

Отклонения рассчитывают как

$$P = (K_1 - K_2)/2; P' = (K'_1 - K'_2)/2.$$

Перед измерением необходимо проверить расположение осей конусов делительной головки относительно оси конуса задней бабки. Несовпадение осей допускается не более 0,01 мм. Совмещение выполняют согласно инструкции по эксплуатации оптической делительной головки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. После совмещения осей центров оптической головки измерительный рычаг 29 устанавливают в строго горизонтальное положение. Для этого рукоятку 21 переводят в среднее положение, освобождают фиксатор 26 и перемещают его при помощи эксцентрика 24. Установку выполняют по верхней плоскости рычага 29.

На рис. 3 показана схема такой установки. Рычаг сдвигают в горизонтальное положение до тех пор, пока разность показаний, снимаемых с индикатора в позициях I и II, не будет превышать 0,03 мм. Далее оси вращения рычага и центров делительной головки располагают на одной высоте в пределах 0,1 мм. Регулировку по высоте проводят с использованием прокладок между кареткой и конусом измерительной головки по предлагаемой схеме (рис. 4). Перед этим необходимо аттестовать диаметры оправки D и наконечника d с погрешностями, не превышающими 0,003 мм, и определить наибольший отсчет по шкале при их измерении. Толщину прокладки находят по результатам измерений положений оправки и наконечника. При необходимости опорную поверхность корпуса устройства можно подшлифовать [5].

Таким образом, оптико-механическая измерительная система контроля позиционных отклонений осей отверстий деталей в угловом направлении является технически простым и экономически выгодным приспособлением. Разработанное устройство сокращает время контроля сложнейших операций, повышает точность и достоверность контроля осей отверстий малого диаметра, расположенных на цилиндрических поверхностях деталей, и в целом позволяет повысить качество продукции.

Литература

1. **Марков Н. Н. и др.** Нормирование точности в машиностроении. М.: Высшая школа, 2001.
2. **Жарский И. М. и др.** Технологические методы обеспечения надежности деталей машин. Минск: Высшая школа, 2005.
3. **Колесников К. С.** Технологические основы обеспечения качества машин. М.: Машиностроение, 1990.
4. **Макаренко В. В. и др.** Повышение надежности и долговечности гидроагрегатов путем увеличения точности измерения позиционных отклонений // *Технология машиностроения*. 2007. № 1. С. 58—60.
5. **Ломов С. М., Ломова О. С.** Расчет и проектирование технологических приспособлений и контрольно-измерительных систем. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008.

Дата принятия 01.03.2012 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

529.78

Эталонная мера времени-пространства на основе периодического излучения пульсаров

А. Е. АВРАМЕНКО

Физический институт РАН (ФИАН), Москва, Россия, e-mail: avr@pra0.ru

Предложен новый подход к построению эталонной меры времени-пространства, основанный на свойстве когерентности периодического излучения пульсаров. Показано, что в результате калибровочных преобразований интервалов наблюдаемых событий излучения достигается их фазовая привязка к эталонной пульсарной мере с относительной погрешностью в пределах 10^{-18} — 10^{-19} на 40-летней протяженности наблюдений пульсаров и определяется синхронизирующая поправка атомной шкалы по эталонной мере на текущую эпоху наблюдений.

Ключевые слова: эталонная мера времени-пространства, параметры вращения пульсара, когерентность излучения пульсара, калибровка интервалов, синхронизирующая поправка.

A new approach to the construction of the reference measure of time-space based on the coherence of periodic pulsar radiation is suggested. It is shown that as a result of calibration transformation of intervals of observed events of radiation their phase binding to reference pulsar measure with relative error within limits 10^{-18} — 10^{-19} is achieved at the 40 years duration of observations and the synchronizing correction of atomic scale by reference measure on the current observation epoch is determined.

Key words: reference measure of time-space, pulsar rotation parameters, coherence of pulsar radiation, intervals calibration, synchronizing correction.

В 1967 г. на 13-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) было принято новое определение секунды СИ через число периодов излучения при переходе между

двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Новое определение сменило действовавшее ранее, связанное с эфемеридным временем и основанное на

астрономических наблюдениях [1]. На Генеральной Ассамблее Международного астрономического союза (МАС) в 1967 г. было принято решение о прекращении использования шкалы эфемеридного времени и введении взамен нее шкалы земного динамического времени (TDT, с 1991 г. используется аббревиатура TT, его реализацией является Международное атомное время TAI) и барицентрического динамического времени (TDB), в которых учитываются эффекты теории относительности. В результате произошла передача секунды СИ от эфемеридной шкалы к атомной. Атомный стандарт частоты, кроме функции воспроизведения единицы времени, должен обеспечивать и функцию хранения шкалы времени, т. е. непрерывный счет единиц в интервале, прошедшем от любой начальной эпохи в прошлом. Преимущество астрономических часов для определения эпох и связываемых с ними соответствующих опорных моментов времени состоит в том, что они обладают устойчивой воспроизводимостью природных циклов, а действие не ограничено никакими временными рамками, тогда как не существует искусственных часов, которые могли бы бесконечно долго продолжать свою работу подобно движению небесных тел [2]. Но при этом они уступают в точности определения единицы времени вследствие значительных вариаций продолжительности сутокных и годовых циклов Земли, по которым определялись опорные моменты и единицы времени.

Ожидалось, что переход к точной атомной секунде снимет наконец это ограничение. Однако выяснилось, что ввиду статистической неопределенности частоты излучения при переходе между сверхтонкими уровнями основного состояния атомов значительной проблемой становится поддержание требуемой стабильности единицы времени атомных часов на больших интервалах — от нескольких суток до нескольких месяцев или более. Чем меньше допустимая неопределенность частоты, тем больше времени требуется для ее сличения с эталонной мерой. Например, чтобы поддерживать стабильность Национальной шкалы времени UTC(SU) в пределах $(2-5) \cdot 10^{-15}$ [3], неопределенность сличений не может быть выше десятых долей наносекунды на десятидневном интервале. Для уменьшения неопределенности эталонной частоты без заметного увеличения требуемого интервала сличений обычно используют усреднение частоты нескольких выбранных атомных стандартов, стабильности которых хорошо известны. Однако и это не исключает потери фазы в промежутках между сличениями, когда вариации частоты не контролируются, и ее невозможно восстановить в процессе последующих сличений, поскольку изменения частоты и соответственно фазы — случайные, не имеют точной математической модели и поэтому не предсказуемы.

Ниже рассмотрен принципиально новый подход к реализации эталонной меры времени-пространства, который основан на вековой стабильности периода электромагнитного излучения вращающихся нейтронных звезд — пульсаров, открытых в 1967 г. [4]. Цель работы — расширение функциональных возможностей и повышение точности эталонных мер, свободных от принципиальных ограничений атомных стандартов частоты, которые воспроизводят единицу времени — секунду СИ.

Основной смысл предлагаемого подхода заключается в следующем. С одной стороны, будем рассматривать моменты наблюдаемых событий излучения пульсара, отсчитываемые в единицах атомной шкалы времени, в качестве численного выражения эпохи наблюдений относительно неко-

торой выбранной начальной эпохи в прошлом. С другой стороны, будем находить численные значения опорных моментов на соответствующую эпоху наблюдений, выраженные через стабильные параметры вращения пульсара. Затем, сопоставляя моменты наблюдаемых событий излучения пульсара, отсчитываемые по атомным часам от выбранной начальной эпохи, с опорными моментами тех же событий излучения, выраженными через стабильный период вращения пульсара, будем проводить привязку или калибровку моментов наблюдаемых событий к опорным моментам и определять синхронизирующую поправку атомных часов на эпоху наблюдаемых событий излучения пульсара.

Моменты наблюдаемых событий будем связывать с физическим процессом периодического излучения пульсаров, наблюдаемого в любой точке трехмерного пространства. В соответствии с принципом относительности, сформулированным Пуанкаре, все физические явления можно описывать в инерциальной системе координат X', Y', Z', T' так же, как в системе X, Y, Z, T [5]. Это означает, что пространство и время образуют единый четырехмерный континуум событий с метрическими свойствами, определяемыми уравнением

$$J = c^2 T^2 - X^2 - Y^2 - Z^2 = c^2 T'^2 - X'^2 - Y'^2 - Z'^2. \quad (1)$$

Из (1) следует, что в любой инерциальной системе отсчета в декартовых координатах заданная величина J остается неизменной (форминвариантной), тогда как ее проекции на оси изменяются. Общий вид преобразований координат и времени при переходе от одной координатной системы X, Y, Z, T к другой X', Y', Z', T' и обратно, при которых уравнения физических процессов остаются неизменными или инвариантными относительно координатных преобразований, Лоренц определил следующим образом:

$$X' = \gamma(X - vT); \quad T' = \gamma(T - vX/c^2); \quad Y' = Y, \quad Z' = Z; \quad (2)$$

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}, \quad (3)$$

где c — скорость света (электродинамическая постоянная).

Как следует из структуры инварианта J , всегда можно ввести единое время T для всех точек трехмерного пространства. В другой инерциальной системе отсчета единое время будет уже другим, определяемым переменной T' . Развивая идеи Лоренца и Пуанкаре, более общую, исчерпывающую формулировку принципа относительности дал А. А. Логунов, распространив его в равной мере не только на инерциальные, но и на неинерциальные системы координат [5]. Он показал, что при переходе от инерциальных к произвольным координатным системам отсчета геометрия четырехмерного пространства-времени не изменяется и сохраняет общий вид (1).

Преобразования Лоренца (2) означают одновременность событий (единое время) для всех точек трехмерного пространства в данной системе отсчета, т. е. трехмерное пространство данной системы отсчета ортогонально линиям времени, и для всех его точек всегда существует единое физическое время. Из сформулированного принципа относительности следует, что пространство и время не могут существовать независимо, каждое само по себе. Только их объединение позволило установить четырехмерную геометрию этого континуума, которая определяется инвариантным интервалом (1) во всех системах отсчета.

Неизменность (форминвариантность) физических уравнений во всех системах отсчета означает, что физические процессы, включая и рассматриваемый процесс периодического излучения пульсара, протекающие в этих системах отсчета при одинаковых условиях, тождественны, а все естественные эталоны, в том числе те, по которым отсчитывают интервалы наблюдаемых событий, одинаковы.

Для того чтобы распространить принцип относительности на физический процесс периодического излучения пульсаров, необходимо было решить следующие взаимосвязанные задачи:

найти общий вид уравнений интервалов пульсарного времени, которые сохраняют вид метрики пространства-времени независимо от выбранной координатной системы;

по интервалам выборочно наблюдаемых пульсарных событий получить численные решения уравнений, тождественные в координатных системах;

по численным решениям уравнений интервалов синтезировать пульсарные меры времени, распространяемые на любую координатную систему отсчета.

Как было показано в [6], одним необходимым условием распространения соотношения (1) на наблюдения событий излучения пульсаров в координатных системах является

представление моментов этих событий в виде интервалов, отсчитываемых от некоторого фиксированного начального события. Другое условие — представление интервалов выборочно наблюдаемых событий в виде уравнений, одинаковых для всех координатных систем отсчета, в которых интервалы определены через наблюдаемые параметры вращения пульсаров. При выполнении этих условий физический процесс периодического излучения пульсаров для наблюдателя в любой координатной системе протекает одинаково. Это означает, что интервалы периодического излучения пульсаров удовлетворяют соотношению (1) геометрии четырехмерного пространства-времени как в движущейся ускоренно топоцентрической, так и в инерциальной барицентрической координатных системах. Единичный интервал времени, устанавливаемый по шкале атомного эталона радиотелескопа, и наблюдаемый период вращения пульсара, отсчитываемый в единицах этой шкалы, также распространяются на все координатные системы наблюдений.

Уравнение интервалов, инвариантное относительно координатных преобразований, имеет вид

$$PT_i = (1 + \alpha_i) (P^*N + 0,5P^*\dot{P}N^2)_i, \quad (4)$$

где P^* , \dot{P} — период вращения пульсара в начальный момент (начальная эпоха наблюдения) и его производная; $(1 + \alpha_i)$ — множитель, учитывающий вариации наблюдаемого периода вращения пульсара в промежутке наблюдений; $i = 0, 1, 2, \dots$ — порядковый номер сеанса наблюдения выбранного события излучения пульсара; N — порядковый номер излученного импульса в i -м сеансе наблюдения.

Переменная составляющая наблюдаемого периода в (4) учитывается множителем $(1 + \alpha_i)$, в котором α_i показывает относительное значение отклонения периода в нарастающем промежутке наблюдений, отсчитываемого от начального события. Правая часть в (4) определяет местное время для всех точек трехмерного пространства в выбранной системе отсчета в соответствии с инвариантом (1), определяющим метрику четырехмерного пространства-времени вида (ct, \mathbf{x}) .

Уравнение (4) инвариантно относительно выбора пространственной системы отсчета. В любой координатной системе оно характеризует последовательность интервалов, отсчитываемых от выбранного начального события по одним и тем же численным значениям параметров вращения пульсара P^* , \dot{P} . Так, в топоцентрической системе интервалы TT_i согласно (4) определяются выражением

$$TT_i = (1 + \alpha_i) (P^*N_T + 0,5P^*\dot{P}N_T^2)_i, \quad (5)$$

Аналогичным образом получаем уравнение интервалов TB_i в барицентрической системе:

$$TB_i = (1 + \alpha_i) (P^*N_B + 0,5P^*\dot{P}N_B^2)_i, \quad (6)$$

В (5), (6) величины N_T , N_B представляют полное число событий, излученных в промежутке наблюдений, рассчитанное по среднему периоду в этом промежутке: $N_T = TT_i / \bar{P}_{TT_i}$,

$$N_B = TB_i / \bar{P}_{TB_i}.$$

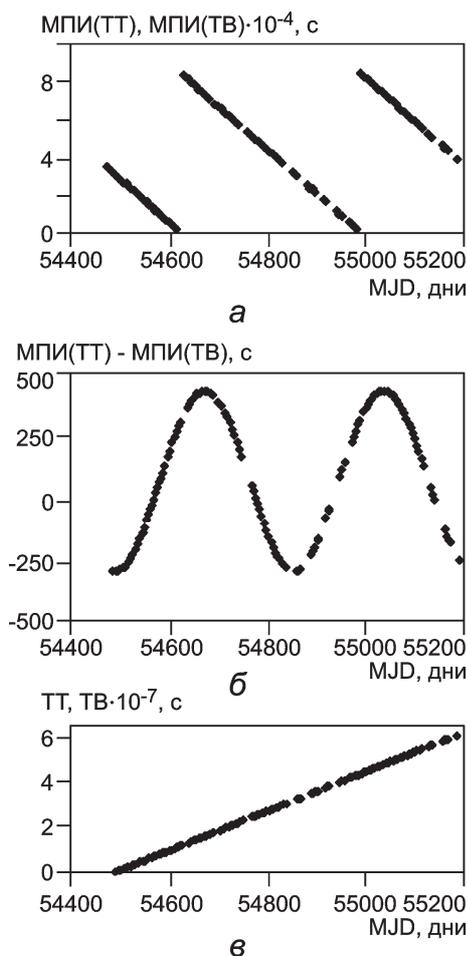


Рис. 1. Моменты и интервалы наблюдаемых событий PSR B1919+21: а — моменты событий в топоцентрической (ТТ) и барицентрической (ТВ) координатных системах; б — разность моментов событий и в — интервалы событий, наблюдаемых в координатных системах

В соответствии с (4) наблюдаемый период можно выразить как

$$P = (1 + \alpha_i)P^*, \quad (7)$$

где коэффициент α_i представляет собой текущие вариации наблюдаемого периода P в пределах протяженности наблюдений и может быть интерпретирован как относительное отклонение наблюдаемого периода под влиянием внешних факторов, не связанных с периодом вращения пульсара,

$$\alpha_i = \Delta P_i / P^*. \quad (8)$$

Если вариация периода α_i известна из наблюдений, то можно с помощью линейного приближения (4) определить текущее значение периода на эпоху наблюдений, а также вычислить отклонения интервалов, обусловленные этими вариациями:

$$\Delta PT_i = \alpha_i (P^*N + 0,5P^*\dot{P}N^2)_i, \quad (9)$$

На рис. 1 показан общий вид результатов астрометрических двухлетних наблюдений (12.01.2008—20.12.2009 гг.) секундного пульсара В1919+21 (период вращения около 1,34 с) на радиотелескопе БСА ФИАН (Пушино): моменты прихода импульсов (МПИ), наблюдаемых в топоцентрической и барицентрической системах, которые отсчитываются от начала текущих суток на дату наблюдения (см. рис. 1, а); интервалы событий в этих же системах, отсчитываемые от начального наблюдаемого события (см. рис. 1, в); разность моментов (аналогично и интервалов), определяемая текущим положением радиотелескопа при движении относительно барицентра (см. рис. 1, б). Наблюдаемые МПИ, пересчитанные к одному и тому же начальному событию, отмечают измеренные текущие эпохи наблюдаемых событий и одновременно являются исходными для определения P^* и \dot{P} в соответствии с (4). В результате наблюдений получены $P^* = 1,33730279821909$ с на эпоху $MJD\ 54477,39095$ дн. и $\dot{P} = 1,34809 \cdot 10^{-15}$. По этим параметрам на основании (5) и (6) рассчитываются интервалы TT_i и TB_i , которые служат опорными моментами времени, относящимися к текущим эпохам наблюдаемых событий.

Найденные по двухлетним наблюдениям параметры вращения были сопоставлены с аналогичными данными, содержащимися в известных, наиболее распространенных каталогах пульсарных данных [7, 8]. Это позволило не только проверить их соответствие по независимым источникам, но и, выбрав достаточно большие промежутки между эпохами наблюдений, оценить стабильность и согласованность на вековом масштабе в пределах всей исторической ретроспективы наблюдений. Для этого численное значение периода вращения, которое указано в каталоге вместе с производной на некоторую фиксированную эпоху в прошлом, преобразуем с учетом производной к эпохе начального события текущих наблюдений и сопоставим полученные значения периода. Приведенные к начальному наблюдаемому событию значения периода будем искать как

$$P = P_k + \dot{P}(MJD_0 - MJD_k) \cdot 86400, \quad (10)$$

где P_k — период по каталогу; MJD_0 — эпоха начального наблюдаемого события, выраженная в долях текущих суток (дробная часть) на дату наблюдения (целая часть); MJD_k — эпоха, на которую определен период P_k .

С учетом приведенных в [7] для PSR В1919+21 значений $MJD_k = 40689,45$ дн.; $P_k = 1,337301192269$ с, $\dot{P} = 1,34809 \cdot 10^{-15}$, вычислим согласно (10) значение периода на эпоху начального наблюдаемого события: $P = 1,33730279821909$ с на эпоху $MJD_0 = 54477,39095$ дн. Таким образом, имеем $P = P^*$.

Трансформированные значения периода вращения PSR В1919+21 эпохи почти 40-летней давности (13.04.1970 г.) соответствуют параметрам вращения, наблюдаемым в 2008—2009 гг. Следовательно, эти параметры точно так же распространяются на любые эпохи, даже разделенные несколькими десятилетиями, причем, очевидно, не только прошлого, но и прогнозируемого будущего. Сопоставление параметров вращения пульсаров по наблюдениям на БСА ФИАН и каталогам [7, 8] показало, что преобразование (10), которое определяет условие согласованности периода вращения и его производной по критерию когерентности периодического излучения на вековом масштабе, выполняется для всей группы наблюдаемых пульсаров В1919+21, В0329+54, В0809+74, В0834+06, J1509+5531, В2217+47.

Когерентный компонент периодического излучения пульсаров содержится в явном виде в параметрической модели пульсарных данных (4):

$$PT(P)_{\text{ког}_i} = (P^*N + 0,5P^*\dot{P}N^2)_i, \quad (11)$$

причем отклонение интервалов от него, определяемое по вариациям наблюдаемого периода (8), выражается соотношением (9).

Численная согласованность наблюдаемых параметров вращения, которая сохраняется в пределах всей истории наблюдений в течение нескольких десятилетий, позволяет сделать вывод, что наблюдаемые отклонения интервалов обусловлены внешними причинами, например, вариациями единицы времени атомной шкалы, но при этом собственные параметры вращения пульсара остаются неизменными и взаимно согласованными на всей протяженности наблюдений.

Покажем на примере пульсара В1919+21, что условие согласованности наблюдаемых параметров вращения выполняется как в топоцентрической (ТТ), так и в барицентрической (ТВ) координатных системах. На рис. 1, в приведены в абсолютном исчислении линейно нарастающие интервалы событий излучения, наблюдаемых в этих системах, которые достигают приблизительно $6 \cdot 10^{-7}$ с к концу двухлетнего промежутка. Разница между ними, неразличимая в масштабе графика рис. 1, в, показана на рис. 1, б. Она обусловлена разным временем прихода импульсов наблюдаемых событий на радиотелескоп и в барицентр из-за орбитального движения Земли (это отчетливо заметно на графике) и ее вращения вокруг своей оси и вносит свой вклад в определение эпохи каждого наблюдаемого события в соответствующей координатной системе.

По наблюдениям пульсара В1919+21 в ТВ-системе было получено $P_{\text{ТВ}}^* = 1,33730279821869$ с на эпоху $MJD_0(\text{ТВ}) = 54477,3875$ дн. начального наблюдаемого события. Теперь

в соответствии с (11) найдем расчетное значение периода на эту эпоху:

$$P_{ТВ} = 1,337301192269 + 1,34809 \cdot 10^{-15} \times$$

$$\times (54477,3875 - 40689,45) \cdot 86400 = 1,33730279821869 \text{ с.}$$

Сравнив полученный результат с наблюдаемым и расчетным периодами в топоцентрической системе $P = 1,33730279821909$ с на эпоху $MJD_0 = 54477,39095$ дн., отметим, что значения наблюдаемого и расчетного периодов точно также совпадают между собой и в ТВ-системе. Отсюда следует, что уравнения (5) и (6) топоцентрических и барицентрических интервалов имеют единственное, общее для обеих координатных систем решение, которым являются значения наблюдаемого периода на начальную эпоху и производная, постоянная на вековом масштабе. При этом указанные значения взаимно согласованы: такое и только такое сочетание численных параметров вращения определяет тождественность физического процесса когерентного излучения пульсара, наблюдаемого в любой координатной системе. Таким образом, результаты анализа выполненных наблюдений подтверждают временную и пространственную когерентность импульсного излучения пульсаров: события излу-

чения пульсаров, наблюдаемые в любой точке галактического пространства, привязаны к фазе периодических (во времени) и волновых (в пространстве) процессов и сохраняют это свойство на любой протяженности наблюдений. Расхождение значений наблюдаемого периода связано исключительно с разностью местного времени в ТТ- и ТВ-координатных системах на эпоху наблюдения начального события, которая, как следует из рис. 1, б, составляет $MPI_0(TT) - MPI_0(TB) = -295,358528$ с, что соответствует эпохам начального наблюдаемого события $MJD_0(TT) = 54477,39095$ дн; $MJD_0(TB) = 54477,3875$ дн.

Отметим, что согласованность параметров вращения по критерию когерентности выполняется только при существенно, на 2-3 порядка более точном определении наблюдаемого периода по сравнению с приведенными в каталогах [7, 8] значениями. Точность периода, заданная в этих каталогах 10^{-12} десятичными знаками, недостаточна, тогда как полученное линейным приближением (5) значение периода с уточнением дробной части до 14—15 десятичных знаков позволяет найти наблюдаемые интервалы с наносекундной погрешностью и субнаносекундным (менее 1 нс) разрешением. Соответственно согласно (11) следует оперировать на 2-3 порядка более точным определением эпохи наблюдаемого события, от которого отсчитываются интервалы.

Пульсарная мера времени, основанная на последовательности интервалов, заданных стабильными параметрами вращения пульсара, выполняет функцию часов, которая заключается в определении интервала, прошедшего от любой начальной эпохи в прошлом, выраженного в принятых единицах времени атомного стандарта, до эпохи наблюдаемого события. По зависимости интервалов наблюдаемых событий когерентного излучения от параметров вращения пульсаров получаем однозначное соответствие текущей эпохи наблюдаемого события и фазы когерентного процесса излучения на вековом масштабе в любой координатной системе. Фаза когерентного излучения, пересчитанная к размерности времени от начального события согласно модели (3), выполняет роль опорного интервала текущей эпохи, соответствующей наблюдаемому событию. Таким образом, текущая эпоха наблюдаемого события служит независимой переменной, по значению которой находят согласованный опорный интервал, отсчитываемый с наносекундной погрешностью по фазе когерентного излучения пульсара.

Покажем, что такая процедура представляет собой калибровку текущей эпохи наблюдений по опорным интервалам, выраженным через стабильные параметры вращения, в результате которой достигается привязка наблюдаемых событий к фазе когерентного излучения пульсара, причем точность калибровки не зависит от вариаций моментов наблюдаемых событий и ограничена только стабильностью атомного стандарта частоты.

Как известно, суть калибровки состоит в следующем. Пусть имеется некоторая переменная y , которую необходимо оценить. Однако по ряду причин прямое измерение y с заданной точностью невозможно. Тогда измеряют другие величины $x = (x_1, x_2, x_3, \dots)$, которые тесно связаны с y . Задача калибровки состоит в установлении количественной связи между переменными x и искомыми значениями y :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots; a_1, a_2, \dots, a_j, \dots) + \epsilon_j,$$

где ϵ_j — погрешность калибровки.

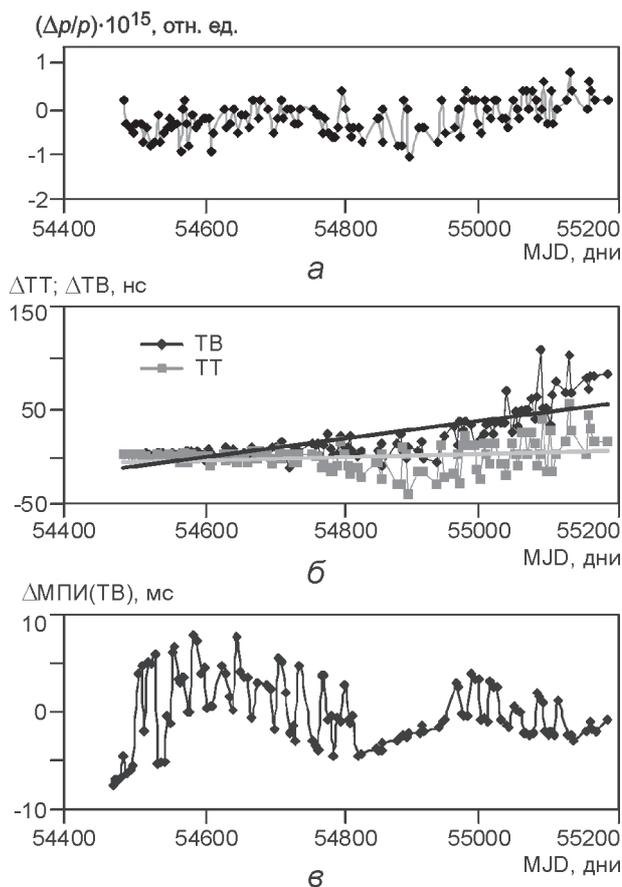


Рис. 2. Вариации периода, отклонения топоцентрических и барицентрических интервалов, остаточные уклонения момента прихода импульсов (МПИ) пульсара В1919+21:

а — вариации наблюдаемого периода вращения; б — отклонения топоцентрических и барицентрических интервалов; в — остаточные уклонения барицентрических МПИ

На практике это предполагает такую последовательность процедур: подбор вида зависимости f ; оценку неизвестных параметров $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots$ в этой калибровочной зависимости; оценку погрешности калибровки.

Применительно к калибровке наблюдаемых интервалов PT_i по интервалам когерентного излучения $PT_{\text{ког}i}$ с учетом (10) соотношение (11) принимает вид

$$PT_i = f\left(PT_{\text{ког}1}, PT_{\text{ког}2}, \dots, PT_{\text{ког}j}, \dots; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots\right) + \Delta PT_i, \quad (12)$$

где $PT_{\text{ког}i} = (P^*N + 0,5P^*\dot{P}N^2)_i$; $\Delta PT_i = \alpha_i (P^*N + 0,5P^*\dot{P}N^2)_i$.

Из (12) с учетом (11) следует, что погрешность калибровки определяется произведением $\alpha_i PT_{\text{ког}i}$. Это означает, что при нулевых значениях α_i погрешность калибровки измеренной эпохи наблюдаемого события по опорным интервалам излучения равна нулю, поскольку в этом случае интервалы PT_i определены постоянными значениями периода вращения и производной. Если же α_i отличны от нуля, то согласно (7) и (8) по значениям α_i , полученным из наблюдений линейным приближением по параметрической модели (4) и представляющим собой текущие вариации наблюдаемого периода P в пределах отсчитываемого от начального события промежутка наблюдений, определяются отклонения интервалов, обусловленные погрешностью наблюдаемого периода. Следовательно, в результате калибровки получены отклонения интервалов PT_i по опорным интервалам когерентного излучения, в которых содержатся вариации единичного интервала — секунды СИ шкалы времени; по ним отсчитываются МПИ и интервалы наблюдаемых событий излучения пульсара.

Фазовая согласованность интервалов при калибровке достигается следующим образом. Фаза когерентного излучения в пределах текущего периода выражается как $\varphi(t) = 2\pi t/P$. Пусть теперь с учетом вариаций наблюдаемых МПИ под влиянием внешних факторов, не связанных с параметрами вращения пульсара, эпоха t наблюдаемого события сместится на интервал Δt . В результате этого смещения произойдет соответствующее изменение $\Delta\varphi(t) = 2\pi\Delta t/P$ фазы наблюдаемого события

$$\varphi(t + \Delta t) = \varphi(t) + \Delta\varphi(t) = 2\pi(t + \Delta t)/P.$$

Таким образом, изменение фазы точно соответствует смещению измеренной эпохи наблюдений из-за вариаций МПИ. Следовательно, калибровкой достигается привязка наблюдаемых событий к фазе когерентного излучения пульсара. При этом случайные погрешности определения эпохи наблюдаемых событий излучения автоматически учитываются линейным параметрическим приближением (3) в опорных интервалах и не оказывают влияния на точность калибровки.

Оценим теперь точность калибровочных преобразований по интервалам когерентного излучения пульсара в сопоставлении с исходными вариациями моментов и интервалов наблюдаемых событий излучения. На рис. 2 приведены вариации периода, отклонения ТТ- и ТБ-интервалов и остаточные отклонения барицентрических МПИ пульсара В1919+21.

На рис. 2, а показаны вариации наблюдаемого периода $P^* = 1,33730279821909$ с на эпоху начального наблюдаемого события MJD = 54477 дн. в пределах двухлетнего промежутка наблюдений, рассчитанные по соотношению (10). Из графика следует, что нестабильность наблюдаемого периода относительно фиксированного периода P^* не превышает нескольких единиц 10^{-16} на двухлетнем промежутке. Точность, с которой получены параметры вращения пульсаров, достаточна для того, чтобы обнаруживать отклонения наблюдаемых интервалов в диапазоне единиц наносекунд с субнаносекундным (менее 1 нс) разрешением. На рис. 2, б представлены отклонения ТТ- и ТВ-интервалов, которые получены по результатам калибровки и связаны с вариациями наблюдаемого периода соотношениями (8), (9). В результате калибровки вариации интервалов наблюдаемых событий не выходят за пределы наносекундного диапазона. Среднее квадратическое отклонение (СКО) топоцентрических интервалов составляет порядка 10 нс в пределах двухлетнего промежутка наблюдений, что сопоставимо с погрешностью атомных шкал, по которым отсчитываются наблюдаемые МПИ и интервалы наблюдаемых событий.

Для сравнения на рис. 2, в показаны вариации остаточных отклонений барицентрических МПИ (СКО 3,6 мс). Нетрудно заметить, что эти вариации, как и вариации топоцентрических интервалов (СКО 3,1 мс), на 5-6 порядков превышают отклонения интервалов, полученных в результате калибровочных преобразований. Важно отметить, что на точность калибровки не оказывают значимого влияния миллисекундные вариации наблюдаемых МПИ, которые имеют случайный характер и не могут быть заранее учтены в модели интервалов. Такое высокое совпадение при калибровке эпох наблюдаемых событий по связываемым с ними опорным интервалам объясняется исключительно свойством когерентности периодического излучения пульсара, по которому находят опорные интервалы.

Особенность модели (4) интервалов наблюдаемых событий излучения пульсаров заключается в том, что в ее составе содержатся два компонента, один из которых определяет интервалы когерентного излучения в соответствии с (11), а другой — $(1 + \alpha_i)$ представляет вариации наблюдаемого периода. Очевидно, что необходимым условием нулевых значений α_i является постоянство воспроизводимой единицы времени — секунды СИ, и в этом случае интервалы наблюдаемых событий определяются периодом когерентного излучения пульсара. Соответственно погрешность калибровки ϵ_i при этом также равна нулю. Если же воспроизводимая атомной шкалой секунда не оказывается строго постоянной в промежутке наблюдений, то ее вариации будут выявлены в модели интервалов в виде изменений коэффициента $(1 + \alpha_i)$. Следовательно, в результате калибровки получаем не только привязку эпохи наблюдаемых событий к фазе когерентного излучения пульсара, но также по изменениям коэффициента $(1 + \alpha_i)$ обнаруживаем и находим расхождение воспроизводимой единицы времени с ее номинальным значением и по нему в соответствии с (10) получаем синхронизирующую поправку шкалы времени в виде отклонений интервалов наблюдаемых событий из-за вариаций секунды атомной шкалы.

Благодаря синхронизирующей поправке, учитывающей вариации единицы времени атомной шкалы, интервалы наблюдаемых событий, выраженные через параметры враще-

ния пульсара, приводятся в соответствие с когерентным излучением пульсара. Таким образом, калибровочные преобразования показывают, что погрешность интервалов наблюдаемых событий зависит только от точности определения наблюдаемого периода когерентного излучения, по которому рассчитывается опорный интервал в соответствии с (4). Расширением формата дробной части периода до 14—15 десятичных знаков достигается субнаносекундное (менее 1 нс) разрешение интервалов, вычисленных по параметрам вращения, независимо от длительности наблюдений. Относительная погрешность определения интервалов не превышает 10^{-18} — 10^{-19} в пределах 40-летней протяженности.

Поскольку вариации α_p , отождествляемые с отклонениями атомной секунды, следуют из наблюдений и содержат кроме того случайные компоненты, не связанные с погрешностью атомной шкалы, для уверенного определения отклонений атомной шкалы и соответственно синхронизирующих поправок могут быть дополнительно с целью фильтрации случайных отклонений применены статистические методы анализа вариаций α_p , например, усреднение по группе синхронно наблюдаемых пульсаров.

Как отмечалось выше, согласно принципу относительности пространство и время образуют единый континуум событий, четырехмерная геометрия которого выражается инвариантным интервалом (1) во всех координатных системах отсчета. Отсюда следует ортогональность пространства линиям времени, что означает одновременность событий (единое время) для всех точек трехмерного пространства в данной системе отсчета. Тогда, рассматривая две декартовы координатные системы, начало одной из которых находится в точке расположения радиотелескопа на Земле, а начало другой — в барицентре Солнечной системы, получаем интервалы местного времени в каждой точке пространства ТТ и ТВ координатных систем на текущую эпоху наблюдений (см. рис. 1, в). В результате калибровочных преобразований интервалов наблюдаемых событий TT_i и TB_i в соответствии с (5) и (6) находим опорные интервалы когерентного излучения, определяемые наблюдаемыми параметрами вращения пульсара (см. рис. 2, б). Так как опорные интервалы наблюдаемых событий привязаны к текущей эпохе наблюдений с наносекундной погрешностью для обеих координатных систем, по их разности с учетом электродинамической постоянной c получаем расстояние между началом ТТ- и ТВ-систем на текущую эпоху наблюдаемого события равно, $c(TT_i - TB_i)$. Погрешность координатных измерений в пространстве зависит от точности интервалов в указанных системах и находится в пределах нескольких метров для любого местоположения начала этих систем в пределах Солнечной системы.

Таким образом, решен комплекс научно-технических задач и получены принципиально новые результаты, откры-

вающие путь к созданию единой высокоточной эталонной меры времени-пространства на основе периодического излучения пульсаров. Показано, что наблюдаемые параметры его вращения — период и производная — согласованы по значениям, тождественны в любой координатной системе и подтверждают когерентность периодического излучения пульсаров в вековом масштабе. Получены численные значения наблюдаемого периода вращения пульсаров, соответствующие определению эталонных интервалов наблюдаемых событий с наносекундной погрешностью и субнаносекундным разрешением. Доказано, что в результате калибровочных преобразований достигается фазовая привязка наблюдаемых интервалов событий излучения к опорным интервалам, определяемым по параметрам вращения пульсара, с относительной погрешностью не более 10^{-18} — 10^{-19} в пределах 40-летней исторической протяженности наблюдений.

В заключение отметим, что благодаря предложенной параметрической модели интервалов наблюдаемых событий выявлены уникальные свойства фазовой стабильности процесса периодического излучения пульсаров на неограниченной протяженности и обосновано создание высокоточных эталонных мер пространства-времени, не имеющих физических аналогов.

Л и т е р а т у р а

1. **Audoin C., Guinot B.** The Measurement of Time. Cambridge: Univ. Press, Masson, Paris, 1998.
2. **Woolard E. W., Clemence G. M.** Spherical Astronomy. N.Y., London: Acad. Press, 1966.
3. **Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли / Под ред. П. А. Красовского.** Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2007.
4. **Smith F. G.** Pulsars. Cambridge: Univ. Press, London, N.Y., Melbourne, 1977.
5. **Логунов А. А.** Анри Пуанкаре и теория относительности. М.: Наука, 2004.
6. **Авраменко А. Е.** Форминвариантность метрики координатного пульсарного времени // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 40—45; **Авраменко А. Е.** Form invariance of coordinate pulsar time metrics // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 5. P. 501—508.
7. **Taylor J. H., Manchester R. N., Lyne A. G.** Catalog of 559 Pulsars// Astrophys. J. Suppl. Ser. 1993. V. 88. P. 529—568.
8. **Hobbs G. B., Manchester R. N.** The ATNF Pulsar Catalogue. Version 1.43 [Электрон. ресурс]. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat> (дата обращения: 25.09.2012).

Дата принятия 19.11.2012 г.

