

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311801

用脉冲星的脉冲序号复现坐标时方法

刘民¹, 童明雷², 平劲松³, 刘文彪⁴, 方海燕⁵, 周庆勇⁶, 帅平⁷, 何克亮⁸

- (1. 北京东方计量测试研究所 北京 100094; 2. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 3. 中国科学院国家天文台 北京 100101; 4. 北京师范大学物理学系 北京 100875; 5. 西安电子科技大学空间科学与技术学院 西安 710126; 6. 西安测绘研究所 西安 710054; 7. 钱学森空间技术实验室 北京 100190; 8. 中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

摘要:为实现包括地球和地球以外的时间统一,需要运用相对时间观的两种时间来替代目前时间计量体系中的标准时间,这两种时间分别是:原时和坐标时,其中坐标时可溯源到脉冲星时间基准上。为构建简单的本地轨道参数历表,阐明分层嵌套的空间包含关系,形成时间相对统一的观点。从计量角度,提出了一种脉冲星复现坐标时的理论,运用相对时间观中的时间和空间不可分割观点,归纳了统一时间的广域坐标系所必须具备的基本特征,强调了原点观者的特殊性,提出了基于原点观者的脉冲星脉冲序号和初始历元的定义方法。首先,把一组脉冲星的脉冲序号约定为坐标时基准,用来复现坐标时,约定一组脉冲星的脉冲周期为固定的常数数组,约定后不再测定,常数的单位仍是国际单位制[秒],常数可理解为脉冲序号的坐标时间隔与[秒]之间换算的系数。然后,基于平面电磁波模型,把脉冲星的脉冲电磁波经过原点的时刻与脉冲序号一一对应,于是原点观者的坐标时与连续的脉冲序号成为线性函数关系,最后,分析了脉冲星稳定特点,给出了以一组序号为变量的脉冲星集合稳定性判据。

关键词:脉冲星;原时;坐标时;脉冲序号;空间守时系统;空间计量

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.1099

To re-build coordinate time by means of pulse sequence number from pulsar

Liu Min¹, Tong Minglei², Ping Jinsong³, Liu Wenbiao⁴, Fang Haiyan⁵, Zhou Qingyong⁶, Shuai Ping⁷, He Kelian⁸

- (1. Beijing Orient Institute of Metrology and Test, Beijing 100094, China; 2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China; 6. Xi'an Institute of surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 7. Qian-Xueshen Space Technology Lab, Beijing 100190, China; 8. Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: To unify time on and out of the Earth, the viewpoint of relative time changes the time metrology standard from a unique standard time to two kinds of time: proper time and coordinate time, in which coordinate time can be traced to benchmark by pulsars. For the aim to build the ephemeris of orbit parameters simply locally, it is pointed out that the relationship of space inclusions is hierarchically nested, and the viewpoints of relative unification of time are formed. It deeply demonstrates the theory of coordinate time rebuilt by pulsars, summarizes the basic characteristics of a wide area coordinate system that unifies time must have, emphasizes the particularity of the original observer, and puts forward the definition method of pulsar's sequence number and initial epoch based on the original observer, using the view that time and space are indivisible in the relative time view. First of all, to arrange a set of pulsar pulse signal as primary standard of the coordinate time, used to rebuild the coordinate time, convention a set of pulse period of pulsars for fixed constant array, no longer measuring after convention, the constant unit is still the international system of units[seconds], constant can be understood as the pulse number coordinate time interval and conversion coefficient between[seconds]. Then, based on the plane electromagnetic wave model, corresponding to the time when the pulse electromagnetic wave of the pulsar passes through the origin and

the pulse sequence number one by one, so the coordinate time of original observer and continuous pulse number become linear function relationship. Finally, analyzes the pulsar stability characteristics, and given pulsar set stability criterion by the arguments of a set of sequence number.

Keywords: pulsar; proper time; coordinate time; pulse sequence number; space timekeeping system; space metrology

0 引言

当前地球上的时间维持规则采用“中心守时,局域授时”的模式,认为标准时间是唯一的;授时信号能够跨越不同空间,使得用户时间设备与标准时间同步。这个规则认为地球上标准时间是均匀流逝的,用户时钟与标准时间的差被视为钟差^[1]。用户与授时信号如果不同步,则被视为时间尺度变换问题,应修正时间单位(或秒长,或时间尺度),这就是当前时间计量正在进行的工作^[2]。此观点正是典型的绝对时间观^[3]。2021年中国科学技术协会推出的重大科学问题“地球以外有统一的时间规则吗?”向绝对时间观提出了挑战^[4],认为地球以外跨越不同坐标系,应采用“局域原时,全域坐标时”的模式来统一时间;提出了相对时间观,认为标准时间不是唯一的。时间规则应还原到广义相对论的两种时间上,即原时和坐标时,把时间和空间联系起来,约定坐标系,运用轨道参数,以实现广域的时间统一。虽然国际天文联合会(The International Astronomical Union, IAU)给出了地球时间与各种坐标时转换的算法和一些线性变换常数^[5],例如大地水准面时间(terrestrial time, TT)到地心坐标时(geocentric coordinate time, TCG),TCG再到太阳系质心坐标时(barycentric coordinate time, TCB)的转换关系^[6],但是IAU决议仅仅适用于地球上的观者,不适用于地球以外的观者,是坐地观天的特例^[7]。本文将突破地球的限制,把观者放到地球以外,从太阳系行星际的其他行星或航天器上观测脉冲星;运用广义相对论的原时和坐标时概念,把观者的轨道参数作为已知量,计算脉冲星的脉冲到达坐标系原点的时间;进一步地给计时脉冲星的每个脉冲赋予顺序编号,通过序号的关联表达坐标时;用多颗脉冲星的序号之间的关系检验脉冲周期的稳定性,让脉冲序号复现坐标时。原点观者的坐标时是统一本坐标系内时间的参考基准,各个非原点观者只有把自己的原时换算到原点观者的坐标时上才能相互比较时间^[8]。惯性坐标系上有两类特殊的点,一类点是坐标系原点,另一类是无穷远点。脉冲星可被观者群内的观者认为是近似无穷远点,因此脉冲星可作为观者群内复现坐标时的物理时钟^[9-10]。按分层嵌套的关系划分观者群是统一空间的基本要求,先统一空间,然后再统一时间。

为方便理解,本文假设理想的广域坐标系模型,不

失一般性考虑一种相对简单的场景,采用爱因斯坦引力场方程的史瓦西解所描述的模型,仅考虑质量球对称,静态,质量分布在有界的范围内,界外为真空的情况^[11]。球对称和静态的性质,说明了质心处的引力势为0,因此广域坐标系的原点也指定在质心处。

1 坐标系和原点观者

1.1 广域坐标系

相对论理论认为时间和空间不可分割。同时性仅在同一个坐标系内有定义,不同坐标系之间没有同时性^[12]。统一时间的前提是统一空间。只有指定一个包含各个局域坐标系的广域坐标系(以下坐标系均指三维空间坐标系),才能在各个局域观者之间形成一致认同的时空参考。如太阳系质心参考系包含了太阳系引力势范围内所有观者。本文经常提到的“观者”,是“观测者”的简称,是指包括位于坐标系原点、空间守时子系统、局域守时系统、以及时间用户系统等空间位置处的观测者,观者是统一时间的主体。所选定的广域坐标系有以下3个特点:

1)方向约定。它是一种近似不旋转的坐标系,所有观者都定义作为参照物的脉冲星,是约定的方向参考,例如太阳系内的观者,做轨道运动情况下,需进行观测位置归算,补偿自己的视差和光行差影响后才能得到约定的脉冲星方向^[13]。

2)空间包含。空间包含是指有这样一群观者,他们为了统一时间而构成一个系统,该系统包含观者轨道内及其邻近空间的质量,观者们的轨道都定义在同一个坐标系内,并且坐标原点在系统的质心上,例如太阳系全部质量的中心,太阳系内的观者空间位置都能在太阳系质心坐标系内唯一地表达,不同观者的轨道参数历表所指的坐标原点是同一个空间点。此坐标系内的所有观者都认同距离坐标原点非常远的脉冲星位于近似无穷远点,脉冲星的质量不包含在本系统内,例如太阳系内的观者认为太阳系全部质量的引力场在脉冲星位置处近似为0。

空间“包含”与“不包含”是理解空间统一的关键,例如地球附近的观者以地球质心为原点,统一坐标时的情况,不包含太阳和月球的质量,这种“包含”与“不包含”也划分出了统一时间的观者范围,或称“观者群”。在广义相对性原理中“任何坐标系都是平权的”,如何理

解“平权”思想,是指把坐标系之间“包含”与“不包含”的关系作为条件,来判别“物理规律形式不变”与“变”的差别。统一时间和空间,首先要分清被统一的对象和无需关注的对象。

坐标时不只有一个。相对时间观所理解的坐标时,与所选择的坐标系一样,也是相对的。例如地球附近的观者选择地心坐标系,以地球质心为坐标原点得到轨道参数历表1,同一个观者,若选择地月系(包含地球和月球的)质心坐标系,以地月质心为原点得到轨道参数历表2,仍是同一个观者,若选择太阳系质心坐标系,以太阳系质心为坐标原点得到轨道参数历表3,那么对应着轨道参数历表1、2、3就会有3种坐标时,于是就有3个观者群,分别是认同地球质心为坐标系原点的观者群,和认同地月系质心为坐标原点的观者群,以及认同太阳系质心为坐标系原点的观者群,3种观者群都有各自不同的坐标时,也都能用脉冲星复现各自不同的坐标时,进而统一各个群内的时间。3种坐标时的不同之处,一是脉冲星周期不同,二是脉冲轮廓不同。究其原因,同一个观者分别用轨道参数历表1、2、3代入式(1),当原时由SI秒定义和铯原子钟复现时,式(1)右边的坐标时 t ,也用SI秒为单位,因轨道参数不同而不同,进而影响到被测的脉冲星轮廓和周期也不相同。

坐标时的存在既是客观存在,也是非客观存在。从全局观者群来看,坐标时是客观的,是群内所有观者共同认知的,也是组织起观者群的基础。从某一个局域上的观者来看,坐标时却又是非客观的,坐标时不可测量,只能通过原时和历表计算获得,历表不同,则坐标时和参考的坐标系原点也不同,坐标时也就不同,或者说坐标时依赖于观者而不独立。广域是相对于局域而言的,表示坐标系分层包含的关系,坐标系的分层嵌套是宇宙普遍现象,合理的分层嵌套关系能让轨道参数历表更加简洁,周期性更加简单。

原点观者的特殊性。位于坐标原点的观者是一个特殊的假想观者,简称为原点观者,他有如下特点:1)其他非原点观者很容易通过其轨道参数历表联系到原点观者,他是空间参考基准点。2)原点观者的时间可被约定为坐标系内统一时间的参考,称为坐标时,他是时间参考基准,非原点观者可通过式(1)和轨道参数历表,将原时换算为坐标时。3)从原点观者的角度观测到的多颗脉冲星的脉冲信号是稳定的,脉冲周期是可观测,且周期的相互比值在一定范围内稳定,是集合稳定参考点(见第3章)。当坐标系有多级分层嵌套的结构时,原点观者是相对的,不只有一个,存在广域和局域的空间包含关系,每个原点观者的坐标时即是本层内观者的统一时间,又是近上一层坐标系内的局域原时。

1.2 脉冲星与非原点观者

近似无穷远处的脉冲星的原时与坐标时相等,观者们都认同脉冲星处的时钟的相对论效应近似为0,从史瓦西度规表达的原时与坐标时关系式(1)可知,当引力势 U 和相对于原点线速度 V 都为0时,坐标时等于原时^[14-15]。

$$\Delta t = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta\tau} \left(1 + \frac{U}{c^2} + \frac{V^2}{2c^2} \right) d\tau \quad (1)$$

式中: t 为坐标时; τ 为原时; Δt 为坐标时轴上的时间间隔, $\Delta\tau$ 为原时轴上的时间间隔,以SI秒为单位; U 为时钟在 τ_0 时刻所处位置上的引力势; V 为时钟在 τ_0 时刻所处位置上相对于坐标系原点的线速度; c 为光速常数,以m/s为单位。

史瓦西度规是简化了质量分布的理想情况^[16],所以式(1)不适用于质量分布界面以内的情况, U 和 V 都是与坐标变量有关的参数,合称为轨道参数。把轨道参数,如位置、速度、引力势排列成一个以本地原时 τ 或者坐标时 t 为时间索引的二维数据表格,称为本地轨道参数历表或坐标时轨道参数历表,其位置和速度在广域坐标系内的周期性,称为公转周期。可见公转周期也有两种表达方式,本地原时和坐标时,可以通过式(1)进行换算。

非原点观者用本地原时为参考进行等间隔采样,测量脉冲星的脉冲轮廓和脉冲周期,因为不同局域的相对论效应影响不同,原时不能直接比较,因此所测量的脉冲轮廓和脉冲周期也不能直接比较,需经过两次时间轴变换^[17],再把本地测量的脉冲星数据归算到原点观者的位置上,换成从原点观者的视角,才能相互比较脉冲星的测量结果,时间轴转换算法在3.3节中提示,可见轨道参数历表在脉冲星数据处理中发挥关键作用。

1.3 原点观者与时空统一

原点观者是运用相对时间观实现时间和空间统一的关键点。每个观者通过轨道参数历表与原点观者发生联系,又把独立测量的脉冲星物理信号换算到原点观者的坐标时时间轴上,在原点观者的时间轴上比较各自独立测量的脉冲星轮廓和周期,在这个过程中实现时间的统一。若不同位置上的观者们都能用他们本地的原时和遥远的脉冲星作为输入,独立地测得原点观者能看到的脉冲星数据,而且不同观者的测量数据比较一致,或在约定的偏差范围以内,就实现了这些观者群内部的时间统一。

相对时间观进一步发展,认为“时空统一”,“原点观者”,“广域坐标系”这些概念都是相对的,不存在超越所有坐标系的绝对单一的时空统一。当坐标系有多级分层嵌套的结构时,原点观者是相对的,不只有一个,存在广域和局域的空间包含关系,每个原点观者的坐标

时既是本层内观者的统一时间,又是近上一层坐标系内的局域原时。合理地使用坐标系“空间包含”与“空间不包含”的多级分层嵌套方法,最终能解决不同层级之间的时间统一问题。观者群 A 空间包含在同一个坐标系内有统一的坐标时,他们约定的脉冲星周期,和序号规则仅用于处理 A 群内部的时空统一问题。同理,也有观者群 B 约定脉冲星周期和序号规则,即使 A 和 B 测量的脉冲星是同一个的物理对象, A 与 B 所约定的周期和序号也是不同的。A 要和 B 统一时间,就必须再找到空间包含 A 和 B 的坐标系 C,让 A 和 B 在 C 的原点观者那里约定脉冲星周期和序号。此时 A 和 B 在各自观者群内部的各自的坐标时,被 C 的原点观者看作为局域上的原时,即 A 群原点观者的原时,和 B 群原点观者的原时。

2 用脉冲星复现坐标时

2.1 脉冲序号与坐标时

在广域坐标系中无穷远点时钟测量的原时等于坐标时,让近似无穷远处的脉冲星发出的周期性的电磁波信号成为复现坐标时的物理信号。脉冲星的运动规律是客观的,惯性稳定性是脉冲稳定的内因,不因为观者的不同而不同,因此可作为不同于量子跃迁原理的时钟。于是,时间计量领域要接纳一种新的机理的时间基准,与铯原子定义的时钟不同之处在于如下几方面:

1) 内在规律不同:微观量子稳定性,与宏观惯性稳定性。

2) 相对论效应影响不同:铯原子钟只能测量原时,受相对论效应影响,脉冲星只能测量坐标时,原点观者的坐标时无相对论效应影响。

把脉冲星的脉冲信号作为坐标时的物理信号,需要给每个脉冲赋予唯一的序号,再用连续的序号表示坐标时的流逝。在原点观者坐标时的时间轴上标记连续的序号,如同用铯原子钟在大地水准面上复现的 SI 秒,在原时坐标轴上标记以秒为刻度的时间,每一秒的编号都必须是连续不重复,不跳越的,再结合本地历法规则,再将这些连续的秒累计成为更大的时间单位,如分钟,小时,以及某天体周期单位等,以方便用户使用。

脉冲星的脉冲轮廓,在时间坐标轴上有严格的对应关系,但是实际测量却不是时域采集信号那么简单,单脉冲采集是得不到轮廓的,需要经过大量历史信号的数学处理才能把轮廓对应到时间坐标轴上^[18-19],脉冲轮廓的连续,不跳越的特点,是脉冲序号与时间的对应的基础。

当脉冲星被用作复现坐标时的时间基准后,脉冲星的周期就不是由测量获得的,而是由约定确定的,这相当于测定脉冲星模型参数之后,约定各颗脉冲星模型参

数的参考历元,但是计量要求,只有约定在原点的位置处,出现的序号和历元,才能算作脉冲事件。这就像 SI 秒的定义^[20],1967 年第 13 届国际计量大会之前,铯原子 133 超精细能级跃迁辐射的电磁波频率是测量获得的,当铯频率常数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 约定为固定数值,无需测量确定后,SI 秒单位可直接用铯原子钟复现,铯原子钟的长期稳定性是约定的。同理,脉冲星的周期在确立为坐标时基准之前,需要由不同局域上的观者一起测量的,把一组脉冲星的脉冲序号约定为坐标时基准,用来复现坐标时,约定一组脉冲星的脉冲周期为固定的常数数组(或常数阵列),不需要再测量这些周期数值。从原点到某一颗脉冲星的方向上,脉冲信号在原点附近近似为平面电磁波,脉冲信号是以平面电磁波的形式传播的,该脉冲信号的平面电磁波经过原点的时刻,脉冲序号与原点观者的坐标时一一对应,这样把连续的脉冲序号映射为坐标时的刻度,脉冲周期常数的单位仍是 SI 秒,脉冲周期常数可理解为坐标时刻度间隔与 SI 秒单位之间换算的系数。

2.2 辩证地理解脉冲星的稳定性

不存在静止不变的事物,需要辩证的理解脉冲星周期稳定性。

1) 时间与空间不能分割。谈到时间必先定空间,不同位置的观者测量脉冲星,不能直接比较测量结果,只有归算到原点观者的视角上,才能比较脉冲星的周期^[21]。单独观者的测量结果包含着轨道参数的不确定性,不能判断被测脉冲星周期的稳定性。

2) 考虑轨道参数的影响。非原点观者换算脉冲星的周期时,需要多次用到轨道参数,例如 3.3 节 1) 中,用速度矢量来补偿多普勒效应;用引力势和线速度把原时换算到坐标时,用轨道位置计算脉冲方向的投影距离和到达时间的延迟。非原点观者的轨道参数稳定性和测量准确度 $\times 10^{-10}$ 量级,与遥远的脉冲星周期稳定性 $\times 10^{-19}$ 量级相比,哪个能被各处的观者们认同是更稳定的计量参考基准呢?不言而喻。

3) 没有绝对的稳定性。每一颗脉冲星都有从诞生到灭亡的变化过程,相邻的脉冲间隔存在漂移演化,包括非线性成分。但是总有变化缓慢的局部时段可被我们看作在允许偏差范围内的稳定性参考,这种稳定性来自于惯性运动的宏观稳定性,与电子跃迁能级的微观稳定性具有本质的不同。

4) 脉冲序号关系的稳定性。利用脉冲序号关系进行多颗脉冲星的相关计算,可以动态地检验单一脉冲星相对其他脉冲星的相对稳定性。稳定性是相对的,相对时间观告诉我们用铯原子钟和 SI 秒不能直接测量脉冲星的稳定性,然而,从原点观者的角度来计算多颗脉冲星的序号之间的关系,如式(2)所示,就可以相互比较多

颗脉冲星周期的稳定性,这就是第3部分将介绍的集合稳定性判据。

2.3 脉冲星的初始历元

使用序号做变量,首先要定义初始历元,历元就是历表中的时刻,初始历元是时间坐标轴的原点。脉冲星初始历元是指脉冲编号为0的脉冲到达原点观者 O_{SSB} 的时刻。

对于多颗脉冲星来说,初始历元是唯一的,此时每颗脉冲星的脉冲轮廓上指定特殊拐点作为初始相位,或者当特殊拐点不明显情况时,定义零相位点的模型,例如图1中的函数 $g(t)$ 。当确定了脉冲星的初始历元后,则后续到达原点观者 O_{SSB} 的脉冲都能用连续的脉冲序号标识。对于确定的脉冲星,其序号为 n (n 为整数) 的脉冲到达原点观者的时刻之间有确定的关系,即 $t = nT$, T 为脉冲周期,此关系对于不同观者来说都应该相同。

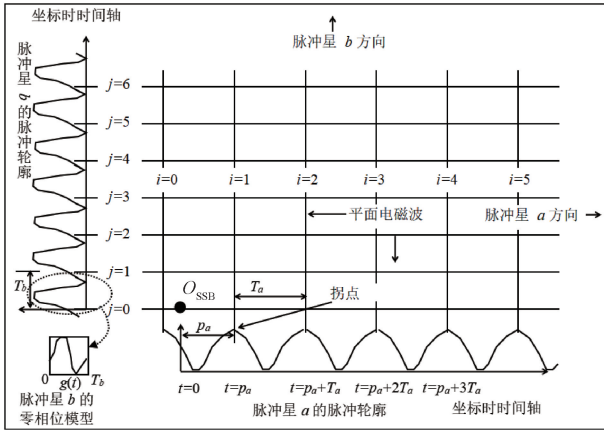


图1 脉冲星的初始历元

Fig. 1 The origin epoch of pulsar's pulse

3 脉冲星的集合稳定性判据

3.1 周期与序号的关系

约定多颗脉冲星的周期,对于特定坐标系内的观者群来说是集合稳定的常数,单位为SI秒。集合稳定是指从原点观者接收到的多颗脉冲星脉冲序号与脉冲周期的比例关系保持一定的现象,对于 k 颗脉冲星,集合稳定表达式为:

$$t_{oSSB} = n^{(1)}T_1 - p_1 + q_1(t) = n^{(2)}T_2 - p_2 + q_2(t) = \dots = n^{(k)}T_k - p_k + q_k(t) \quad (2)$$

其中, $k=1,2,\dots$ 表示命名或编号为1, 2, ..., k 的多颗脉冲星; t_{oSSB} 为原点观者的坐标时,单位为SI秒; $n^{(k)}$ 为命名为 k 的脉冲星脉冲到达原点的序号,为整数,上角标 (k) 表示命名,不是指数算符; T_k 为命名为 k 的脉冲星的周期,单位为SI秒; p_k 为命名为 k 的脉冲星脉冲

轮廓的初始相位,单位为SI秒; $q_k(t)$ 为整周期相位差,在 t_{oSSB} 同一时刻与命名为 k 的脉冲星整数脉冲已经到达 O_{SSB} 时刻之时间差,当 $n^{(k)}$ 进位事件发生时 $q_k(t) = 0$,且不大于1个周期值,即 $q_k(t) < T_k$,单位为SI秒;式(2)的图形化表示如图2所示。

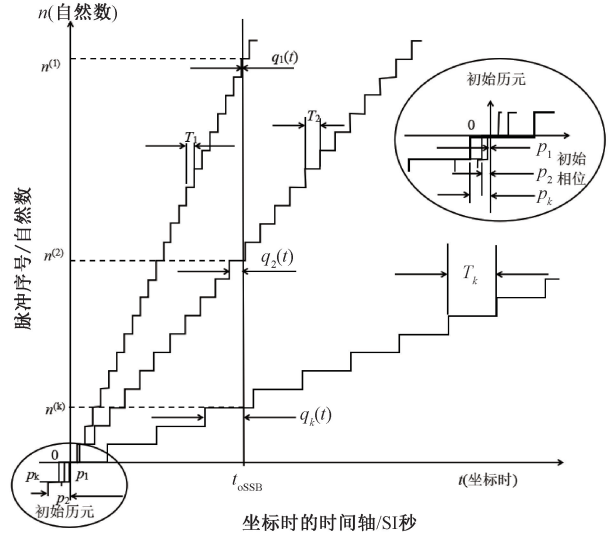


图2 脉冲星的脉冲序号与坐标时和初始历元的关系

Fig. 2 The relationship of pulsar's number and origin epoch

当初始历元定下来后,原点观者 O_{SSB} 上某一时刻,如 t_{oSSB} 时刻,比较每个序号 $n^{(k)}$,若按脉冲周期大小排序命名脉冲星编号,如: $T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_k$,发现序号的比值,如 $n^{(2)}/n^{(1)}$ 或 $n^{(k)}/n^{(1)}$,近似于脉冲周期的比值,如 T_1/T_2 或 T_1/T_k ,随着时间流逝,序号越来越大,初始相位 p_k 和 $q_k(t)$ 影响越小,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_2} &= \frac{n^{(2)}}{n^{(1)}} + \frac{-p_2 + p_1 + q_2(t) - q_1(t)}{n^{(1)}T_2} \\ \frac{T_1}{T_k} &= \frac{n^{(k)}}{n^{(1)}} + \frac{-p_k + p_1 + q_k(t) - q_1(t)}{n^{(1)}T_k} \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 集合稳定性判据

集合稳定要求当序号 $n^{(1)}$ 足够大时,所约定的周期比值如 T_1/T_2 或 T_1/T_k ,与原观点者测量的序号比值,如 $n^{(2)}/n^{(1)}$ 或 $n^{(k)}/n^{(1)}$,之差应小于规定的数值,例如 $2/n^{(1)}$,集合稳定判据的另一种表达方式如式(4)所示,判断是否应更换脉冲星,将不满足此要求的脉冲星从脉冲星集合中除去,替换成新的脉冲星,或者重新约定该脉冲星的周期修正值。

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_2} - \frac{n^{(2)}}{n^{(1)}} &= \frac{-p_2 + p_1 + q_2(t) - q_1(t)}{n^{(1)}T_2} \leq \frac{2}{n^{(1)}} \\ \frac{T_1}{T_k} - \frac{n^{(k)}}{n^{(1)}} &= \frac{-p_k + p_1 + q_k(t) - q_1(t)}{n^{(1)}T_k} \leq \frac{2}{n^{(1)}} \end{aligned}$$

将上两式的左边列成矩阵表达为式(4),上两式右

边加入判据项 ε_k 用矩阵表达为式(5), 其中 NC 表示无判据:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ T_1 \\ \vdots \\ 1 \\ T_k \end{bmatrix} [T_1 \quad T_2 \quad \cdots \quad T_k] - \begin{bmatrix} n^{(1)} \\ n^{(2)} \\ \vdots \\ n^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ n^{(1)} & n^{(2)} & n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & NC & \cdots & NC & NC \\ \frac{2}{n^{(1)}} + \varepsilon_2 & 0 & \cdots & NC & NC \\ \frac{2}{n^{(1)}} + \varepsilon_3 & \frac{2}{n^{(2)}} + \varepsilon_3 & 0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & NC \\ \frac{2}{n^{(1)}} + \varepsilon_k & \frac{2}{n^{(2)}} + \varepsilon_k & \cdots & \frac{2}{n^{(k-1)}} + \varepsilon_k & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

集合稳定判据描述为, 若按脉冲周期大小排序命名脉冲星编号 $k=1, 2, \dots, k$, 如: $T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_k$, 分别给 $2 \sim k$ 颗脉冲星设定最大允许偏差 $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_k$, 构成判据式(5)。比较式(4)与(5)左下三角的每一项, 若前者小于后者说明稳定性正常, 反之, 说明稳定性异常, 式(5)左下三角形矩阵某一元素不满足不等式条件, 则该“行”所联系的脉冲星需要调整周期或者从脉冲集合中去除。之所以称之为“集合稳定”, 是利用脉冲星相互为参考, 并动态调整, 达到在允许范围内相对的稳定。这种判据看似跟铯原子钟稳定性无关, 但实际式(4)中的序号是原点观者的序号, 其换算过程离不开各处非原点观者基于铯原子钟原时的测量结果。时间轴转换算法如下。

3.3 时间轴转换算法

观者用本地原时做参考采集的脉冲星轮廓和周期数据, 需要经过3次时间和空间变换, 才能用原点观者的视角表达脉冲事件。此部分内容可参见脉冲星观测领域已发表或出版的文献书籍^[22], 不属于本论文的创新内容, 但有助于对本地轨道参数历表的理解。

1) 多普勒效应补偿

$$\Delta\tau_a = \left(1 + \frac{V_a}{c}\right) \Delta\tau \quad (6)$$

$$V_a = \vec{a} \cdot \vec{V}$$

时间轴的时间间隔 $\Delta\tau_a$; 其中, V_a 为本地相对脉冲星的运动速度, 接近脉冲星 V_a 为正, 远离脉冲星 V_a 为负, \vec{V} 为本地速度矢量, \vec{a} 为脉冲星的方位矢量, $\Delta\tau$ 为

本地原时的时间轴的时间间隔, c 为光速。

2) 原时到坐标时的变换

$$\Delta t = \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau_a} \left(1 + \frac{U}{c^2} + \frac{V^2}{2c^2}\right) d\tau \quad (7)$$

本地坐标时的时间轴的时间间隔 Δt ; 其中: t 为本地坐标时的时间变量, τ 为本地原时的时间变量, $\Delta\tau_a$ 为时间轴的时间间隔, U 为所述本地引力势, V 为本地位置相对于原点观者的线速度, c 为光速。

3) 脉冲达到原点观者的时间

$$t_{o_n} = t_n + \frac{d_n}{c}, \quad d_n = (\vec{P} \cdot \vec{a}) \quad (8)$$

序号为 n 的脉冲到达原点时间 t_{o_n} ; 其中, t_n 为序号为 n 的脉冲的脉冲本地时间, d_n 为本地位置在 t_n 时刻到原点观者的距离, \vec{P} 为本地位置矢量, \vec{a} 为脉冲星的方位矢量, c 为光速。

4 实验验证

从实际测量的众多脉冲星数据中 (Becker & Trümper, 2007)^[23], 选取典型的脉冲星周期数据如表1所示。

表1 典型脉冲星的周期

Table 1 Typical pulsar's periods

编号 k	脉冲星	周期 T_k/s	可观测性
1	B1957+20	0.001 60	射电
2	B1821-24	0.003 05	射电/X
3	J2124-33	0.004 93	射电/X
4	J0437-47	0.005 75	射电/X
5	B0531+21	0.033 40	光学/射电/X
6	B0540-69	0.050 37	光学/射电/X
7	B0844-45	0.089 29	光学/射电/X
8	B1509-58	0.150 23	射电/X
9	B0656+14	0.384 87	光学/射电/X

以上9颗脉冲星, 按周期 T_k 大小编号, 设每颗脉冲星的周期都被约定为常数, 单位 SI 秒, 没有测量不确定度。历经1~10年, 无误差的理想序号 $n^{(k)}$ 随坐标时增加而增大, 计算公式如式(9)所示, 计算结果列入表2。

$$n^{(k)} = \frac{T_{CB}}{T_k} \quad (9)$$

式中: T_{CB} 是坐标时变量, 连续均匀地增加, T_k 是约定的脉冲星周期。

表2 脉冲序号随坐标时增加而变大

Table 2 The pulse number go to increase with coordinate time going

脉冲星	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
T_k/s	0.001 6	0.003 05	0.004 93	0.005 75	0.033 4	0.050 37	0.089 29	0.150 23	0.384 87
坐标时	脉冲序号 $n^{(k)}$, 单位[个脉冲]								
1年	1.97×10^{10}	1.03×10^{10}	6.40×10^9	5.49×10^9	9.45×10^8	6.27×10^8	3.53×10^8	2.10×10^8	8.20×10^7
5年	9.86×10^{10}	5.17×10^{10}	3.20×10^{10}	2.74×10^{10}	4.72×10^9	3.13×10^9	1.77×10^9	1.05×10^9	4.10×10^8
10年	1.97×10^{11}	1.03×10^{11}	6.40×10^{10}	5.49×10^{10}	9.45×10^9	6.27×10^9	3.53×10^9	2.10×10^9	8.20×10^8
50年	9.86×10^{11}	5.17×10^{11}	3.20×10^{11}	2.74×10^{11}	4.72×10^{10}	3.13×10^{10}	1.77×10^{10}	1.05×10^{10}	4.10×10^9
100年	1.97×10^{12}	1.03×10^{12}	6.40×10^{11}	5.49×10^{11}	9.45×10^{10}	6.27×10^{10}	3.53×10^{10}	2.10×10^{10}	8.20×10^9

实际序号 $n^{(k)}$ 是测量获得的, 若有 ± 0.5 个序号的测量不确定度, 集合稳定性实验数据表达为:

$$\max \left(\left| \frac{T_1}{T_k} - \frac{n^{(k)} + 0.5}{n^{(1)}} \right|, \left| \frac{T_1}{T_k} - \frac{n^{(k)} - 0.5}{n^{(1)}} \right| \right) \leq \frac{2}{n^{(1)}} \quad (10)$$

以编号(1)的脉冲星为参考, 根据式(10)的左半部分计算集合稳定性, 结果如表3所示。表3说明用序号比值检验脉冲星周期的稳定性, 随着坐标时增加集合稳定性区间逐步减小, 每10年减小1个量级, 因此要增加一个判据来检验集合稳定性是否合理。

表3 以编号(1)的脉冲星为参考, 集合稳定性数据式(10)计算结果

Table 3 Result of equal (4) for the set stability, with number (1) of pulsar as reference

脉冲星	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
坐标时	集合稳定性=式(10), 单位相对值								
1年	-	4.28×10^{-11}	4.94×10^{-11}	3.64×10^{-11}	3.32×10^{-11}	4.58×10^{-11}	3.53×10^{-11}	4.09×10^{-11}	4.09×10^{-11}
5年	-	7.90×10^{-12}	8.85×10^{-12}	5.95×10^{-12}	7.32×10^{-12}	5.26×10^{-12}	5.23×10^{-12}	9.77×10^{-12}	9.76×10^{-12}
10年	-	4.78×10^{-12}	3.82×10^{-12}	3.42×10^{-12}	4.78×10^{-12}	2.73×10^{-12}	2.69×10^{-12}	2.90×10^{-12}	2.92×10^{-12}
50年	-	7.23×10^{-13}	7.79×10^{-13}	6.39×10^{-13}	7.26×10^{-13}	7.00×10^{-13}	6.65×10^{-13}	8.75×10^{-13}	8.88×10^{-13}
100年	-	4.70×10^{-13}	4.89×10^{-13}	3.86×10^{-13}	4.72×10^{-13}	4.47×10^{-13}	4.11×10^{-13}	3.92×10^{-13}	3.80×10^{-13}

判据式(5)不等号右边的允许误差项 ε_k , 代表对第 k 颗脉冲星周期变化的容许变化程度, 随着坐标时增加, 也可变小到更加符合测量系统的极限, ε_k 计算结果列入表4。假设:

$$\varepsilon_k \geq \frac{2}{n^{(1)}} - \max \left(\left| \frac{T_1}{T_k} - \frac{n^{(k)} + 0.5}{n^{(1)}} \right|, \left| \frac{T_1}{T_k} - \frac{n^{(k)} - 0.5}{n^{(1)}} \right| \right) \quad (11)$$

设计中 ε_k 不可能为负值, 表4中若为负值, 说明需要放宽判据 ε_k , 若为正值, 说明 ε_k 可以为0。随着坐标时增长, 负值个数就会越来越少。

用实际的脉冲星数据计算, 约定周期 1.6~384 ms, 积累第1年的数据, 初步考虑整数周期影响, 用序号比例可分辨 $3.64 \times 10^{-11} \sim 4.94 \times 10^{-11}$ 的不稳定性, 如表3

表4 以编号(1)的脉冲星为参考, 判据中允许偏差不等式(11)计算结果

Table 4 Result of unequal (11) of the deviations allowed in criterion, with number (1) of pulsar as reference

脉冲星	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
坐标时	允许偏差 ε_k =式(11), 单位相对值								
1年	-	5.9×10^{-11}	5.2×10^{-11}	6.5×10^{-11}	6.8×10^{-11}	5.6×10^{-11}	6.6×10^{-11}	6.0×10^{-11}	6.0×10^{-11}
5年	-	1.2×10^{-11}	1.1×10^{-11}	1.4×10^{-11}	1.3×10^{-11}	1.5×10^{-11}	1.5×10^{-11}	1.1×10^{-11}	1.1×10^{-11}
10年	-	5.4×10^{-12}	6.3×10^{-12}	6.7×10^{-12}	5.4×10^{-12}	7.4×10^{-12}	7.4×10^{-12}	7.2×10^{-12}	7.2×10^{-12}
50年	-	1.3×10^{-12}	1.2×10^{-12}	1.4×10^{-12}	1.3×10^{-12}	1.3×10^{-12}	1.4×10^{-12}	1.2×10^{-12}	1.1×10^{-12}
100年	-	5.4×10^{-13}	5.3×10^{-13}	6.3×10^{-13}	5.4×10^{-13}	5.7×10^{-13}	6.0×10^{-13}	6.2×10^{-13}	6.3×10^{-13}

的第1行。本实验是以编号(1)脉冲星为参考的,若以其他编号为参考,还可重复上述步骤。但是如何发现编号(1)的周期不稳定?受篇幅限制将在后续论文中论述,文献[9]有简单提及。随着时间增长数据积累越多,或者脉冲周期越短,亦或者整周期内相位分辨率越细微,越能发现相对变化更小的脉冲星不稳定性,使 ε_k 收敛到更小,当小到接近测量系统指标的测量不确定度范围时,判别脉冲星周期不稳定性的能力就不再变化了。从表4可见允许偏差的收敛比较缓慢,用集合稳定性方法累计100年的脉冲序号,可分辨脉冲星周期的相对变化为 $5.3 \times 10^{-13} \sim 6.3 \times 10^{-13}$,没有超过当前地球上观测脉冲星周期的测量不确定度量级,但是对于地球以外的观者来说,这就是从无到有的突破。

5 结 论

在跨越和联系不同局域空间来统一时间的问题上,只有从相对时间观出发,才能理解空间守时系统的“原时-坐标时”方法。不同于坐地观天的以地球观者为中心的时空基准。相对时间观坚持“时间离不开空间”,统一时间的前提是统一空间。在确定坐标时,有3个要点分别是:约定方向、空间包含、原点观者,这是理解空间统一非常重要的概念。本文进一步发展了相对时间观,提出了坐标时的相对性,统一时间的观者群的相对性,以及原点观者的相对性,用“空间包含”与“不包含”划分观者群,用分层嵌套方法解决不同观者群之间统一时间的方法。本文辩证地分析和运用脉冲星相对稳定性特点,把脉冲星作为坐标时的基准,定义脉冲星初始历元,进而利用脉冲星序号规则,计算脉冲星集合稳定性。在国际单位制的7个基本物理常数中,只有铯原子频率常数不从其他常数中导出,是人类约定的原时时间单位,把当前计量标准体系中的标准时间扩展成为未来统一时间规则中两个时间基准(即原时和坐标时),计量领域需要再约定坐标时的相关常数,这就是脉冲星周期常数,多颗脉冲星的周期组合成常数数组。从计量学观点出发,时间单位用原时和SI秒统一,时间全局(限于观者群内)要靠坐标时统一。单独的一个局域观者是不可能定义和规定坐标时基准的,因为其他局域观者并不认同,如何定义坐标时时间基准,就需要不同观者来制定一套约定方法,这就是空间守时系统的异常检测机制和反馈机制。引入并使用脉冲星周期常数数组,将使得计量理论将更能适用于地球以外的广阔空间。这是对脉冲星时间计量诠释,基于此,空间计量理论也将因此会出现突破性进展。

参考文献

- [1] 李国俊,王存军,叶虎春.北斗三号共视时间传递性能分析[J].天文学报,2022,63(3):76-86.
LI G J, WANG C J, YE H CH. Performance analysis of BeiDou-3 common-view time transferring [J]. Acta Astronomica Sinica, 2022,63(3):76-86.
- [2] 肖伟刚,齐朝祥.太空活动时空基准的发展现状与启示[J].中国科学院院刊,2022,37(11):1642-1649.
XIAO W G, QI CH X. Development status and enlightenment of space-time reference for space activities[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022,37(11):1642-1649.
- [3] 刘民,刘志宏,卢耀文,等.构建空间守时系统引领时间规则变革[J].真空与低温,2023,29(1):1-4.
LIU M, LIU ZH H, LU Y W, et al. To build space time-keeping system to lead the revolution of the regulation of time[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023,29(1):1-4.
- [4] 刘民.地球以外有统一的规则吗?中国科学技术学会.2021重大科学问题,工程技术难题和产业技术问题汇编[M].北京:中国科学技术出版社,2021:20-25.
LIU M. Is there a rule to unify time out of the Earth? China Association of Science and Technology. 2021 Assembly of Major Scientific Issues, Engineering Technical Problems and Industry Technology Issues[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2021: 20-25.
- [5] 刘佳成,朱紫.2000年以来国际天文联合会(IAU)关于基本天文学的决议及其应用[J].天文学进展,2012,30(4):411-438.
LIU J CH, ZHU Z. Explanation and implementation of the IAU 2000/2006 Resolutions and Fundamental Astronomy[J]. Progress in Astronomy, 2012, 30(4): 411-438.
- [6] BRIAN L, NICOLE C, AGNES F, et al. The IAU2009 system of astronomical constants: The report of the IAU working group on numerical standards for Fundamental Astronomy[J]. Celest Mech Dyn Astr, 2011(110): 293-304.
- [7] 刘民,帅平,平劲松,等.地球以外的时间规则研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(7):1-8.
LIU M, SHUAI P, PING J S, et al. Study on the rule of time out of the Earth [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(7):1-8.
- [8] 潘军洋,谢懿.火星任务中星上原时 τ 与TCG的相对论变换[J].深空探测学报,2015,2(1):69-75.
PAN J Y, XIE Y. Relativistic transformation between the proper time τ and TCG for Mars missions[J]. Journal of Deep Space Exploration [J]. 2015,2(1):69-75.

- [9] 刘民,王乾娟,李军.空间守时系统概念研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(4):1-6.
LIU M, WANG Q J, LI J. Study on the concept of space time keeping system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(4):1-6.
- [10] 赵成仕,朱幸芝,周祖荣.基于实测数据的脉冲星时自主保持精度分析[J].时间频率学报,2023,46(3):188-197.
ZHAO CH SH, ZHU X ZH, ZHOU Z R. Analysis of pulsar time keeping accuracy using observation data[J]. Journal of Time and Frequency, 2023,46(3):188-197.
- [11] 赵峥,刘文彪.广义相对论基础[M].北京:清华大学出版社,2010.
ZHAO ZH, LIU W B. Theory of general relativity[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [12] 刘民,彭明,刘碧野.空间计量中的时间单位和时间测量[J].电子测量与仪器学报,2016,30(8):1137-1143.
LIU M, PENG M, LIU B Y. Time unit and time measurement in space metrology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8):1137-1143.
- [13] 韩春好.时空测量原理[M].北京:科学出版社,2018.
HAN CH H. Principle of spacetime measurement[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [14] 刘民,帅平,刘志宏,等.空间计量与脉冲星导航[J].宇航计测技术,2019,39(1):5-11.
LIU M, SHUAI P, LIU ZH H, et al. Space metrology and pulsars navigation[J]. 2019,39(1):5-11.
- [15] VALENTE M B. Proper time and the clock hypothesis in the theory of relativity [J]. European Journal for Philosophy of Science, 2016, 6: 191-207.
- [16] 牛振凤,刘文彪.史瓦西时空中自由粒子的运动方程[J].大学物理,2011,30(7):19-22.
NIU ZH F, LIU W B. The kinematics equations of a free particle in the Schwarzschild space-time [J]. College Physics, 2011,30(7):19-22.
- [17] 董明雷,杨廷高,赵成仕,等.脉冲星计时模型参数的测量精度分析与估计[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(9):103-112.
TONG M L, YANG T G, ZHAO CH SH, et al. Analyses and estimates on measurement precisions of model parameters in pulsar timing [J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47(9): 103-112.
- [18] 李小平,方海燕,孙海峰,等.X射线脉冲星大尺度时间转换模型研究[J].载人航天,2015,21(6):628-634.
LI X P, FANG H Y, SUN H F. Research on large-scale time transform model of X-ray pulsar [J] Manned Spaceflight, 2015,21(6):628-634.
- [19] 郑伟,王禹淞,姜坤,等.X射线脉冲星导航方法研究综述[J].航空学报,2023,44(3):19-35.
ZHENG W, WANG Y S, JIANG K. Overview of X-ray pulsar-based navigation methods [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2023,2023,44(3):19-35.
- [20] 刘民,孙毅.国际单位制的基本常数综述[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):1-9.
LIU M, SUN Y. Review of elementary constants in international system of units [J]. Journal of Electronic Measurement and instrumentation, 2021,35(1):1-9.
- [21] FOSTER R S, MATSAKIS D N. Application of millisecond pulsar timing to the long-term stability of clock ensembles [C]. Proceedings of the 27th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 1995: 447-456.
- [22] 帅平.脉冲星:宇宙航行的灯塔[M].北京:国防工业出版社,2016:471-473.
SHUAI P. Pulsars: The lighthouses for space flight[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 471-473.
- [23] 吴鑫基,乔国俊,徐仁新.脉冲星物理[M].北京:北京大学出版社,2020.
WU X J, QIAO G J, XU R X. Pulsar's physical[M]. Beijing: Peking University Press, 2020.

作者简介



刘民(通信作者),1991年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2008年于中国空间技术研究院获得博士学位,现为北京东方计量测试研究所总师,中国航天科技集团有限公司学术技术带头人,国际无线电科学联盟

URSI中国委员会电磁计量专业委员会 Commission A 主席,主要研究方向为空间计量、电磁学计量、时间频率计量、静电防护。

Email:13366855901@163.com

Liu Min (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Industry of University (HIT) in 1991, M. Sc. degree from HIT in 1994 and Ph. D. degree from Chinese Academy of Space Technology (CAST) in 2008, respectively. Now he is a chief engineer in Beijing Orient Institute of Metrology and Test (BOIMT), Local Chair of Commission A in the Union of Radio Science International (URSI) in China. His main research interests include space metrology, electric-magnetic metrology, time and frequency metrology, and electrostatic protection, etc.