

基于脉冲星的航天器定位算法

吴萌, 刘劲, 马杰, 田金文

WU Meng, LIU Jin, MA Jie, TIAN Jin-wen

华中科技大学 图像所 多谱信息处理技术国家重点实验室, 武汉 430074

Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence State Key Laboratory for Multi-spectral Information Processing Technologies, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

WU Meng, LIU Jin, MA Jie, et al. Spacecrafts' position determination algorithm based on pulsar. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(1): 203-205.

Abstract: In order to improve precision of spacecrafts' position determination based on pulsar and reduce amounts of computation, a novel position determination algorithm based on pulsar is presented. In this method, 3 pulsars are selected to generate the possible ambiguity points, and new pulsars are used to eliminate ambiguity points until pulse period number is unique. Then, clock drift is eliminated by TDOA location technology. Finally, the least-squares method improves location precision. The simulation results show that calculation time is less than 4 ms in a tested sphere with radius of 300 000 km, and the requirement for real-time rendering can be satisfied. Moreover, this algorithm has high precision.

Key words: pulsar; location; pulse ambiguity point; Time Difference Of Arrival (TDOA)

摘要: 为了提高脉冲星空间定位精度和减少计算量, 提出了一种新的脉冲星定位算法。该算法先用三颗脉冲星产生脉冲模糊点, 再引入新的脉冲星消除脉冲模糊点直到脉冲整周数唯一。然后, 采用 TDOA 定位技术消除航天器时钟的漂移。最后, 利用最小二乘算法提高空间定位精度。实验结果表明, 在半径为 300 000 km 的球形试探范围内, 该算法处理时间小于 4 ms, 能较好地满足实时性的要求, 并具有较高的定位精度。

关键词: 脉冲星; 定位; 脉冲模糊点; 抵达时间差

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.01.060 **文章编号:** 1002-8331(2010)01-0203-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP309.2

1 引言

脉冲星是一种高速自转并具有强磁场的中子星, 具有稳定的脉冲周期。由于毫秒脉冲星能够同时提供时间和空间位置坐标, 并具有寿命长、稳定、可靠、不需要维修等优点, 近年来, 利用脉冲星网络的航天器导航系统的研究开发受到重视^[1]。不少学者已提出了利用脉冲星进行定时^[2-3], 定姿^[2-3], 定位^[4-6]的方法。

脉冲星定位是通过计算脉冲到达航天器时间与达到太阳系质心时间之差, 确定航天器在该脉冲星辐射方向上相对于太阳系质心的位移。而航天器只能测出 $[0, 1]$ 周之间的小数值, 脉冲整周数则需通过模糊点处理方法获得。除此之外, 测量脉冲到达时间时, 不可避免地会受到噪声干扰。针对以上问题, 已有学者提出了解决方案。Josep Sala 等人利用四颗脉冲星解算航天器的位置和时间, 然后通过比较得出的时间与原子钟时间来排除模糊点^[4]。谢振华等人则利用四颗脉冲星中的任意三颗解算航天器位置, 再通过计算这四个位置的方差来排除模糊点^[5]。这两种方法均采用最大似然估计提高定位精度。但是, 这些算

法存在着两个问题未能很好解决。(1)模糊点处理的实时性问题。用至少四颗脉冲星的所有模糊点进行组合来排除模糊点, 使得搜索空间较大, 并且单个模糊点处理的计算量也较大, Josep Sala 等人的方法中有四维矩阵运算, 谢振华等人的方法需计算四次位置。这将导致解算速度较慢, 影响了空间定位的实时性。(2)噪声模型。将脉冲星定位噪声作为高斯白噪声处理, 而实际情况较为复杂, 噪声模型及其参数不易准确获得。在实际情况中, 最大似然估计算法的定位精度将会受到影响。

为此, 先采用三颗脉冲星产生脉冲模糊点, 通过第四颗脉冲星判断模糊点是否合理来消除模糊点, 若模糊点不唯一则引入新的脉冲星。这样可将模糊点搜索空间从四维降低到三维, 减少了模糊点处理算法的计算量。然后, 利用 TDOA (Time Difference Of Arrival) 技术消除航天器时钟漂移。因最小二乘算法无需噪声的先验知识, 并且在不同噪声条件下都具有较好的性能, 故采用最小二乘算法消除其他噪声的影响以提高脉冲星定位精度。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AAJ109); 航空科学基金(No.20070818001)。

作者简介: 吴萌(1981-), 男, 博士生, 研究领域为组合导航; 刘劲(1981-), 男, 博士生, 研究领域为模式识别, 基于脉冲星的导航方法; 马杰(1973-), 男, 博士后, 副教授, 研究领域为组合导航方法研究; 田金文(1960-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究领域为组合导航, 遥感信息处理。

收稿日期: 2008-12-29 **修回日期:** 2009-02-16

2 脉冲星定位原理

脉冲星定位一般在太阳系质心坐标系中进行,将航天器观测得到的脉冲到达时间(Time Of Arrival, TOA)转换到太阳系质心,设 t 为航天器测得的 TOA 值,脉冲到达太阳系质心的时间为 t_b 。

$$t_b = t + \frac{ur}{c} - \frac{1}{2cd} [r^2 - (ur)^2] + \Delta C - \frac{D}{2} - \frac{2GM_\theta}{c^3} \ln(r-ur) + \frac{1}{2} \nu p \quad (1)$$

其中, u 为太阳系质心至脉冲星的单位矢量, r 为太阳系质心到航天器的矢量, C 为光速, d 为脉冲星的距离,第二、三项之和被称为 Roemer 延迟。 ΔC 为航天器原子钟的偏差。第五项为信号经过星际介质的色散延迟,其中 D 为色散常数, ν 为射电观测频率。第六项是 Shapiro 延迟,其中 G 为引力常数, M_θ 为太阳质量。最后一项是 Einstein 延迟,其中 ν 为地球公转速度矢量, ρ 为脉冲星信号传播方向矢量。第三至第七项中的 r 在求解过程中可以认为已知。

从式(1)可以看出,脉冲星定位的关键就是准确得出脉冲到达航天器时间与到达太阳系质心时间之差。航天器上的脉冲探测器只能测出 $[0, 1]$ 周之间的小数值,而脉冲整周数则需根据先验知识,利用模糊点处理算法解算才能得出。脉冲到达太阳系质心时间与其到达航天器时间之差可表示为这两部分之和。

$$t_b - t = mT + \Delta T \quad (2)$$

其中, m 为脉冲整周数, T 为脉冲周期, ΔT 为脉冲探测器测得的相位延迟对应的时延。

3 脉冲模糊点处理

在脉冲星空间定位技术中,航天器只能测量脉冲相位的小数部分,而无法测量脉冲整周数 m 。因此,需要根据先验知识和航天器测得的多颗脉冲星相位来确定脉冲整周数。对于 N 颗脉冲星,其脉冲整周数为 $m = [m_1, m_2, \dots, m_N]^T$ 。若航天器在 t 时刻的位置是在半径为 R 的球形区域内,由此可估计出 m 的所有可能值。若存在模糊点,三维定位时至少需要 4 颗脉冲星才能解算出航天器的位置。文献[4]和[5]均选取 4 颗脉冲星的所有模糊整周数进行组合,计算量较大。为减少计算量,首先选取 3 颗脉冲星产生模糊点,用第四颗脉冲星判断该模糊点是否合理,若不合理则将模糊点去除。

脉冲星定位模型可简化如下:

$$m_i T_i + \Delta T_i = \frac{u_i r}{C} + p_i + w_i \quad (3)$$

其中, $m, T, \Delta T, u, r, C$ 与式(1)、(2)中定义相同。 p 为 Roemer 延迟,原子钟修正,色散延迟,Shapiro 延迟和 Einstein 延迟之和,由于在半径为 R 的球形试探范围内这些延迟变化微小,可近似为常数。 w 为噪声。下标 i 表示脉冲星序号。

算法具体步骤如下:

(1)对三颗脉冲星所有可能整周数 $[m_1, m_2, m_3]^T$ 进行组合。对每一种组合,根据式(3)计算估计值 \hat{r} 。

(2)将 \hat{r} 代入第四颗脉冲星定位公式中,然后计算整周期 \widehat{m}_4 和小数部分 $\widehat{\Delta T}_4$ 。

$$\widehat{m}_4 = \left\lfloor \frac{\frac{u_4 \hat{r}}{C} + p_4 + w_4}{T_4} \right\rfloor \quad (4)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

$$\widehat{\Delta T}_4 = \frac{u_4 \hat{r}}{C} + p_4 - \widehat{m}_4 T_4 + w_4 \quad (5)$$

(3)如果该脉冲模糊点满足以下两个条件中的任意一个,则排除该模糊点。

如果估计值 $\widehat{\Delta T}_4$ 与测量值 ΔT_4 相差较大,即式(6)和式(7)均不成立,则排除该模糊点。

$$|\widehat{\Delta T}_4 - \Delta T_4| < Th \quad (6)$$

$$T_4 - |\widehat{\Delta T}_4 - \Delta T_4| < Th \quad (7)$$

其中, $|\cdot|$ 表示取绝对值。 Th 为门限,视噪声水平而定。

如果 \hat{r} 超出可能范围,即模糊点不在球形试探范围内,则排除该模糊点。

(4)如果经过第四颗脉冲星处理后,仍存在模糊点,则引入新的脉冲星,重复上述工作,直到消除模糊点为止。

从以上算法步骤可以看出,在试探空间元素个数方面,该

文算法的个数为 $\prod_{i=1}^3 \lceil 2R/(T_i C) + 1 \rceil$,比文献[4]和[5]所提算法的

个数 $\prod_{i=1}^4 \lceil 2R/(T_i C) + 1 \rceil$ 少。该算法搜索空间元素个数与文献[4-

5]的个数比值为 $1/\lceil 2R/(T_4 C) + 1 \rceil$ 。在处理单个元素方面,文献[4]方法采用四维矩阵解算空间位置和时间,文献[5]方法需计算四次位置,再求这四个位置的方差。而该算法处理单个试探元素的计算量较小,仅有一次用三维矩阵解算位置。这样,有效地提高了解算速度,可较好满足航天器定位处理实时性的要求。

4 TDOA 定位算法

经过较长时间后,航天器时钟会发生漂移。如果漂移较大,就会造成伪距,从而降低了脉冲星定位精度。为减小这种影响,采用 TDOA 替代 TOA 技术。这样定位精度将不会受航天器时钟偏差的影响。具体如下:

为便于分析,将 Roemer 延迟,原子钟修正量,Shapiro 延迟和 Einstein 延迟和色散延迟记为 p ,时钟漂移为 δ ,其他噪声为 n 。那么 N 颗脉冲星的观测公式如下:

$$t_{b_i} - t_i = \frac{u_i r}{C} + p_i + \delta + n_i \quad (8)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$ 。

从公式(8)可以看出,定位精度会受到噪声 n 和时钟漂移 δ 的影响。对于不同脉冲星,噪声 n_i 可认为相互独立,而航天器原子钟漂移 δ 则是相同的。

基于 TDOA 的脉冲星定位技术是以一颗脉冲星为参考,通过计算其他脉冲星与该脉冲星的到达时间差来定位。如式(9)所示:

$$t_{b_i} - t_1 - t_{b_1} + t_1 = \frac{(u_i - u_1) r}{C} + p_i - p_1 + n_i - n_1 \quad (9)$$

其中, $i=2, 3, \dots, N$ 。

从式(9)可以看出,脉冲星的定位与时钟漂移无关。因此,定位精度不会受到 δ 的影响。若要进行三维定位,至少需要四颗脉冲星。从表面上看这增加了航天器负载。而实际上,航天器需要至少四颗脉冲星才能进行模糊点解算,因此,TDOA 技术没有额外增加航天器负载。

5 脉冲星定位算法

航天器可测量脉冲到达时间的相位差余值,而脉冲整周数则需要通过模糊点处理方法来确定。星载时钟漂移可采用 TDOA 技术予以消除。具体算法如下:

(1)模糊点处理。根据先验知识和航天器测量得到的脉冲相位,采用该文所提模糊点处理方法消除脉冲模糊点。

(2)TDOA 定位技术。根据模糊点处理得到的结果,通过计算不同脉冲星的脉冲到达时间差来进行航天器空间定位。

(3)最小二乘估计。最小二乘估计可在无先验知识的条件下能获得较好的估计值。因此,在脉冲到达时间差确定之后,利用最小二乘法融合多颗脉冲星的差分定位信息得出航天器位置。

6 仿真结果

为验证算法的有效性,选取脉冲星 J1513-5908,J1617-5055,J0534+2200,J0437-4715,J0540-6919 作为导航脉冲星。这五颗脉冲星的具体参数如表 1 所示。定义航天器所处位置为半径 3×10^5 km,中心距离太阳系质心为 149 306 000 km,RAJ 分别为 120° ,DECJ 为 10° 的球。航天器实际位置为距离 SSB 为 149 315 215 km,RAJ 为 $120^\circ 1'$,DECJ 为 $10^\circ 1'$ 。星载时钟漂移为 $1 \mu\text{s}$,其他噪声之和为均值为 0,方差为 $(2 \mu\text{s})^2$ 的高斯白噪声。

表 1 脉冲星参数

pulsar	RAJ/(h:m:s)	DECJ/(d:m:s)	T/s
J1513-5908	15:13:55.6	-59:08:09.0	0.150 657 551
J1617-5055	16:17:29.3	-50:55:13.2	0.069 356 847
J0534+2200	05:34:31.9	+22:00:52.1	0.033 084 716
J0437-4715	04:37:15.8	-47:15:08.8	0.005 757 452
J0540-6919	05:40:11.2	-69:19:53.9	0.050 498 818

仿真实验首先验证该文所提模糊点处理方法的性能。门限 Th 取 0.000 1 s。为减少计算量,从这五颗导航脉冲星中选取脉冲周期最长的三颗脉冲星(J1513-5908,J1617-5055,J0540-6919)产生脉冲模糊点,再用脉冲星 J0534+2200 去除模糊点,获得满足定位门限的空间位置有 5 个,最后用脉冲星 J0437-4715 判断剩余模糊点的合理性,获得唯一的空间位置。

表 2 脉冲模糊点处理算法实验结果

	该文算法	文献[4]算法	文献[5]算法
脉冲星	J1513-5908	J1513-5908	J1513-5908
	J1617-5055	J1617-5055	J1617-5055
	J0540-6919	J0540-6919	J0540-6919
		J0534+2200	J0534+2200
模糊点数	18 450	114 390	114 390
运行时间/s	0.032 782	242.892 790	270.663 574

用主频 1.7 GHz 的微机,在 Windows XP 环境下,用 Matlab 7.1 对该文算法与文献[4]和[5]中模糊点处理算法进行比较,实验结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,该文算法的搜索空间较小,仅为文献[4]

和[5]的 $1/62$,而且单个模糊点的处理较为简单。这样总的处理时间也较短,仅几毫秒,能很好地满足航天器定位实时性的要求。

最后,验证该文算法的空间定位精度。对该文脉冲星定位算法和文献[4]和[5]所提基于最大似然估计的定位算法进行了 10 000 次仿真。在 X, Y 和 Z 轴方向的定位误差均值如表 3 所示。

表 3 X, Y 和 Z 轴方向定位误差均值

	本文算法	最大似然估计
X 误差均值/m	-11.982 3	-959.867 8
Y 误差均值/m	1.837 0	481.529 6
Z 误差均值/m	0.414 4	-243.387 5

航天器时钟漂移($1 \mu\text{s}$)给 X, Y 和 Z 轴方向造成的空间定位误差分别为 $-979.940 7$ m, $485.869 1$ m, $-243.260 3$ m。从表 3 可以看出,文献[4]和[5]中的最大似然估计较好地消除了高斯白噪声对定位精度的影响,但没有消除时钟漂移,各个方向上的定位误差均值基本上是由时钟漂移造成的,因而定位精度不高。而该文算法因采用了 TDOA 技术和最小二乘估计,有效地消除了时钟漂移和高斯白噪声的影响,定位精度得到了极大的提高。

7 结论

提出了一种新的脉冲星定位方法,包括快速模糊点处理方法,基于 TDOA 和最小二乘算法的定位技术。利用三颗脉冲星产生脉冲模糊点,再利用其他脉冲星消除模糊点,有效地减少了模糊点的数量。并且处理单个模糊点的计算量也较小,提高了计算速度,能较好地满足航天器解算实时性的要求。采用 TDOA 技术消除了星载时钟漂移,并用最小二乘算法估计航天器位置,这样在噪声模型和参数未知的情况下也能达到较高的定位精度。基于智能技术的脉冲模糊点处理技术可作为下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] Sheikh S I, Pines D J, Ray P S, et al. Spacecraft navigation using X-ray pulsars[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(1): 49-63.
- [2] Harson J E. Principle of X-ray navigation[D]. Dept of Aeronautics and Astronautics, Stanford Univ, Stanford, CA, 1996.
- [3] Sheikh S I, Pines D J, Ray P S, et al. The use of X-ray pulsars for spacecraft navigation[J]. Advances in the Astronautical Science, 2005, 119: 105-119.
- [4] Sala J, Urruela A, Villares X. Feasibility study for a spacecraft navigation system relying on pulsar timing information[R]. ARIADNA Study 03/4202, 2003.
- [5] 谢振华, 许录平, 倪广仁. 基于最大似然的 X 射线脉冲星空间定位研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1605-1608.
- [6] 帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X 射线脉冲星导航原理[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1538-1543.