obs} 为观测时间，d 为脉冲宽度 W 与脉冲周期 P 之比，其他变量与前文相同。

仿真中探测器面积为 1 m^2，观测时间为1000 s。将表 2 中参数代入式(30)中，计算得到该脉冲星的观测噪声方差 $\sigma=(77.76\ \mathrm{m})^2$。仿真中脉冲星方位误差统一设为(2 mas，2 mas)。系统噪声标准差 $\hat{\boldsymbol{Q}}_w=\operatorname{diag}([10^{-24}\quad 10^{-24}\quad 10^{-20}])$，初始状态 $\hat{\boldsymbol{X}}=[0\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$。

当卫星各方向位置误差为 100 m 时，两种算法的估计结果如图 2、图 3 所示。其他位置误差下脉冲星的方位误差估计偏差统计结果见表 3。

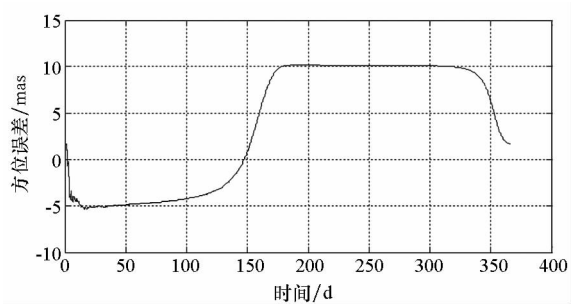
通过图表分析可以发现，在卫星位置误差作用下，传统算法的估计结果不仅偏差很大，而且估计的方向还会随着地球的公转发生变化，导致较大的偏差，而本文的增广估计算法依然能够保证较高精度。传统算法的赤经估计精度虽然能够保证在 1 mas 以内，但相对于本文算法 0.01 mas 以内的精度依然较大。传统算法的赤纬估计精度受位置误差影响最为明显，基本已经超过 5 mas，但本文所提算法依然能够保证在 0.3 mas 以内甚至

更低。通过改变 $\Delta \boldsymbol{r}$ 三个方向的分量大小改变真实 θ 的值,发现方位误差估计结果受 $\Delta \boldsymbol{r}$ 方向的影响较小,基本不会对估计结果造成较大损失,验证了上一节的分析。



(a) 赤经误差估计结果

(a) Estimation results of right ascension error

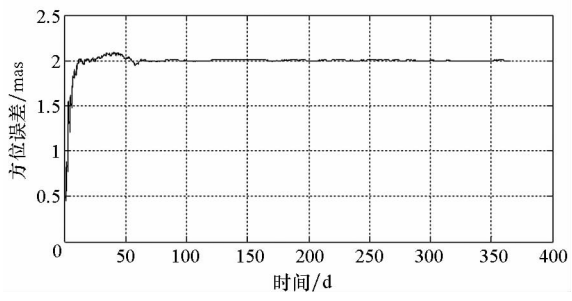


(b) 赤纬误差估计结果

(b) Estimation results of declination error

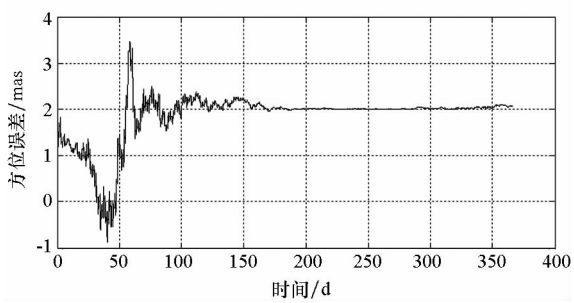
图 2　传统算法估计结果

Fig. 2　Estimation results of traditional algorithm



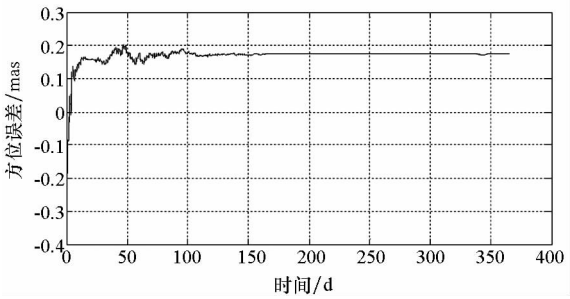
(a) 赤经误差估计结果

(a) Estimation results of right ascension error



(b) 赤纬误差估计结果

(b) Estimation results of declination error



(c) 卫星位置误差估计结果

(c) Estimation results of satellite position error

图 3　增广算法估计结果

Fig. 3　Estimation results of augmented algorithm

表 3　不同条件下两种算法的估计偏差统计

Tab. 3　Estimation results of two algorithms under different conditions

位置误差/km	传统算法估计偏差/mas	增广算法估计偏差/mas
(0.1,0.1,0.1)	(0.279,7.922)	(0.003,0.054)
(0.3,0.3,0.3)	(0.835,23.715)	(0.005,0.124)
(0.1,0.01,0.01)	(0.046,1.321)	(0.007,0.272)
(-0.1,-0.01,-0.01)	(0.047,1.312)	(0.007,0.262)
(0.01,0.1,0.01)	(0.193,5.521)	(0.006,0.161)
(-0.01,-0.1,-0.01)	(0.192,5.492)	(0.004,0.107)
(0.01,0.01,0.1)	(0.095,2.670)	(0.002,0.015)
(-0.01,-0.01,-0.1)	(0.094,2.662)	(0.002,0.033)
(-0.1,-0.1,-0.1)	(0.278,7.898)	(0.003,0.073)
(-0.3,-0.3,-0.3)	(0.833,23.692)	(0.004,0.083)

4　结论

在传统估计算法的基础上提出了一种增广脉冲星方位误差估计算法,该算法将脉冲星的方位误差及卫星的位置误差标量作为状态量,通过脉冲星导航原理的变相应用,利用已知的卫星导航信息估计出当前脉冲星方位数据存在的误差。本算法为了满足观测性条件及计算量要求,将增加的状态量选为卫星的位置误差标量,保证方位误差的估计精度,舍弃增广状态的估计精度。通过仿真结果表明,增广估计算法在仿真包含的所有极端方向位置误差条件下估计精度均高于传统算法。

参考文献(References)

[1]　Sala J, Urruela A, Villares X, et al. Feasibility study for a spacecraft navigation system relying on pulsar timing

information [R]. Spain: ESA, 2004.

[2] Sheikh S I. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation [D]. Maryland, USA: University of Maryland, 2005.

[3] Hanson J E. Principles of X-ray navigation [D]. Stanford, USA: Stanford University, 2002.

[4] 孙守明. 基于X射线脉冲星的航天器自主导航方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
SUN Shouming. Study on autonomous navigation method of spacecraft based on X-ray pulsar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[5] 刘劲. 基于X射线脉冲星的航天器自主导航方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
LIU Jin. X-ray pulsar-based spacecraft autonomous navigation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[6] 王奕迪, 郑伟, 孙守明, 等. 考虑系统偏差的脉冲星守时算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(2): 12 – 16.
WANG Yidi, ZHENG Wei, SUN Shouming, et al. Algorithm for the pulsar timing system with the system bias [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 12 – 16. (in Chinese)

[7] 朱新颖, 李春来, 张洪波. 深空探测VLBI技术综述及我国的现状和发展[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1893 – 1898.
ZHU Xinying, LI Chunlai, ZHANG Hongbo. A survey of VLBI technique for deep space exploration and trend in China current situation and development [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1893 – 1898. (in Chinese)

[8] 李敏, 张迎春, 耿云海, 等. 鲁棒EKF在脉冲星导航系统中的应用[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1305 – 1315.
LI Min, ZHANG Yingchun, GENG Yunhai, et al. A robust extended Kalman filter algorithm for X-ray navigation system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1305 – 1315. (in Chinese)

[9] Ning X L, Gui M Z, Fang J C, et al. Differential X-ray pulsar aided celestial navigation for Mars exploration [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 62: 36 – 45.

[10] Xiong K, Wei C L, Liu L D. Robust multiple model adaptive estimation for spacecraft autonomous navigation [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42: 249 – 258.

[11] 孙守明, 郑伟, 汤国建. X射线脉冲星星表方位误差估计算法研究[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(2): 57 – 60.
SUN Shouming, ZHENG Wei, TANG Guojian. A new estimation algorithm of the X-ray pulsar position error [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2010, 29(2): 57 – 60. (in Chinese)

[12] Emadzadeh A A, Speyer J L. X-ray pulsar-based relative navigation using epoch folding [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 47(4): 2317 – 2328.

[13] 毛悦, 宋小勇. 脉冲星时间模型精化及延迟修正分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(5): 581 – 584.
MAO Yue, SONG Xiaoyong. Accurating and delay correction analysis of pulsar timing model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 581 – 584. (in Chinese)

[14] Goshen-Meskin D, Bar-Itzhack I. Observability analysis of piece-wise constant system part Ⅰ: theory [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics systems, 1992, 28(4): 1056 – 1067.

[15] Goshen-Meskin D, Bar-Itzhack I. Observability analysis of piece-wise constant system part Ⅱ: application to inertial navigation in-flight alignment [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics systems, 1992, 28 (4): 1068 – 1075.

[16] 帅平, 陈绍龙, 吴一凡, 等. X射线脉冲星导航技术研究进展[J]. 空间科学学报, 2007, 27(2): 169 – 176.
SHUAI Ping, CHEN Shaolong, WU Yifan, et al. Advance in X-ray pulsar navigation technology [J]. Chinese Journal of Space Science, 2007, 27(2): 169 – 176. (in Chinese)