

Детерминированное и случайное в отождествлении результатов астрометрических наблюдений пульсаров*

© А.Е. Авраменко

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН

avr@prao.ru

Аннотация

Проведено сопоставление численных результатов отождествления измеряемых физических величин по двум моделям наблюдательных данных хронометрирования пульсаров. Показаны преимущества параметрической модели данных, на несколько порядков превосходящей по точности общепринятую разностную модель. Рассмотрены особенности отождествления по группам временных рядов, полученных в наблюдениях ансамбля пульсаров, в том числе на разных инструментах. Приведены обобщенные оценки достижимой точности для обеих моделей. Показаны примеры приложений коллекции пульсарных данных применительно к задачам рассматриваемой предметной области.

1 Введение

Высокостабильная периодичность импульсного излучения энергии пульсаров определила интерес к ним как к возможным альтернативным хранителям времени, не зависящим от земных условий и обладающим практически неограниченным энергетическим ресурсом. Измерение пульсарного времени основано на динамической модели движения небесных тел, которая определяет их пространственные координаты (интервалы) как функции независимой переменной – времени, которая в свою очередь определяется последовательностью интервалов наблюдаемых пульсарных событий [1].

Обсерватории, располагающие инструментами для наблюдения импульсного излучения пульсаров, проводят их регулярное хронометрирование и накапливают данные в течение многих лет. Наблюдательные данные хронометрирования формируются и поддерживаются, в соответствии с принятым форматом Принстонского университета [2], в виде унифицированных записей, содержащих метаданные, которые отражают условия наблюдений, характеристику инструмента, установочные параметры, и собственно численные результаты наблюде-

ний. Такой набор фиксируемых данных в многолетних коллекциях принят всеми обсерваториями для хранения и обмена. В численном представлении данные хронометрирования содержат:

- моменты прибытия импульсов (МПИ) на дату наблюдения в начало выбранной координатной системы, в качестве которого обычно принимают фазовый центр радиотелескопа или барицентр Солнечной системы;
- остаточные уклонения – разность между расчетными и наблюдаемыми барицентрическими МПИ;
- среднеквадратичные отклонения (СКО) остаточных уклонений МПИ.

По результатам хронометрирования определяются фундаментальные свойства материи, уточняются численные величины физических констант путем выявления влияния физических факторов на условия распространения импульсов излучения пульсара, проявляющихся в виде изменений МПИ. Вычисляются и регулярно уточняются пределы энергетической плотности стохастического фона гравитационного излучения на сверхнизких частотах [2], ведется мониторинг вариаций меры частотной дисперсии МПИ – величины концентрации электронов в ионизированной межзвездной среде в направлении на пульсар [3].

Вопрос точности определения МПИ становится центральным в подобных задачах, от него непосредственно зависит достоверность оценок физических величин. Вместе с тем, принятая оценка по остаточным уклонениям, определяемым как разность расчетных и наблюдаемых МПИ в пределах текущих суток на дату наблюдения, не учитывает абсолютных величин последовательности интервалов, отсчитываемых от общего начала в пределах всего промежутка наблюдений. Расчетные МПИ, по которым вычисляются остаточные уклонения, определяются по заранее принятым значениям параметров, которые напрямую не связаны с результатами текущих наблюдений и априори известны лишь с некоторой конечной точностью. Наблюдаемые МПИ, в свою очередь, подвержены вариациям инструментального и методического происхождения, величина которых сопоставима с остаточными уклонениями и представляет собой статистическую оценку погрешности хронометрирования каждого наблюдаемого события.

Труды 10-й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2008, Дубна, Россия, 2008.

Указанное противоречие было разрешено путем преобразования выборочно наблюдаемых МПИ в последовательность интервалов, определяемых через параметры вращения пульсара, численные значения которых в свою очередь находятся приближением по критерию наименьших квадратов к последовательности наблюдаемых интервалов, которые формируются из наблюдаемых МПИ [4]. В результате выборочные данные трансформируются в дискретный континуум пульсарных событий, который представляет собой последовательность интервалов по всем излучаемым импульсам пульсара в пределах протяженности наблюдений. Интервалы пульсарного времени, детерминированные параметрами вращения пульсара, выделены в явном виде из наблюдаемых интервалов путем декомпозиции их на две последовательности: одна из них определяет собственно пульсарное время, а другая – непараметризуемый остаток, который представляет собой вариации наблюдаемых интервалов, вносимые хронометрированием, средой, другими внешними факторами нестабильности.

Для приведения формата наблюдательных данных в соответствие с их параметрическим представлением потребовалось учесть особенности представления интервалов пульсарного времени, детерминированных параметрами вращения пульсара в пределах протяженности наблюдений. Исходные наблюдательные данные, кроме содержащихся в них МПИ в пределах суток на дату наблюдения, которые определены форматом Принстонского университета, дополнены значениями интервалов между соседними наблюдаемыми событиями, по которым находятся величины суммарных интервалов от начального до любого события в пределах протяженности наблюдений. В коллекцию включены также установленные по наблюдаемым интервалам численные величины параметров вращения пульсара и случайные, не параметризуемые моделью хронометрирования, вариации наблюдаемых интервалов [5].

Благодаря трансформации наблюдательных данных к параметрическому виду, представляющему собой дискретный континуум пульсарных событий в пределах протяженности наблюдений, который не зависит критически от случайных вариаций наблюдаемых интервалов, стабильность интервалов пульсарного времени, синтезированного по параметрам вращения пульсара, оказалась несопоставимо, на несколько порядков выше, чем в последовательности исходных МПИ и их остаточных уклонений.

В связи с этим возникает задача рассмотреть, каким образом новые возможности коллекции пульсарных данных отразятся на результатах отождествления наблюдаемых физических величин применительно к приложениям предметной области. Во-первых, требуется определить численные отношения между результатами измерений физических величин и их вариациями, с одной стороны, и вычисленными значениями, изменениями наблюдаемых параметров вращения пульсара, по которым

определяются физические величины, с другой стороны. Во-вторых, требуется найти такие подходы и средства, которые реализуют достижимую точность определения наблюдаемых параметров вращения пульсаров, с учетом их уникальной долговременной стабильности и принципиально более высокой устойчивости к случайным вариациям наблюдаемых интервалов.

На решение этой двуединой задачи направлена настоящая работа. Будет проведено сопоставление результатов измерений наблюдаемых физических величин разностным методом – по остаточным уклонениям для каждого наблюдаемого события, а также по дискретному параметризованному континууму пульсарных событий в пределах протяженности наблюдений. Должны быть получены сравнительные оценки погрешностей результатов по обоим вариантам. Будут рассмотрены методы и средства формирования последовательностей параметризованных временных рядов коллекции, отвечающей требованиям минимизации влияния вариаций наблюдаемых интервалов.

Особое внимание уделено правилам отбора наблюдательных данных по критерию достоверности отождествления результатов наблюдений, а также выявлению признаков наблюдательных данных, не совместимых с параметрической моделью и ограничивающих их использование для измерений. Будут рассмотрены условия и признаки согласованности данных по группе (или ансамблю) наблюдаемых пульсаров, включая наблюдения одних и тех же пульсаров на различных инструментах.

В результате должны быть выявлены условия и количественные оценки наилучшего соответствия временных рядов пульсарного времени по данным хронометрирования для решения проблемно-ориентированных задач предметной области.

2 Отождествление физических величин по наблюдательным данным

Целью хронометрирования является получение количественных характеристик наблюдаемых и взаимодействующих с ними физических объектов по результатам измерений, содержащихся в численных рядах наблюдательных данных. От того, какие данные и в каком виде берутся в качестве исходных и какие применяются правила, отношения, связывающие свойства физических объектов и их признаки по исходным наблюдательным данным, зависят результаты отождествления, достоверность и надежность выявленных свойств.

Сопоставим с этой точки зрения две модели данных хронометрирования – разностную, в основу которой положены остаточные уклонения МПИ наблюдаемых пульсарных событий [2], и параметрическую, в которой наблюдательные данные представлены в виде последовательности интервалов, детерминированных наблюдаемыми параметрами вращения пульсара [5]. Выделим в рассматриваемых моделях те особенности, которые определяют

специфику выявления свойств наблюдаемых объектов, их отношения с наблюдаемыми признаками.

2.1 Две модели наблюдательных данных

Структура барицентрических наблюдательных данных в формате Принстонского университета на основе разностной модели хронометрирования приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Фрагмент архива пульсарных данных Принстонского университета [2]

PSR	TOA_bry (MJD)	resid (μ s)	err (μ s)	freq_bry (MHz)	Del_DM (cm-3 pc)
1937+21	47541.6518	0.686	0.34	2385.0196	0.000926
1937+21	47544.6458	1.126	0.32	2370.0103	0.000926
1937+21	47556.6093	1.207	0.16	2374.9734	0.000793
1937+21	47586.5358	0.925	0.14	2389.8897	0.000588
1937+21	47613.4625	0.549	0.14	2379.8407	0.000456
1937+21	47664.3236	0.764	0.22	2364.8436	0.000197
1937+21	47676.2990	0.456	0.20	2374.8611	0.000232
...

Наблюдательные данные представляет собой последовательность однотипных записей, каждая из которых включает набор численных величин, относящихся к текущей дате наблюдений MJD. Это прежде всего остаточные отклонения МПИ (resid) и их статистическая оценка СКО (err). Кроме того, приведены измеренные отклонения Del_DM меры дисперсии DM, сопоставленные с частотой излучения энергии пульсара freq_bry. Две последние величины учитываются при вычислении остаточных отклонений методом подгонки (фиттинга) параметров пульсара и среды распространения импульсов излучения.

Параметрическая модель данных [4] определяет связь интервалов наблюдаемых импульсов пульсара с периодом вращения пульсара и его производной:

$$\sum_i dTB_i = (1 + \alpha_i)(1 + 0,5\dot{P})P_o^* N + R_i \quad (1)$$

$$P_o = (1 + \alpha_i)P_o^*, \quad (2)$$

где $\sum_i dTB_i$ – наблюдаемые в барицентре Солнечной системы интервалы от начального до i -го наблюдаемого события, P_o, \dot{P} – наблюдаемый в барицентре период вращения пульсара и его производная, N – общее число излученных импульсов пульсара от начального до i -го наблюдаемого, P_o^* – расчетное значение периода на начальную эпоху наблюдений, $(1 + \alpha_i)$ – коэффициент линейного приближения методом наименьших квадратов наблюдаемых интервалов к параметрическому виду, R_i – непараметризуемый остаток.

Параметрическая модель оперирует целостным представлением всей последовательности интервалов пульсарного времени, которые определяются численными параметрами вращения пульсара и отсчитываются от одного и того же начального собы-

тия. В явном виде выделен непараметризуемый остаток наблюдаемых интервалов R_i (1). Детерминированная параметрическая составляющая интервалов зависит от коэффициента $(1 + \alpha_i)$, который характеризует величину отклонений наблюдаемого периода вращения и таким образом представляет собой обобщенный количественный показатель неустойчивости наблюдаемого периода и соответственно пульсарного времени в пределах всей протяженности наблюдений. Он учитывает последствия влияния всех факторов неустойчивости, включая вариации меры дисперсии, и служит непосредственной мерой погрешности наблюдаемого периода и определяемых им интервалов пульсарного времени под влиянием этих факторов. Очевидно, в соответствии с (1), что условием идеальной стабильности является нулевая величина непараметризуемого остатка и, как следствие, постоянство коэффициента $(1 + \alpha_i)$ и соответственно периода P_o в пределах всей протяженности наблюдений. По степени отклонения этого коэффициента от единичного значения определяется реальная стабильность наблюдаемых интервалов и их детерминированной составляющей – пульсарного времени.

Благодаря введению интервалов пульсарного времени в параметрическую модель наблюдательных данных достигается, во-первых, переход от разностных характеристик МПИ отдельных наблюдаемых событий и их статистических характеристик к последовательности интервалов в виде дискретного континуума, детерминированного стабильными параметрами вращения пульсара. Во-вторых, параметрическая модель содержит в явном виде и определяет отклонение периода – времязадающего параметра модели пульсарных данных, что позволяет получить непосредственные величины погрешностей пульсарного времени и учитывать их последствия в контексте задач предметной области.

2.2 Отображение физических величин в моделях данных

В этом разделе рассмотрены особенности отображения меры частотной дисперсии DM, которая характеризует частотно-зависимое запаздывание моментов импульсов при распространении излучаемой энергии пульсара, зависящее от концентрации электронов в ионизированной межзвездной среде в направлении на пульсар.

В работе [2] было обнаружено монотонное уменьшение меры дисперсии в направлении на пульсар В1937+21 в пределах 8-летнего промежутка наблюдений (1985–1993 гг.) со скоростью порядка $0,001 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-3}/\text{год}$ (рис. 2а). С другой стороны, запаздывание моментов импульсов точно так же может быть обусловлено изменением наблюдаемого периода вращения пульсара. Оба эти параметра непосредственно влияют на расчетную величину вращательной фазы и соответственно на запаздывание наблюдаемого импульса пульсара. Поэтому измене-

ние во времени одной из этих величин можно сопоставить с поведением другой, и по результатам сделать вывод о влиянии той или другой величины на запаздывание наблюдаемых импульсов. С этой целью по разностной модели определялись отклонения наблюдаемых интервалов, вызванные изменением меры дисперсии, которые сопоставлялись с изменением рассчитанного по параметрической модели значения периода вращения пульсара и вызванного им запаздывания по наблюдаемым интервалам импульсов пульсара.

Дополнительное запаздывание импульса излучения на частоте f пропорционально изменению меры дисперсии и обратно пропорционально квадрату частоты [2]:

$$\Delta t = \frac{\Delta DM}{2,41 \cdot 10^{-16} f^2}. \quad (4)$$

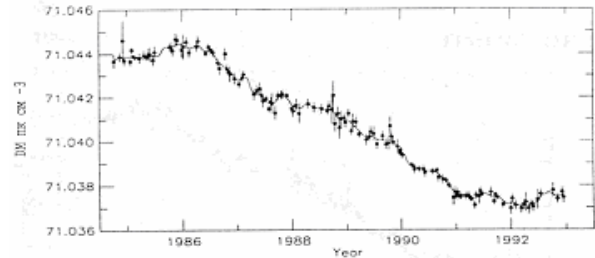
Отклонение интервалов пульсарного времени, рассчитанное по параметрической модели, в соответствии с (2), пропорционально относительному изменению наблюдаемого периода вращения, численно равное отклонению коэффициента линейного приближения в промежутке наблюдения, и величине этого промежутка t :

$$\Delta t = -\frac{\Delta P}{P} t = -\alpha t. \quad (5)$$

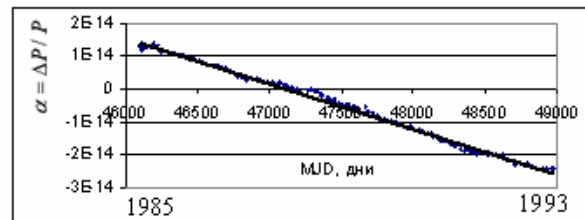
На рис. 2.1 приведены зависимости меры дисперсии, расчетного периода и отклонения интервалов в совпадающем промежутке наблюдений. На рис. 2.1а показана зависимость меры дисперсии В1937+21 во времени из работы [2], рассчитанная по разностной модели данных. На рис. 2.1б приведено изменение величины $\alpha = \Delta P / P$ на 8-летней протяженности наблюдений. На рис. 2.1в показано отклонение интервалов, определяемых по изменениям величины $\alpha = \Delta P / P$, которое рассчитано в соответствии с (5). Результаты, приведенные на рис. 2.1б, в, получены по тем же наблюдательным данным, что и на рис. 2.1, а [2], но с использованием параметрической модели данных [4].

На приведенных графиках видна выраженная корреляция отклонений периода вращения пульсара (рис. 2.1б) и изменений меры дисперсии (2.1а). Сопоставление полученных двумя независимыми методами отклонений интервалов также подтверждает их достаточно близкое совпадение. Величина отклонения интервалов за счет изменения периода вращения составляет около $8,7 \cdot 10^{-6}$ с за 7,4 года, а расчетная величина смещения МПИ на частоте наблюдения около 2,4 ГГц (табл. 2.1) за счет изменения меры дисперсии по приведенному на рис. 2.1а результату – около $6 \cdot 10^{-6}$ с в том же промежутке. Некоторое расхождение вычисленных величин можно объяснить тем, что определяемые двухчастотным методом значение меры дисперсии и ее изменения не исключают погрешностей, обусловленных многими факторами, в том числе значительной частотной зависимостью [6]. Из приведенного в табл. 2.1 фрагмента архива наблюдательных дан-

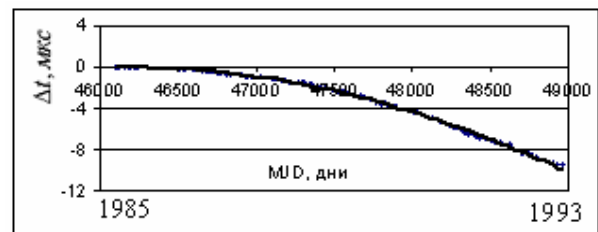
ных, по которым были получены рассматриваемые результаты, следует, что расчетные изменения меры дисперсии даже в небольшом, около месяца, промежутке имеют приблизительно пятикратный статистический разброс, сопоставимый по величине с обнаруженным в [2] систематическим линейным отклонением меры дисперсии на годовом промежутке.



а) зависимость меры дисперсии В1937+21 во времени (по данным работы [2])



б) изменение расчетной величины периода вращения В1937+21 и линейная аппроксимация (сплошная линия)



в) отклонение интервалов, обусловленное изменением расчетной величины периода вращения В1937+21, и его аппроксимация полиномом второй степени (сплошная линия)

Рис. 2.1. Мера дисперсии, расчетный период, отклонение интервалов

Сопоставление результатов, полученных по двум моделям данных, показывает, что выявленное в [2] разностным методом линейное изменение меры дисперсии не согласуется с поведением наблюдаемого периода вращения пульсара. Действительно, нарастающее отклонение вращательной фазы пульсара вследствие линейного изменения меры дисперсии компенсируется смещением на некоторую постоянную величину наблюдаемого периода вращения пульсара. Однако выявленное параметрической моделью линейное изменение наблюдаемого периода вращения пульсара, коррелированное с изменением меры дисперсии, может свидетельство-

вать о том, что закон изменения меры дисперсии не ограничивается только линейной зависимостью, но содержит также составляющие более высоких порядков, в первую очередь квадратичную, которая не принята во внимание и может стать причиной линейного изменения расчетного периода вращения пульсара, не совместимого с параметрической моделью наблюдаемых интервалов.

2.3 Корректировка параметрической модели по наблюдательным данным

Приведенные на рис. 2.1 результаты показывают высокую степень зависимости изменений расчетного периода вращения пульсара и меры дисперсии в пределах протяженности наблюдений. Их отношение, характеризующее отклик расчетного периода на изменение меры дисперсии, составляет около $0,5 \cdot 10^{-11} \text{ пк}^{-1} \cdot \text{см}^3$, что показывает чрезвычайно высокую чувствительность расчетного периода вращения к изменениям меры дисперсии. Отклонение расчетного периода при изменении меры дисперсии в пределах погрешности измерения разностным методом вызывает отклонение расчетного периода, которое на 3-4 и более порядка превышает его предельно различимую параметрической моделью величину.

Свойство параметрической модели данных уверенно выявлять даже небольшие, на несколько порядков меньше погрешностей разностной модели, отклонения наблюдаемых признаков позволяет с высокой точностью учитывать в параметрической модели данных устойчивые систематические отношения взаимосвязанных величин, в том числе и тех, которые не относятся непосредственно к рассматриваемой предметной области. В приведенном примере, когда внесено изменение величины меры дисперсии приводит к отклонениям наблюдаемых интервалов, не согласующимся с параметрами модели (1), можно ввести коррекцию модели, включив в нее выявленную зависимость расчетного периода, коррелированного с изменениями меры дисперсии по времени.

С этой целью, выделив из (1) параметризованный компонент пульсарного времени, введем дополнительно линейную функцию, отражающую зависимость коэффициента α_i от величины интервалов пульсарного времени для компенсации выявленного изменения расчетного периода вращения пульсара. Пульсарное время из (1):

$$PT_i = (1 + \alpha_i)(1 + 0,5 \delta N) P_0^* N. \quad (6)$$

Скорректированное пульсарное время:

$$PT_i = (1 + \alpha_i(1 + \delta)PT_i)(1 + 0,5 \delta N) P_0^* N. \quad (7)$$

Изменение периода:

$$\frac{\Delta P}{P} = 1 + \alpha_i(1 + \delta)PT_i. \quad (8)$$

Вычисленное значение корректирующего коэффициента $\delta = 1,65 \cdot 10^{-22} \text{ с}^{-1}$.

Заметим попутно, что значение PT_i , вычисленное в соответствии с (7), формально от него же и зависит. Это, тем не менее, не вносит некорректность, поскольку величина корректирующей поправки, численно равная $\alpha_i \delta PT_i$, чрезвычайно мала по сравнению с α_i , и для расчета PT_i в (7) вполне можно было использовать наблюдаемые интервалы $\sum_i dTB_i$ (1), для численного результата (7) заметной разницы нет.

На рис. 2.2 показано изменение расчетной величины периода вращения после коррекции коэффициента α_i в параметрической модели данных. В результате корректировки коэффициента линейного приближения расчетная величина периода вращения пульсара B1937+21 не обнаруживает монотонного отклонения в пределах промежутка наблюдений, предположительно вызванного внесенной погрешностью измерения меры дисперсии. Уточнение модели данных позволило исключить влияние этой погрешности на последовательность интервалов пульсарного времени, детерминированных наблюдаемыми параметрами вращения пульсара.

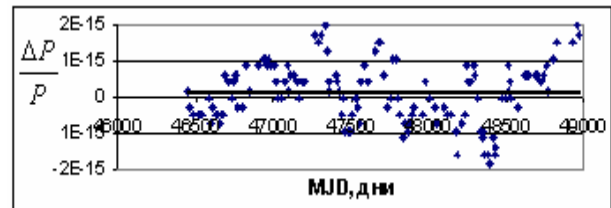


Рис. 2.2. Изменение расчетной величины периода вращения B1937+21 и линейная аппроксимация (сплошная линия) после коррекции модели данных

Для окончательного вывода о причинах изменения расчетного периода следовало бы переопределить барицентрические МПИ для более сложной, чем линейная, модели изменений меры дисперсии и сопоставить полученные по ним значения расчетного периода вращения пульсара.

3 Отождествление в связанных группах данных

Как было показано, вследствие статистической неопределенности наблюдательных данных значительных и вариаций наблюдаемых признаков, результаты отождествления могут допускать неоднозначную интерпретацию. Поэтому, с целью повышения точности и достоверности выявляемых свойств, обычно не ограничиваются наблюдением только одного пульсара, используют данные групповых наблюдений, с возможностью сопоставления и совместной оценки получаемых результатов. Рассмотрим кратко возможности наблюдений группы

(ансамбля) пульсаров применительно к параметрической модели данных.

3.1 Отождествление по ансамблю пульсаров

Обычно применяемая разностная модель данных в наблюдениях нескольких пульсаров в пределах общего промежутка позволяет снизить влияние случайных факторов и получить более стабильные результаты по усредненным с весовыми коэффициентами оценкам остаточных уклонений по группе наблюдаемых пульсаров [7]. Параметрическая модель данных, которая в явном виде определяет независимый временной ряд интервалов для каждого пульсара в группе, позволяет выполнить сопоставление наблюдаемых признаков и свойств временных рядов в ансамбле по абсолютным значениям интервалов.

На нескольких примерах покажем возможности параметрической модели данных для отождествления по группам наблюдательных рядов хронометрирования пульсаров.

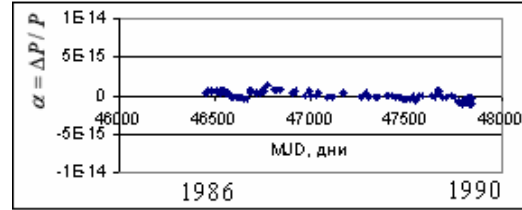
Одно из основных приложений хронометрирования пульсаров – выявить свойства пульсаров как высокостабильных хранителей времени и определить методику сопоставления пульсарного времени с атомными часами с целью их синхронизации по пульсарам. Представление наблюдательных данных в виде последовательности интервалов сближает пульсарное время по форме с атомным измерительным эталоном, который формирует последовательность единичных интервалов времени для хронометрирования пульсаров. Одной из вероятных причин выявленных изменений расчетного периода по наблюдениям пульсара B1937+21 (рис. 2.1б) могло стать изменение масштаба единицы величины (секунды) измерительного атомного эталона, по которому были определены интервалы пульсарного времени. Однако сделать с уверенностью такое заключение по наблюдениям только одного пульсара невозможно, тогда как сопоставлением результатов наблюдений другого пульсара в этом же промежутке и на том же радиотелескопе по одному и тому же измерительному атомному эталону оказывается возможным подтвердить или опровергнуть сделанные предположения.

На рис. 2.3 показаны изменения расчетного периода вращения и отклонения наблюдаемых интервалов пульсара B1855+09 в промежутке 1986–1990 гг. Тогда же и на том же инструменте наблюдался и пульсар B1937+21.

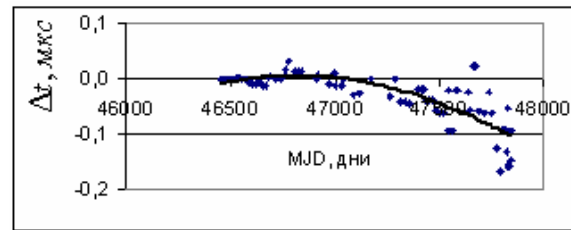
Сопоставление рис. 2.1 и рис. 2.3 показывает, что B1855+09 не обнаруживает изменений расчетного периода, подобных B1937+21. Следовательно, нет оснований считать причиной изменения расчетного периода B1937+21 отклонение единицы измерительного атомного эталона, по которому проводилось хронометрирование обоих пульсаров.

Наблюдения B1855+09 не противоречат сделанному предположению, что причиной выявленного изменения периода пульсара B1937+21 в виде линейного тренда стала погрешность в определении меры дисперсии, которая была учтена путем кор-

рекции модели наблюдательных данных, в результате чего вариации расчетного периода B1937+21 были приведены к стационарному виду (рис. 2.2). Причины изменения расчетного периода B1937+21, которые, очевидно, не связаны с погрешностями измерительного атомного эталона, должны быть выяснены дополнительно, принимая во внимание высказанные предположения относительно характера зависимости меры дисперсии.



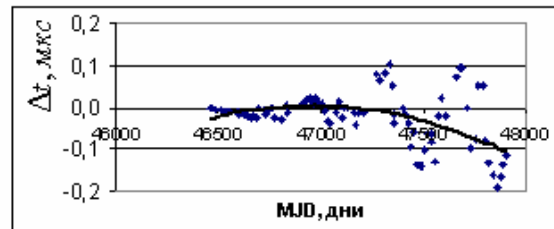
а) изменение расчетной величины периода вращения



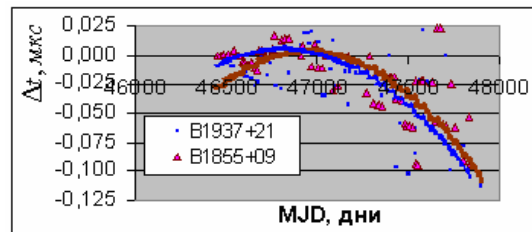
б) отклонение интервалов

Рис. 2.3. Расчетный период, отклонение интервалов пульсара B1855+09

На рис. 2.4 показаны сглаженные аппроксимирующие полиномом второго порядка отклонения интервалов пульсарного времени для B1937+21 и B1855+09 в пределах общего промежутка наблюдений около 4-х лет. Видно, что сглаженные отклонения практически совпадают для обоих пульсаров как по форме изменения во времени, так и по величине.



а) отклонение интервалов пульсара B1937+21



б) отклонение интервалов B1855+09 и B1937+21

Рис. 2.4. Отклонение интервалов пульсаров B1937+21 и B1855+09 в общем промежутке наблюдений

Принимая во внимание, что вариации расчетной величины относительного периода вращения пульсаров В1937+21 (после коррекции параметрической модели данных) и В1855+09 находятся около 10^{-15} (рис. 2.2, 2.3а), что близко к достижимому пределу стабильности лучших атомных стандартов, вполне допустимо, с учетом очень близкого совпадения отклонений интервалов для обоих пульсаров, интерпретировать эти отклонения как результат влияния нестабильности атомного измерительного эталона, используемого для хронометрирования обоих пульсаров. Средняя величина полученных таким образом по параметрической модели отклонений интервалов является расхождением атомных часов относительно пульсарного времени и служит для них численной синхронизирующей поправкой, погрешность которой находится в пределах 5-10 нс в 4-летнем промежутке наблюдений.

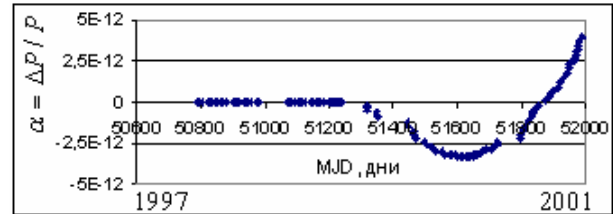
3.2 Отождествление по наблюдениям на разных инструментах

Не всегда рассчитанные по параметрической модели вариации наблюдаемого периода оказываются так близки по величине к своим предельно достижимым значениям, как в рассмотренном примере с пульсарами В1937+21 и В1855+09. Причины могут быть разные: инструментальные погрешности наблюдений, методические погрешности обработки данных, неточные априорные знания численных значений используемых при многопараметрической подгонке величин. Остается открытым вопрос о собственной стабильности вращения пульсаров. Известно, что у некоторых пульсаров период вращения может меняться во времени, и достаточно резко (глитчи). Характер этих изменений не укладывается в общепринятую модель хронометрирования пульсаров, и требуется дополнительное исследование таких особенностей поведения пульсаров. Ясно, что пульсары в промежутках аномальных отклонений периода не могут рассматриваться как полноценные хранители времени, и включение их в ансамбль для отождествления результатов наблюдений внесло бы дополнительные погрешности, снижающие общую эффективность использования группы пульсаров.

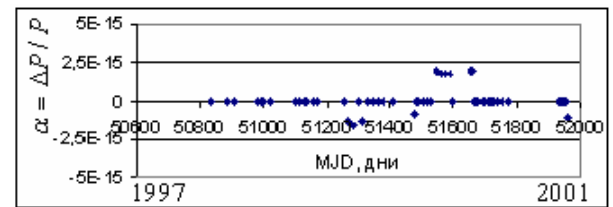
Как было показано на примере пульсара В1937+21, по наблюдениям только одного пульсара невозможно однозначно определить причину аномального отклонения расчетного периода вращения, можно лишь сделать предположение на этот счет. По наблюдениям группы из нескольких пульсаров можно обнаружить совпадающие по характеру и величине отклонения, которые имеют общую причину для группы, например, возможные вариации измерительного атомного эталона, выявляемые по нескольким пульсарам. Обнаруженное аномальное поведение пульсара может быть подтверждено по данным наблюдений этого пульсара на другом инструменте в том же промежутке времени. По результатам сопоставления изменений величины расчетного периода по наблюдениям на обоих (не-

скольких) инструментах делается заключение, подтверждающее или опровергающее предполагаемое аномальное поведение этого пульсара.

На рис. 2.5 в качестве примера показаны изменения расчетного периода вращения пульсара В1937+21 по наблюдениям, проведенным в течение 1997–2001 гг. на радиотелескопах РТ-64 в Калязине и РТ-32 в Кашиме (Япония). Результаты хронометрирования пульсара В1937+21 и их сравнительного анализа приведены в работе [8].



а) по наблюдениям В1937+21 в Кашиме



б) по наблюдениям В1937+21 в Калязине

Рис. 2.5. Изменение расчетной величины периода вращения В1937+21

Сопоставление приведенных на рис. 2.5 графиков показывает, что отклонения расчетной величины периода вращения пульсара В1937+21 по наблюдениям в Кашиме в промежутке МJD 51300–52000 приблизительно на три порядка превышают отклонения периода по наблюдениям в Калязине в том же промежутке. Расчетная величина периода вращения по наблюдениям в Калязине не обнаруживает заметных отклонений в промежутке МJD 51300–52000, наблюдаемые вариации периода хорошо согласуются с характеристиками предельно достижимой стабильности атомного эталона порядка 10^{-15} в общем промежутке наблюдений. Следовательно, нет достаточных оснований считать поведение пульсара В1937+21 аномальным в этом промежутке, а причины значительных отклонений расчетного периода вращения, полученных по наблюдениям в Кашиме, следует уточнить дополнительно.

Таким образом, связанные параметрической моделью группы наблюдательных данных предоставляют широкие возможности отождествления свойств пульсаров как высокостабильных хранителей времени. Из группы пульсаров, наблюдаемых на одном инструменте, отбираются пульсары по критерию стационарности вариаций расчетного периода в диапазоне, не выходящем за пределы погрешностей измерительного атомного эталона, и исключать из группы пульсары с аномальным отклонением.

ем наблюдаемых интервалов, численные значения которых не укладываются в диапазон, определяемый параметрической моделью хронометрирования.

По данным наблюдений одних и тех же пульсаров на разных инструментах выявляются характеристики долговременной стабильности параметров вращения пульсаров, проверяется достоверность аномальных отклонений интервалов и расчетного периода, которые обнаруживаются в наблюдениях.

4 Случайные вариации и достижимые пределы стабильности

На основе сопоставления двух моделей наблюдательных пульсарных данных на рассмотренных примерах приложений, приведем в качестве некоторого итога оценку порядка величин случайных вариаций наблюдаемых интервалов, которые определяют характерные значения погрешностей и соответственно достижимые пределы точности и долговременной стабильности по результатам их отождествления.

Затем кратко остановимся на особенностях реализации сценариев отождествления по наблюдениям связанных групп пульсаров с применением параметрической модели.

4.1 Обобщенная оценка неопределенности отождествления

В табл. 4.1 систематизированы оценки порядка величин погрешностей измеряемых интервалов пульсарного времени, которые определяют достижимые пределы точности отождествляемых величин для различных моделей данных и условий измерения.

Таблица 4.1. Случайные вариации и погрешность интервалов по наблюдениям пульсаров

Случайные вариации величин	Погрешность интервалов (1 год), секунд	Примечание
1. Вариации DM 0,001 пк·см-3/год DM = 71,040 пк·см-3	10 ⁻⁵	Хронометрирование разности фаз B1937+21 Частоты 1,4; 2,4 ГГц
2. СКО МПИ 10 ⁻⁶ с	10 ⁻⁶	Разностная модель МПИ
3. $\alpha = \Delta P / P$ = xx·10 ⁻¹⁵	10 ⁻⁷	Параметрич. модель: синтез периода P
4. $\alpha = \Delta P / P$ = xx·10 ⁻¹⁶	10 ⁻⁸	Пульсар в группе (ансамбле)
5. $\alpha = \Delta P / P$ = xx·10 ⁻¹⁷	10 ⁻⁹	С учетом вариаций атомного эталона
6. Предел точности параметрической модели	< 10 ⁻⁹	Уточнение параметрической модели

В левой колонке указаны вариации величин, которые определяются принятой моделью наблюдательных данных, а в средней колонке приведены обобщенные оценки погрешностей наблюдаемых интервалов. Вариации меры дисперсии, измеренные по разности фаз наблюдаемых МПИ пульсара B1937+21 [9], имеют неопределенность, сопоставимую с обнаруженным в работе [2] систематическим уменьшением меры дисперсии в промежутке 1 год. Среднеквадратичные отклонения разности измеренных и наблюдаемых МПИ, характерные значения которых находятся в диапазоне нескольких микросекунд, ограничивают этим порядком величины предел достижимой стабильности разностной модели данных.

Переход к параметрической модели пульсарных данных, основанной на синтезе наблюдаемого периода в пределах промежутка наблюдений, на несколько порядков увеличивает достижимый предел точности измерения интервалов. Особенно эффективна параметрическая модель применительно к группе пульсаров. В этом случае появляется возможность определить собственные вариации и систематические отклонения измерительного атомного эталона и произвести коррекцию обусловленных ими погрешностей хронометрирования. Определенный резерв снижения погрешности существует за счет дальнейшего уточнения параметрической модели, предполагающего, например, расширение полинома (1) с включением производных периода более высокого порядка на больших промежутках.

Отметим, что параметрическая модель данных реализует принципиально более высокую стабильность уже на относительно коротких промежутках наблюдений, порядка одного года. Что же касается разностной модели, в которой ограничивающим фактором является величина немоделируемых вариаций остаточных уклонений, достигающая нескольких микросекунд в пределах рассмотренных здесь 8-летних наблюдений пульсара B1937+21, то эта модель не позволяет уменьшить предел случайных вариаций до значения ниже чем 10⁻¹⁴ [2]. Существенно, что это значение достигается только в отношении ко всему 8-летнему промежутку, тогда как при его уменьшении этот предел, определяемый по остаточным уклонениям, пропорционально возрастает.

Модифицированный формат наблюдательных данных [5] который дополнен значениями интервалов от начального до каждого наблюдаемого события и численными величинами параметров вращения пульсара в пределах протяженности наблюдений, согласуется с принятой параметрической моделью и отвечает требованиям существенного, в пределах нескольких порядков, снижения влияния случайных вариаций наблюдаемых интервалов на результаты отождествления по данным хронометрирования пульсаров.

4.2 Сценарии отождествления по группам пульсаров

Детерминированное и целостное представление с высокой точностью дискретного континуума наблюдаемых интервалов излучения импульсов пульсара, определяемое параметрической моделью данных, позволяет более эффективно реализовать возможности наблюдений нескольких пульсаров в составе ансамбля. Прежде всего, одновременными наблюдениями группы пульсаров на одном или нескольких инструментах достигается надежное тестирование наблюдательных данных, выявление устойчивых признаков, не подверженных критическому влиянию вариаций интервалов, которые обусловлены случайными факторами. Обнаруживаются имеющиеся аномальные отклонения интервалов, не совместимые с параметрической моделью хронометрирования пульсаров, которые стали бы причиной преобладающего вклада этих пульсаров в результирующие вариации, не дает оснований для включения таких пульсаров в группу.

Благодаря тому, что отождествляемые физические величины описываются параметрами модели, стабильные значения которых устанавливаются по наблюдаемым интервалам, а влияние всех факторов нестабильности проявляется в виде вариаций наблюдаемого периода вращения пульсара, можно определить последовательность действий с дискретными рядами наблюдательных данных как при обработке наблюдательных данных на стадии подготовки и отбора, так и в процессе выполнения задач приложения. Цель отбора данных заключается в выделении из коллекции таких последовательностей, в которых вариации наблюдаемых интервалов имеют стационарный характер и, следовательно, не вносят систематических погрешностей отождествляемых величин в пределах промежутка наблюдений. В противном случае должны быть приняты дополнительные меры по корректировке параметрической модели, если это возможно, как описано в разделе 2.3, либо введены ограничения на промежуток, в пределах которого выполняется требование стационарности вариаций, как необходимое условие для включения пульсара в группу.

По выделенным рядам наблюдаемых интервалов, стационарных в пределах общего для группы промежутка наблюдений, выявляются устойчивые признаки отождествляемых величин, характер которых подтверждается по наблюдениям нескольких входящих в группу (ансамбль) пульсаров. Например, близкое совпадение по форме и величине отклонений наблюдаемых интервалов в диапазоне значений около 10^{-15} и менее может интерпретироваться как отклонение измерительного атомного эталона времени, по которому ведется хронометрирование. Если у пульсара обнаружено заметное отклонение рассчитанного по наблюдательным данным периода вращения, то путем наблюдений этого же пульсара на других инструментах в группе с другими пульсарами и сопоставлением полученных

рядов наблюдательных данных подтверждается или опровергается предположение об аномальном поведении этого пульсара. Следует отметить также, что по характеру и величине непараметризуемого остатка наблюдаемых интервалов (1) может быть сделано заключение о необходимости уточнения параметрической модели данных по критерию минимизации остатка, в котором, наряду со случайными вариациями наблюдаемых интервалов, может содержаться параметризуемая компонента.

Таким образом, сопоставлением независимых рядов хронометрирования по наблюдениям группы пульсаров достигается эффективный отбор пульсаров по критерию стационарности случайных вариаций наблюдаемых интервалов, исключение из группы аномальных пульсаров, которые обнаруживают отклонения интервалов, не совместимые с параметрической моделью, а также дальнейшее уточнение модели данных по выявленным параметризуемым компонентам вариаций наблюдаемых интервалов.

5 Заключение

Сопоставление двух моделей наблюдательных данных хронометрирования пульсаров применительно к отождествлению измеряемых физических величин – параметрической, основанной на синтезе наблюдаемого периода вращения пульсара, и разностной, основанной на остаточных отклонениях моментов пульсарных событий, – показало существенно, на несколько порядков, более высокую точность и достоверность отождествления по параметрической модели. Эти свойства параметрической модели проявляются, в отличие от разностной модели, даже на сравнительно небольших, порядка года, промежутках наблюдений и сохраняются с увеличением продолжительности промежутка.

Параметрическая модель данных, благодаря представлению результатов наблюдений в виде дискретного континуума интервалов излучаемых импульсов, независимо для каждого пульсара, особенно эффективна в наблюдениях группы пульсаров. Достигается надежное тестирование и отбор наблюдательных данных по устойчивым признакам, не подверженным критическому влиянию случайных вариаций наблюдаемых интервалов в пределах всей протяженности наблюдений. Обнаруживаются аномальные отклонения наблюдаемых интервалов, не совместимые с параметрической моделью, при наличии которых пульсары не могут быть включены в группу.

Коллекция астрометрических пульсарных данных отвечает требованиям приложений применительно к задачам отождествления свойств предметной области по наблюдательным данным хронометрирования. Коллекция минимизирует влияние статистических погрешностей хронометрирования, поддерживая тем самым долговременную стабильность наблюдаемых характеристик и высокую точность отождествления, которые определяются свойствами параметрической модели данных, и не могут быть достигнуты с помощью разностной модели.

Литература

- [1] К.Одуан, Б.Гино. Измерение времени. Основы GPS. Пер. с англ. под ред. В.М.Татаренкова. М., ТЕХНОСФЕРА, 2002.
- [2] 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, 713–728.
- [3] A.N.Lommen, D.C.Backer. New Limits on the Gravitational Wave Background and Other Results from the Pulsar Timing Array // *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2001, Vol. 33, p. 1347.
- [4] А.Е.Авраменко. Параметрический синтез пульсарного времени // *Измерительная техника*, 2006, № 6, 39–44.
- [5] А.Е.Авраменко. К согласованному виртуальному и реальному времени в коллекции астрометрических пульсарных данных // *Труды RCDL* 2007. Переславль Залесский, 2007, 103–111.
- [6] J.M.Cordes, A.Wolszczan, R.J.Dewey, et al. Timing and Scintillations of the Millisecond Pulsar 1937+214 // *Astrophys.J.*, 1990, 349, 245–261.
- [7] G.Petit and P.Tavella. Pulsars and Time Scales. // *Astron.Astrophys.*, 1996, 308, 290–298.
- [8] Ю.П.Илясов, М.Имае, Ю.Ханадо, В.В.Орешко, В.А.Потапов, А.Е.Родин, М.Секидо. Результаты двухчастотного хронометрирования пульсара В1937+21 в Калязине и Кашиме в 1997–2000 гг. // *Письма в Астрономический Журнал* 31, № 1, 33, 2005.
- [9] D.C.Backer, S.Hama, S.Van Hook, and R.S.Foster. Temporal Variations of Pulsar Dispersion Measures // *Astrophys J.* 404, 636, 1993.

Deterministic and ambiguous in the identification of the results of astrometrical observations of pulsars

A.E. Avramenko

The comparison of numerical results of identification of the measured physical values based on the two models of the pulsar timing data, is performed. The advantages of parametric model, which accuracy on several orders exceeds the accuracy of accepted residual model, are shown. The features of identification based on groups of pulsar timing sets which were created by the observations of ensemble of pulsars, are considered. The estimations of the achievable accuracy and long time stability for both pulsar data models, are performed. The instances of the domain applications of the astrometrical pulsar data collection, are presented.

* Работа поддерживается грантом РФФИ № 06-07-89043.