

# Когерентные свойства рядов хронометрирования пульсаров

© А.Е.Авраменко

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН  
avr@pra0.psn.ru

## Аннотация

Рассматриваются отношения семантически значимых признаков предметной области и наблюдаемых параметров пульсаров как высокостабильных хранителей времени. Получены количественные зависимости параметров, которые детерминируют пульсарное время как когерентный дискретный континуум событий на всей протяженности интервала наблюдений. Сформулированы основные правила, условия, соответствующие этим отношениям и зависимостям. Определены типы переменных, методы моделирования континуума. Приведены некоторые результаты моделирования, примеры выявляемых свойств предметной области.

## 1 Введение

Высокая стабильность параметров собственного вращения пульсаров определила их возможную роль независимых хранителей времени, не уступающих принятым сейчас атомным эталонам [1,2]. По результатам наблюдений пульсаров на уникальных отечественных радиотелескопах РТ-64 (Калязин) и БСА ФИАН (Пушино), выполняемых методами высокоточного фазового анализа моментов прихода импульсов (МПИ) пульсаров [3,4], сформированы и поддерживаются регулярно пополняемые многолетние ряды хронометрирования пульсаров.

Поскольку пульсарное время (РТ) связывается с наблюдаемыми МПИ, которые измеряются в шкале атомного времени (АТ), то возможно их сопоставление и, более того, уточнение атомного времени по вариациям измеряемого РТ [2]. Реализация этой возможности, однако, ограничена тем, что измеряемые моменты событий РТ определяются многими физическими параметрами, как пульсара, так и окружающей среды, значения

которых априори известны лишь приблизительно и уточняются взаимной постнаблюдательной подгонкой, по которой устанавливаются как значения этих величин, так и определяемые ими моменты пульсарных событий. Ограничения обусловлены, во-первых, тем, что подгонка параметров, как процедура итерационная и многовариантная, вносит собственную погрешность при определении наблюдаемых моментов, и, во-вторых, остаточные отклонения, получаемые усреднением множества наблюдательных выборок, являются лишь статистической мерой несоответствия (uncertainty) расчетных и наблюдаемых моментов и потому не могут интерпретироваться как поправки расчетной величины по результатам наблюдений.

По этим причинам установленные подгонкой моменты наблюдаемых пульсарных событий, в отличие от детерминированных расчетных моментов, приобретают признаки статистической неопределенности, которые обусловлены неоднозначностью процедуры подгонки параметров и усреднением множества выборок. Известными экспертами по атомному времени высказывалось даже мнение, что пульсары по своей сущности не могут определить шкалу времени (Guinot B., Petit J., 1991), предложенную ранее (Ильин, Илясов, Кузьмин и др., 1983). По существующим представлениям среднеквадратичная величина немоделируемого шума хронометрирования (статистическая неопределенность), например, для пульсара В1937+21 находится в пределах нескольких микросекунд на интервале 8 лет и более и характеризует внутренние свойства пульсара. Эти свойства определяют величину относительной нестабильности пульсарного времени в пределах  $10^{-14}$  на интервалах 10 и более лет, что соответствует наилучшей стабильности атомного эталона времени, достижимой только на существенно более коротких интервалах [1].

Определяемые расчетным путем по численной модели и известным усредненным параметрам пульсара моменты пульсарных событий представляют собой когерентный временной ряд, детерминированный с высокой точностью на интервале наблюдений практически любой протяженности, вплоть до десятков и более лет. Поскольку остаточные отклонения моментов

наблюдаемых событий по отношению к расчетным достаточно малы, на несколько порядков меньше их абсолютных значений, то можно предположить, что и последовательность наблюдаемых моментов, полученных приближением к расчетным подгонкой параметров, может быть представлена в виде зависимостей от тех же параметров, что и при определении расчетных моментов, но скорректированных по результатам подгонки. Тогда и расчетные, и наблюдаемые моменты представляются в одинаковых форматах когерентных последовательностей взаимосвязанных событий на любом интервале, и по наблюдаемым параметрам пульсара могут быть получены моменты пульсарных событий в таком же детерминированном виде, как и при расчете.

В результате пульсарное время, устанавливаемое по выборочно наблюдаемым событиям, обретает признаки событийной непрерывности как необходимого условия воспроизведения пульсарного времени, с возможностью его сличения с внешним референтом, например, атомным эталоном, в реальном масштабе времени. По значениям параметров модели, которые определяют моменты пульсарных событий, и их вариациям, установленным по результатам подгонки, можно провести сопоставление параметров, полученных статистическими и когерентными методами.

## 2 Наблюдаемые параметры пульсара

Моменты пульсарных событий, наблюдаемых в топоцентрической системе отсчета с началом в фазовом центре радиотелескопа, обычно трансформируют в барицентрическую систему, в которой моменты определяются только параметрами собственного вращения пульсара, соответствующими этой системе [3]:

$$t_N = t_0 + P_0 N + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2 \quad (2.1)$$

где  $t_N$  – момент  $N$ -го события в барицентре, отсчитываемый от некоторого начального момента  $t_0$ ,

$P_0, \dot{P}$  – период вращения пульсара в начальный момент и его производная.

По усредненному значению  $P_0$  на текущую эпоху и величине  $\dot{P}$ , взятой из каталога [5], рассчитываются ожидаемые моменты  $t_N$  относительно  $t_0$  для выбранного события  $N$ .

Как следует из (2.1), значения  $t_N$  отображают когерентную последовательность барицентрических пульсарных событий, момент каждого из которых и интервал между ними определяются параметрами  $P_0, \dot{P}$  для любых значений  $N$  из натурального ряда.

Для того, чтобы последовательность наблюдаемых моментов представить в том же виде, что и расчетных моментов (2.1), но с учетом результатов подгонки параметров, следует принять

во внимание, что, во-первых, мы располагаем ограниченным, неполным рядом наблюдаемых событий (в среднем не более чем одно из  $10^5$ – $10^6$  для пульсара B1937+21), в котором значения  $N$  были выборочно предопределены выполненными наблюдениями, и, во-вторых, полученные в результате подгонки значения интересующих нас параметров вращения  $P_0, \dot{P}$  определяются многими параметрами – пульсара, среды, условий наблюдения, от которых в свою очередь тоже зависят численные значения этих параметров, а также установленные моменты наблюдаемых пульсарных событий. Поскольку полученные при подгонке остаточные отклонения моментов пульсарных событий являются лишь статистической оценкой погрешности наблюдений и не могут повлиять на их результат, то наблюдаемые моменты остаются единственным источником извлечения параметров пульсара  $P_0, \dot{P}$ , по которым может быть получен когерентный ряд наблюдаемых событий.

При определении численных значений параметров  $P_0, \dot{P}$  по наблюдаемым моментам должны учитываться следующие условия, которые соответствуют смыслу и отношению параметров в выражении (2.1):

- в качестве значения  $t_0$  устанавливается момент пульсарного события, принятого за начало интервала наблюдения;
- за начальный период  $P_0$  принимается среднее значение периода в интервале, предшествующем текущему;
- значение периода в интервале между наблюдениями принимается как константа – средняя величина, которая в пределах интервала не меняется;
- численная величина  $\dot{P}$  определяется как разность значений средней величины периода в текущем и предшествующем интервалах, отнесенная к длительности текущего интервала.

Было показано [6], что с учетом этих условий интервал между наблюдаемыми пульсарными событиями отображается в виде двух численных компонентов. Один из них представляет собой произведение  $P_0 N$  ( $N$  – число событий в текущем интервале), а другой, численно равный разности между моментами наблюдаемых событий в текущем интервале и значениями  $P_0 N$  для них, – величину смещения момента наблюдаемого события, обусловленного производной периода в этом интервале. По установленной величине смещения (2-й компонент) методом квадратичной интерполяции этой величины в текущем интервале определяется значение поправки, добавляемой к  $P_0 N$ , а их сумма представляет собой моменты событий, соответствующих наблюдаемому в

текущем интервале, для любого значения  $N$  в пределах этого интервала.

На Рис.2.1 приведен пример интерполяционной поправки для пульсара B1937+21 в интервале между наблюдениями 23.01.2001г. (принятого за начало отсчета) и 26.01.2001г. Значение  $P_0$  было определено по интервалу между начальным (23.01.2001г.) и предыдущим (22.01.2001г.) моментами наблюдаемых событий.

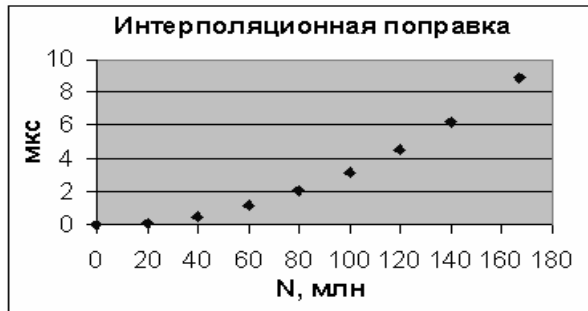


Рис.2.1. Пример интерполяционной поправки

*PSR B1937+21*

$P_0=0,001557806509046980$  с (предшествующий интервал)

$P_1=0,001557806509100060$  с (текущий интервал)

Число событий в текущем интервале  $N_1=167067537$

Длительность текущего интервала  $260258,89659792$  с

Производная периода  $\dot{P}=2,03951E-19$

Двухкомпонентное представление интервалов наблюдаемых пульсарных событий позволяет определить время каждого события в интервале наблюдения по установленным моментам наблюдаемых событий на границах этого интервала. Вместе с тем надо учитывать следующие особенности и связанные с ними ограничения метода.

1. Численные значения производной  $\dot{P}$ , устанавливаемые по изменениям среднего значения периода на выделенном интервале наблюдения по отношению к предыдущему, характеризуются выраженными случайными вариациями (до 100% и более по абсолютным отклонениям) [6]. Эти вариации, очевидно, следует отнести на счет инструментальных погрешностей измерения моментов пульсарных событий, которые также носят случайный характер.
2. Значительные вариации параметров пульсара  $P_0, \dot{P}$ , определяемых в выделенных интервалах наблюдаемых событий, не позволяют приблизиться на относительно небольших интервалах наблюдения (менее года) к точности расчетной модели.
3. Используемые методы усреднения остаточных отклонений с целью уменьшения вариаций наблюдаемых МПИ, а также хронометрирование одновременно нескольких пульсаров [2] также направлены

лишь на улучшение статистических характеристик рядов наблюдаемых МПИ, в большей степени относятся к оценке потенциально достижимой долговременной стабильности и в меньшей степени – к характеристике МПИ как последовательности взаимосвязанных событий.

Двухкомпонентное представление моментов пульсарных событий позволяет определить время каждого события в интервале наблюдения по установленным моментам наблюдаемых событий на границах этого интервала. Вместе с тем, значительные вариации параметров пульсара  $P_0, \dot{P}$ , определяемых в выделенных интервалах наблюдаемых событий, не позволяют приблизиться к точности расчетной модели на относительно небольших интервалах наблюдения (менее года) и ограничивают возможность реализации преимуществ пульсаров как высокостабильных хранителей времени, присущего им на больших интервалах (в несколько лет).

Задача заключается в том, чтобы определить параметры  $P_0, \dot{P}$  в протяженном интервале, содержащем достаточно большое число пульсарных событий и измеренных моментов, с тем чтобы уменьшить случайную составляющую вариаций установленных параметров  $P_0, \dot{P}$  и соответственно снизить их влияние на временные характеристики моделируемого ряда как последовательности взаимосвязанных во времени пульсарных событий.

### 3 Когерентный ряд пульсарных событий

Когерентный ряд событий, отображаемый во временной области, предполагает параметрическую детерминированность их моментов, фиксируемых в заданном интервале. Для достижения когерентности моделируемой последовательности наблюдаемых пульсарных событий должны быть выполнены следующие условия:

1. Установленное по предшествующим наблюдениям значение параметра  $P_0$  должно относиться ко всему интервалу, включающему рассматриваемую последовательность событий, и оставаться в нем неизменной для всех событий.
2. Установленное по моментам наблюдаемых событий значение производной  $\dot{P}$  должно также относиться ко всему интервалу, но, в отличие от величины  $P_0$ , значение параметра  $\dot{P}$  устанавливается по моментам событий, находящихся внутри интервала.
3. При расширении рассматриваемого интервала добавлением новых наблюдаемых событий значение параметра  $\dot{P}$  уточняется после каждого добавления.

Значение  $\dot{P}$  в интервале будем определять по вариациям длительности интервала, ограниченного начальным и последним наблюдаемыми событиями, по отношению к постоянной для данного интервала величине  $P_0N$ .

Соотношение (2.1) для моментов наблюдаемых событий, отсчитываемых от начального ( $t_0 = 0$ ), приводится к следующему виду:

$$t_N = (1 + \frac{1}{2} \dot{P}N) P_0N \quad (3.1)$$

Поскольку по абсолютной величине  $P_0$  на много порядков превосходит значение  $\dot{P}$ , то моменты  $t_N$  могут быть представлены как линейное приближение суммарного интервала, включающего все наблюдаемые события рассматриваемого интервала, а по вариациям линейного приближения, причиной которого являются изменения периода, определяется значение  $\dot{P}$  с учетом моментов всех наблюдаемых событий в интервале.

Суммарный наблюдаемый интервал  $dTB_{summi}$  от начального до  $i$ -го события:

$$dTB_{summi} = dTB_1 + dTB_2 + \dots + dTB_i,$$

где  $dTB_i = TB_i - TB_{i-1}$

Искомое линейное приближение  $dTB_{summi\_lini}$  суммарного наблюдаемого интервала  $dTB_{summi}$  выражается в виде:

$$dTB_{summi\_lini} = (1 + \alpha_i)(P_0N)_i, \alpha_i \ll 1 \quad (3.2)$$

где  $\alpha_i$  - относительная величина отклонения линейного приближения суммарного интервала наблюдаемых событий от величины  $(P_0N)_i$ , соответствующего этим же событиям;

$N$  - число пульсарных событий, имевших место быть от начального до  $i$ -го наблюдаемого события.

Численные значения  $d(P_0N)_i$  отклонений интервалов в фиксированных точках  $(P_0N)_i$  определяются:

$$d(P_0N)_i = \alpha_i(P_0N)_i \quad (3.3)$$

По установленной величине  $\alpha_i$  с учетом (3.1) и (3.2) определяется значение производной периода:

$$\dot{P} = 2\alpha_i / N_i \quad (3.4)$$

Таким образом, производная периода вращения пульсара определяется линейным приближением наблюдаемого интервала к фиксированным значениям  $(P_0N)_i$  и обратно пропорциональна известному числу пульсарных событий, относящихся к этому интервалу. По величине  $\alpha_i(P_0N)_i$ , представляющей собой отклонение линейных приближений от фиксированных

значений наблюдаемых интервалов, определяется квадратичная интерполяционная поправка моментов наблюдаемых пульсарных событий внутри интервала наблюдений (Рис.2.1).

В Таблице 3.1 представлены результаты определения производной периода и величины обусловленного ею смещения моментов наблюдаемых событий, полученных методом линейных приближений. В качестве исходных данных использованы барицентрические моменты пульсара В1937+21 по наблюдениям на радиотелескопе РТ-64 в Калязине в 1999-2000гг. (В.В.Орешко, ПРАО ФИАН). В качестве начального принят момент события на дату 11.11.1999г. Ему соответствует значение периода в начальный момент  $P_0=0,001557806504158590$ , которое было определено как усредненное значение периода на интервале, предшествующем начальной дате.

Таблица 3.1. Производная наблюдаемого периода пульсара В1937+21 и смещение ТВ по линейному приближению

Календ. дата	Интервал от начала, $dTB_{summi}$ , с	Производная $2\alpha_i / N_i$	Смещение $\alpha_i(P_0N)_i$ , с
11.11.99	0		
22.11.99	1	970345,72523325	
06.12.99	2	2153318,00578272	<b>4,76692E-19</b>
17.12.99	3	3108308,14423720	<b>3,47791E-19</b>
05.01.00	4	4754097,18551209	<b>2,44385E-19</b>
17.01.00	5	5785810,62490612	<b>2,10348E-19</b>
31.01.00	6	6991540,63313472	<b>1,82761E-19</b>
16.02.00	7	8375399,46268472	<b>1,60837E-19</b>
25.02.00	8	9151816,18544517	<b>1,52675E-19</b>
20.04.00	9	13899820,26765910	<b>1,12696E-19</b>
28.04.00	10	14606798,86237420	<b>1,11996E-19</b>
04.05.00	11	15111932,32784570	<b>1,11095E-19</b>
06.05.00	12	15283017,51924320	<b>1,11578E-19</b>
10.05.00	13	15628806,82675630	<b>1,10528E-19</b>
11.05.00	14	15717137,95452220	<b>1,10925E-19</b>
12.05.00	15	15805721,06060600	<b>1,1109E-19</b>
15.05.00	16	16067336,86703740	<b>1,10045E-19</b>
26.05.00	17	17010236,80213790	<b>1,05151E-19</b>

Из Таблицы 3.1 следует, что в первоначальный период наблюдений последовательность интервалов наблюдаемых событий избавляется от явно выраженных вариаций наблюдаемого периода вращения пульсара, обусловленных ограниченным интервалом наблюдения, и приобретает свойство устойчивости по критерию приближения производной периода к ожидаемому усредненному значению. Это свойство сохраняется и по мере увеличения протяженности интервала наблюдений.

В результате линейного приближения наблюдаемых интервалов к их фиксированным значениям определяется величина производной периода вращения пульсара. По этому значению производной, с учетом установленного значения начального периода, находятся моменты любого пульсарного события относительно некоторого

выбранного начального, независимо, наблюдались рассматриваемые события или нет. Моменты и интервалы наблюдаемых пульсарных событий детерминированы наблюдаемыми параметрами вращения пульсара и выражаются в когерентном виде, аналогично предсчитываемым (по 2.1).

#### **4 Семантическая согласованность переменных**

Ввиду статистической неопределенности наблюдаемых величин – моментов и интервалов пульсарных событий, которые получены в результате многопараметрической подгонки, возникает необходимость уточнения их взаимного соответствия, согласованности, исходя из содержания, смысла предметной области, особенностей рассматриваемого приложения. Как правило, процедуры подгонки, основанные на довольно сложных и объемных численных моделях предметной области, предполагают решения общего вида, не учитывающие специфику каждого конкретного приложения. Этим решениям присущи следующие ограничения:

- Вследствие множественных отношений переменных сложно выделить преимущественное влияние тех из них, которые определяют содержание предметной области в рамках рассматриваемого приложения.
- Реализуемые критерии многопараметрической подгонки могут оказаться неоптимальными применительно к рассматриваемому приложению.

Семантическая согласованность наблюдаемых переменных в условиях их статистической неопределенности достигается совмещением двух взаимодополняющих подходов отображения предметной области в ее параметрическом пространстве [7]:

1. Метод «сверху-вниз» (top-down) от обобщенной модели предметной области к ее параметрам, обусловленным спецификой рассматриваемого приложения.
2. Метод «снизу-вверх» (bottom-up), основанный на последовательном обобщении спецификаций, условий, ограничений, определяемых содержанием приложения, в параметрическом пространстве модели предметной области.

Объединение этих методов позволяет выявить влияние переменных в процессе анализа рассматриваемого приложения и учесть его последствия при уточнении условий, ограничений обобщенной модели применительно к приложению.

Так, например, из-за того что пульсарное время  $P_T$  наблюдаемых событий и атомное время  $A_T$ , с помощью которого измеряется  $P_T$ , взаимозависимы, то в отсутствие дополнительного внешнего референта изменение хода одного из них может быть в равной степени отнесено к другому. В

результате введения в 1967г. (по совпадению, в год открытия пульсаров) атомной секунды в качестве общепринятой единицы времени, не связанной с циклическим движением небесных тел (к которым принадлежат и пульсары), атомное время не совпадает с принятым международным временем UTC и расходится с ним на 1 секунду приблизительно за полтора года. Для сравнения, из-за непостоянства периода пульсарное время  $P_T$  смещается в этом интервале всего на несколько миллисекунд. Как следствие, если бы для измерения барицентрических моментов пульсарных событий использовалась прежняя секунда, определяемая как фиксированная доля тропического года, то наблюдаемая величина производной периода отличалась бы приблизительно на два порядка от значения, установленного по атомному эталону. Для согласования наблюдаемых величин периода и производной пришлось бы переопределить значение периода по предыдущей единице времени. Впрочем, для других приложений, не связанных с ведением пульсарного времени, эта несогласованность не имеет определяющего значения, и до сих пор учитывалась периодически вводимой поправкой атомного времени скачком на 1с.

Производная периода, таким образом, является очень чувствительным наблюдаемым параметром, который, будучи по абсолютному значению на много порядков меньше значения периода, отражает даже очень небольшие его вариации, которые трудно заметить непосредственно по наблюдаемым моментам и остаточным отклонениям. В процессе постнаблюдательной подгонки численные значения периода вращения пульсара и его производной, которые определяют свойства пульсара как хранителя времени, требуют тщательной совместной оценки с учетом влияния всех параметров подгонки и условий наблюдения. Отметим, что наблюдаемые вариации периода, тренды производной на длительных интервалах (Таблица 3.1), которые формально не противоречат численным результатам подгонки по действующему критерию минимизации результирующей погрешности, также нуждаются в тщательной проверке их причин. При неизменных условиях наблюдений и высокой стабильности параметров пульсара одной из таких причин может оказаться артефакт многопараметрической подгонки вследствие неадекватного учета отдельных параметров.

Выявление отношений переменных обобщенной модели и наблюдаемых величин с учетом особенностей, ограничений, определяющих свойства предметной области приложения, позволяет оценить влияние переменных, условий наблюдения, систем отсчета. Исходные наблюдательные данные трансформируются в семантически значимые переменные приложения, создавая целостную структуру представлений, знаний с возможностью их разделения различными

приложениями (knowledge sharing), их повторного использования [8].

Отображение рядов хронометрирования пульсаров с помощью численной модели, переменные которой определяются исключительно наблюдаемыми величинами, позволяет через установленные количественные отношения выявить свойства объекта, относящиеся к рассматриваемой предметной области. Такой подход позволяет:

- селективировать данные, пригодные для конкретного приложения, с учетом требуемого диапазона существенно значимых переменных;
- оценивать степень влияния условий наблюдения и методов обработки на выявляемые свойства предметной области;
- прогнозировать поведение объекта по наблюдаемым параметрам.

Сопоставление свойств объектов и численных значений наблюдаемых величин, их взаимозависимостей и вариаций позволяет выявлять устойчивые закономерности предметной области, распространяя выявленные свойства, используемые правила, методы также и на другие приложения.

## 5 Моделирование когерентных рядов

### 5.1 Концептуальные основы

Детерминированные величины параметров вращения пульсаров, установленные по наблюдаемым пульсарным событиям, позволяют моделировать непрерывный ряд пульсарных событий, моменты и интервалы которых полностью определяются установленными по наблюдениям значениями параметров вращения пульсара. Для того, чтобы некоторый временной ряд, в том числе и ряд наблюдаемых пульсарных событий, мог выполнять роль измерительной шкалы времени, должны быть соблюдены следующие необходимые условия:

- ряд событий, по которым отсчитывается время, должен быть непрерывным, без пропусков и промежутков,
- события ряда должны представлять не только прошлое, но также настоящее и будущее время,
- моменты событий временного ряда должны быть доступны из любого места.

Для атомного времени, основанного на счете событий стабильной частоты, выполнение этих условий и требований особых проблем не вызывает. Для пульсарного времени, формируемого по событиям, которые наблюдаются лишь выборочно, эпизодически, а моменты определяются постнаблюдательной компьютерной обработкой и принадлежат прошлому, требуются специальные меры, которые реализуются методами моделирования когерентных рядов.

Воспроизведение, или имитация (simulation) непрерывного ряда событий представляет собой компьютерный эксперимент, и он выполняется в тех случаях, когда этот ряд не может быть получен

непосредственным и непрерывным наблюдением физического явления, выступающего носителем измеряемой величины. В данном случае с помощью физических измерений невозможно получить непрерывный ряд наблюдаемых пульсарных событий.

Общий подход заключается в том, чтобы перейти от рассмотрения рядов как набора, совокупности наблюдательных данных к представлению их как потока данных, событий (data sets as data streams) [9]. При этом результаты моделирования рассматриваются как дискретные приближения в протяженной среде принятого параметрического пространства, а переменные моделирования устанавливаются двух типов: узловые и зональные. Узловые (nodal) переменные определяются и принадлежат выделенным точкам среды, а зональные (zonal) относятся к некоторой ее протяженности. Переменные величины в точках между узлами могут быть получены интерполяцией узловых величин, линейной или более высоких порядков, а в случае зональных переменных их величины ассоциируются с каждой зоной, внутри которой эти величины обычно принимаются как константы.

Применительно к рассматриваемому приложению целью компьютерного эксперимента является моделирование непрерывного ряда пульсарных событий, поскольку получить такой ряд непосредственно в наблюдениях невозможно. Задача состоит в воспроизведении моментов пульсарных событий относительно некоторого начального момента, независимо, наблюдались они или нет, причем моделируемые моменты должны быть доступны для извлечения в реальном времени, определяемом по независимому внешнему референту времени.

В качестве узловых переменных модели непрерывного ряда пульсарных событий приняты:

- начальный момент интервала наблюдений, от которого отсчитываются моменты остальных событий в этом интервале;
- моменты пульсарных событий в точках наблюдения.

К зональным переменным относятся:

- начальный период, который принимается как константа на всем интервале наблюдений;
- производная периода, которая определяется как константа по моментам всех пульсарных событий, содержащихся в текущем интервале наблюдений, и модифицируется при добавлении новых событий, наблюдаемых в этом интервале;
- количество пульсарных событий в текущем интервале наблюдений относительно начального момента, априорно известная величина для каждого наблюдаемого события.

Ниже приведены примеры моделирования непрерывных событийных рядов, определяемых параметрами, которые установлены по наблюдаемым пульсарным событиям.

## 5.2 Непрерывный ряд в реальном времени

Поскольку устанавливаемые в наблюдениях моменты пульсарных событий выявляются путем постнаблюдательной компьютерной обработки наблюдательных данных, они относятся к уже прошедшему времени. По этой причине временной ряд наблюдаемых пульсарных событий не отражает их состояние на текущую эпоху.

На основе разделения численного значения устанавливаемых моментов пульсарных событий на два компонента, один из которых,  $(P_0N)_i$ , определяется средним значением периода  $P_0$  на предыдущем интервале наблюдений, которое принимается в качестве начального периода для следующего интервала, получаем текущие значения моментов пульсарных событий путем экстраполяции по установленной величине среднего значения наблюдаемого периода в предыдущем интервале.

После измерения наблюдаемого события в конце этого интервала определяется величина второго компонента  $d(P_0N)_i$ , численно равной отклонению  $(P_0N)_i$  от его линейного приближения в интервале, отсчитываемом от выбранного начала (3.3).

Число наблюдаемых событий в интервале должно быть выбрано таким образом, чтобы вариации производной периода не зависели от ограниченности интервала наблюдений, когда инструментальная погрешность имеет преобладающее влияние (Рис.3.1). По мере добавления наблюдаемых событий формируется последовательность значений второго компонента в каждой точке наблюдения, численно равных, в соответствии с Таблицей 3.1, смещению моментов  $(P_0N)_i$  в этих точках.

Число наблюдаемых событий в интервале должно быть выбрано таким образом, чтобы вариации производной периода не зависели от ограниченности интервала наблюдений, когда инструментальная погрешность имеет преобладающее влияние. По мере добавления наблюдаемых событий формируется последовательность значений второго компонента в каждой точке наблюдения, численно равных, в соответствии с Таблицей 3.1, смещению моментов  $(P_0N)_i$  в этих точках.

По установленным смещениям моментов  $(P_0N)_i$  рассчитывается значение интерполяционной поправки  $\Delta\tau_k$  для любого события внутри интервала:

$$\Delta\tau_k = \alpha_i(P_0N)_i \frac{k^2}{N^2} \text{ для } (1 \leq k \leq N)$$

Характер поправки  $\Delta\tau_k$  ничем не отличается от Рис.2.1, за исключением того, что она относится к

событиям всего интервала наблюдений, отсчитываемого от начального момента.

В результате в реальном масштабе времени в течение всего интервала между наблюдениями формируется последовательность моментов пульсарных событий с установленным начальным периодом. По измеренному моменту наблюдаемого события по истечении этого интервала определяется величина второго, уточняющего компонента, суммируемого с экстраполированными моментами каждого события в этом интервале.

Полученный по выборочным наблюдениям непрерывный ряд моментов пульсарных событий, каждый из которых содержит два компонента: один определяется неизменным в интервале начальным периодом, а второй получается сопоставлением текущих экстраполированных значений с результатом выполненных наблюдений, напоминает по технологическим признакам поддерживаемую на радиотелескопах шкалу местного времени. Местное время радиотелескопа формируется с помощью локального атомного эталона, показания которого уточняются поправкой по результатам сличений с показаниями внешнего эталона времени, например, GPS, выступающего в качестве референта. Суммарные значения отсчетов времени, вместе с поправкой, служат в качестве показаний шкалы местного времени. Регулярные таблицы поправок ведутся на радиотелескопах в Калязине (РТ-64) и в Пушино (БСА ФИАН) и публикуются в виде Бюллетеня Службы единого времени радиотелескопов:

<http://psun32.prao.psn.ru/data/TS/index.html>.

По аналогии с локальным атомным эталоном, в реальном времени воспроизводится детерминированная последовательность пульсарных событий с постоянным периодом  $P_0$ , отсчитываемых относительно выбранного начального момента. По линейным приближениям наблюдаемых моментов определяется величина смещение  $d(P_0N)_i$ , по которой рассчитывается интерполяционная поправка, которая в сумме с исходной величиной  $(P_0N)_i$  образует значение момента любого пульсарного события в интервале наблюдения.

Полученный таким образом непрерывный ряд моментов пульсарных событий содержит в себе признаки вариаций наблюдаемого периода (частоты) пульсара, которые обусловлены как физическими свойствами наблюдаемого объекта, так и инструментальными погрешностями средств наблюдения.

## 5.3 Синтез единичных интервалов

Сопоставление пульсарного и атомного времени ведется по установленной единице величины, или единичному интервалу. Такой интервал, определенный счетной формулой событий периодического процесса известной и стабильной частоты, исходно положен в основу формирования

шкалы атомного времени. Пульсарное же время, в отличие от атомного, не только не имеет собственного частотного эквивалента единицы времени, но, более того, является координатно-зависимой величиной, которая определяется выбранной пространственной системой отсчета.

Тем не менее, воспроизведение единичных интервалов времени по наблюдаемым пульсарным событиям возможно, если принять во внимание следующие свойства метрики пространства-времени:

1. В любой системе отсчета время  $T$  события в точке с координатами  $X, Y, Z$  определяется в соответствии с 4-мерным инвариантом пространства-времени [10]:

$$J = c^2 T^2 - X^2 - Y^2 - Z^2 \quad (5.1)$$

где  $c$  - скорость света.

2. Пересчет времени наблюдаемых событий из одной системы отсчета в другую, например, из топоцентрической в барицентрическую, выполняется с помощью детерминированных координатно-временных преобразований.
3. Моменты событий, установленных в различных системах отсчета, эквивалентны с учетом геометрии пространства-времени.

Единичные интервалы в виде последовательности дат можно установить по наблюдаемым барицентрическим параметрам вращения пульсара. Даты секунд  $PS_j$ , отсчитываемые относительно начального момента  $TB_0$ , выражаются:

$$PS_j = TB_0 + jM(P_0 + I), \quad (5.2)$$

где  $j = 1, 2, 3, \dots$  – номер секунды,

$I$  – величина инкремента наблюдаемого периода, постоянная в интервале наблюдений,  
 $M$  – целое число наблюдаемых периодов, содержащихся в единице времени.

Численные значения  $I$  и  $M$  определяются установленными в наблюдениях параметрами:

$$I = (1/P_0 - M)P_0 / M \quad (5.3)$$

Для пульсара B1937+21:

$$1/P_0 = 1/0,0015578\dots = 641,9282459\dots, \quad M = 641.$$

Единичные интервалы, выраженные через наблюдаемые барицентрические параметры, могут быть интерпретированы как численные величины, кратные периоду вращения пульсара, который наблюдается в некоторой координатной системе, центр которой совпадает с барицентром, но движется в направлении барицентр – пульсар с некоторой скоростью  $v$ , детерминированной наблюдаемыми барицентрическими параметрами вращения. Нетрудно показать на основании (5.1) и (2.1), что значение этой скорости при условии  $v < c$  выражается по Лоренцу [10]:

$$v = \frac{c(1 - MP_0)}{MP_0} - \frac{1}{2} c \dot{P} N \quad (5.4)$$

В такой координатной системе период наблюдаемых пульсарных событий есть величина постоянная и связанная с единичным интервалом времени кратным отношением. При этом значения скоростей движения центра координатной системы  $v$  однозначно определяются барицентрическими моментами наблюдаемых пульсарных событий и соответствующими им параметрами  $P_0, \dot{P}$ . Значение инкремента  $I = 0$ .

Благодаря строгой детерминированности отношений моментов наблюдаемых пульсарных событий и моделируемых моментов событий единичных интервалов даты секунд для всех MJD при любых значениях  $j$  ( $0 \leq j < 86400$  в пределах суток) различаются точно на это целое число, сохраняя неизменной дробную часть, определяемую выбранным началом отсчета.

## 6 Пример моделирования пульсарного времени

Непрерывный ряд моделируемых пульсарных событий в шкале атомного времени UTC представлен на комбинированном Табло <http://pulsar-time.psn.ru/> (раздел «Табло времени»). Здесь для пульсара B1937+21 показан текущий ряд дискретных интервалов, которые содержат целое число  $M=641$  периодов вращения пульсара и принимаются за барицентрическое пульсарное время (без учета поправки за переменность периода). Табло поддерживает две формы отображения пульсарного и атомного времени: в виде текущих цифровых отсчетов и кругового (циклического) стрелочного индикатора. Обновление отсчетов времени и показаний стрелочного индикатора происходит каждую секунду UTC. Положение стрелки индикатора пульсарного времени определяется разностью между временем пульсарной секунды и пульсарным барицентрическим временем на один и тот же момент (секунду) времени UTC. Установка численных значений  $M, I, P_0$  параметров пульсара, начальных значений юлианской даты, даты местного времени, режимов индикации осуществляется через web-интерфейс Табло.

По установленным параметрам пульсара в реальном времени формируются интервалы барицентрических пульсарных событий и секунд, между которыми видна нарастающая разность. Пульсарная секунда синхронизирована с секундой UTC по установленному в соответствии с (5.3) инкременту  $I$ . Скачкообразные перемещения стрелки пульсарной секунды через каждые 100 с на круговом индикаторе обусловлены особенностями формата времени MJD, отсчитываемого только в секундах на суточном интервале.

## Заключение

Средствами объектных технологий по долговременным рядам хронометрирования



пульсаров были установлены семантически значимые признаки предметной области и связанные с ними измеряемые астрометрическими методами параметры, которые позволяют выявить свойства пульсаров как высокостабильных хранителей времени. Были решены две взаимосвязанные задачи:

1. Выявление зависимостей пульсарного времени от измеряемых параметров на интервалах наблюдения большой протяженности.
2. Отображение дискретного континуума пульсарных событий большой протяженности, включая реальный масштаб времени.

Сформированный пакет методов определения параметров вращения пульсара по наблюдательным данным позволяет получить приближение пульсарного времени в виде когерентного ряда пульсарных событий, детерминированных с высокой точностью на интервале наблюдений практически любой протяженности. Благодаря когерентной форме представления наблюдаемого пульсарного времени существенно снижается его зависимость от вариаций моментов наблюдаемых пульсарных событий.

Получены количественные зависимости параметров вращения пульсара, которые определяют пульсарное время, и наблюдаемых признаков, содержащихся в рядах хронометрирования. Сформулированы основные правила и условия моделирования непрерывного ряда пульсарных событий по выборочным наблюдениям, определены основные типы переменных моделирования. Результаты моделирования представлены как дискретные приближения в среде параметрического пространства предметной области. Выделены узловые переменные, принадлежащие фиксированным точкам среды, и зональные переменные, относящиеся к некоторой ее протяженности. Методами компьютерного эксперимента моделируется непрерывный ряд пульсарных событий, который невозможно получить непосредственно в наблюдениях. Выполняемая работа, основанная на консолидации разрабатываемых методов и наблюдательных данных в объектно-ориентированной компонентной среде приложения, позволяет выявить содержательные признаки рассматриваемой предметной области, моделировать ее физические свойства, обусловленные наблюдаемыми признаками.

Автор выражает признательность Ю.П.Илясову, В.В.Орешко, В.А.Потапову, А.Е.Родину за проявленное внимание к работе, полезное обсуждение и высказанные замечания.

## Литература

[1]. V.M.Kaspi, J.H.Taylor, and M.F.Ryba. High-precision Timing of Millisecond Pulsars. III. Long-term Monitoring of PSRs B1885+09 and B1937+21. //The Astrophysical Journal, 1994, **428**, pp.713-728.

- [2]. G.Petit and P.Tavella. Pulsars and Time Scales. //Astron.&Astrophys., 1996, **308**, pp.290-298.
- [3]. О.В.Дорошенко, С.М.Копейкин Алгоритм высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров. //Астрономический журнал, 1990, **67**, 5, с.986-998.
- [4]. Doroshenko O.V. Timing Model of TIMAPR. <http://psun32.prao.psn.ru/olegd/soft.html> .
- [5]. J.H.Taylor, R.N. Manchester, and A.G.Lyne. Catalog of 558 Pulsars. //The Astrophys. Journal Suppl. Series, 88:529-568, 1993 October.
- [6]. А.Е.Авраменко. Отображение свойств астрометрических событийных рядов как референтов времени. //Труды Шестой Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции». Пушино, 2004, стр. 150-158.
- [7] Y.Sure, S.Staab, R.Studer. Methodology for Development and Employment of Ontology based Knowledge Management Applications. //SIGMOD Record, v.31, No.4, Dec.2002. <http://www.acm.org/sigmod/record/issues/0212/SPE/SIAL/3.Sure.pdf>.
- [8]. B.Klein and T.R.Roth-Berghofer. Philosophy for IT for Knowledge Management. // Proceedings of the WM 2003 Workshop on Knowledge Management and Philosophy. Luzern, April 3rd and 4th, 2003. <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-85/roth.pdf>
- [9]. G.Abdulla, T.Critchlow, W.Arrighi. Simulation Data as Data Streams. // SIGMOD Record, Vol. 33, Number 1, March 2004, pp.89-94. <http://www.sigmod.org/sigmod/record/issues/0403/B7.LLNL.pdf>
- [10]. А.А.Логунов. Лекции по теории относительности. //М., Наука, 2002, с.23-52

*Работа поддерживается грантом РФФИ № 07-03-90219*

## A Coherence of the Pulsar Timing Observed Rows

А.Е.Авраменко

The relations of semantic significant signs of application domain and observed parameters of pulsars as high stable clock-time references, are considered. The quantitative dependencies of parameters, which are determined the pulsar time as a coherent discrete continuum of the observed intervals of pulsar events, are received. The main rules, constraints corresponded to these relations and dependencies, are formulated. The types of variables, methods of modeling of continuum are determined. Some results of modeling, examples of retrieved characteristics of application domain, are presented.

\* Работа поддержана грантом РФФИ № 03-07-90219