

К согласованному виртуальному и реальному времени в коллекции астрометрических пульсарных данных

© А.Е.Авраменко

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН
avr@pra0.ru

Аннотация

Рассматривается задача согласования отношений наблюдаемых величин и их параметрических отображений в коллекции астрометрических пульсарных данных. Определены структура и компоненты коллекции, удовлетворяющие условиям согласования. На основе интеграции наблюдательных данных и их численных моделей долговременные ряды хронометрирования приводятся к формализованному виду, определяемому наблюдательными параметрами вращения пульсара. Установлены инвариантные отношения численной модели и наблюдательных признаков рядов хронометрирования в пределах многолетней протяженности наблюдений. Определены методы сопоставления виртуальных и реальных характеристик рядов во временной области переменных. Приведены примеры приложений коллекции.

1 Введение

Пульсары – нейтронные звёзды с практически неограниченным временем жизни (около 10^9 лет). – привлекли к себе внимание как потенциальные хранители времени, находящиеся вне влияния земных условий, благодаря беспрецедентной стабильности собственного вращения [1]. Особую актуальность это замечательное качество пульсаров приобретает в связи с созданием и развитием глобальных космических навигационных систем ГЛОНАСС – GPS, основанных на метрическом единстве 4-мерного пространства-времени [2].

Моменты наблюдаемых на радиотелескопе импульсов пульсара, обладая высокой степенью периодичности на большой протяженности, неизбежно содержат компоненты случайных вариаций, которые обусловлены не столько собственными характеристиками пульсара, сколько

факторами внешних воздействий, таких как движение небесных тел, неоднородность среды, гравитационные поля, погрешности инструментальных средств наблюдения, ошибки методик обработки и подгонки наблюдательных данных по множеству переменных, значения которых априори известны лишь приблизительно. В существующих коллекциях пульсарных данных хронометрирования наряду с моментами событий на дату наблюдений заносят их разности относительно расчетных величин, детерминированных предполагаемыми параметрами вращения пульсара – остаточные отклонения, которые несут на себе следы случайных вариаций и характеризуются статистической неопределенностью, оцениваемой среднеквадратичным отклонением (СКО).

Традиционное представление коллекций наблюдательных данных в виде многолетних временных рядов, отображающих вычисленные на дату наблюдения остаточные отклонения моментов импульсов от расчетных значений и статистические оценки отклонений, сложилось применительно к задачам изучения свойств пульсаров, среды, движения небесных тел, проявления наблюдаемых физических эффектов. Высокая чувствительность приходящего излучения пульсаров даже к небольшим изменениям условий окружающей среды позволяет выявлять особенности структуры и динамики пульсаров, галактической среды, связывать их с результатами астрометрических наблюдений пульсаров.

Однако такая структура и содержание традиционных коллекций астрометрических пульсарных данных хронометрирования не являются оптимальными для задач, рассматривающих пульсары в качестве хранителей времени. Остаточные отклонения моментов наблюдаемых пульсарных событий – принимаемых на радиотелескопе импульсов – отражают изменения физических характеристик наблюдаемых объектов, но эти изменения с точки зрения целевой характеристики пульсарного времени – его стабильности, воспроизводимости наблюдаемых моментов и измеряемых интервалов с высокой точностью, – являются мешающим фактором. Как случайные вариации, так и систематические отклонения наблюдаемых величин, доминирующая часть которых не связана с внутренними свойствами пульсаров, принципиально ограничивают

достижимую точность и стабильность собственно пульсарного времени, выявляемого по результатам наблюдений.

Было показано [3], что последовательность интервалов пульсарного времени может быть определена по наблюдаемым величинам параметров вращения пульсара. В этом случае пульсарное время, детерминированное наблюдаемыми параметрами, обладают устойчивостью к многочисленным факторам нестабильности, как связанных с переменностью физических свойств объектов и среды, так и вносимых в процессе наблюдений и обработки данных.

Параметризация пульсарного времени открывает новые возможности коллекции наблюдательных данных хронометрирования, в том числе:

- Выявление наблюдательной стабильности пульсаров и пульсарного времени на любой протяженности;
- Сопоставление пульсарного времени с реальным временем атомных хранителей;
- Исследование свойств, поведения наблюдаемых объектов, среды по выявленным вариациям наблюдаемых интервалов.

Для реализации этих возможностей традиционная коллекция должна быть модифицирована путем включения в нее новых компонентов, отображающих параметрическое представление пульсарного времени, численные отношения его с наблюдаемыми интервалами, а также преобразованные к соответствующему виду исходные наблюдательные данные.

Коллекция, модифицированная в соответствии с онтологическими особенностями рассматриваемой предметной области, требует и соответствующих форм ее представления в качестве информационного ресурса, включающего как исходные наблюдательные данные, так и результаты их трансформации в новое параметрическое пространство. Должны быть отображены функциональные и численные зависимости наблюдательных признаков и параметров выходных последовательностей, моделирующих пульсарное время. Требуется определить происхождение моделируемых рядов и правила, по которым устанавливаются параметры модели и получаются численные последовательности. Необходимо показать, каким образом по наблюдательным признакам определяются параметры модели, а по ним выявляются физические характеристики объектов, отношения моделируемых и реальных величин. Требуется определить интегральную структуру коллекции, которая обеспечивает целостное отображение входящих компонентов, включая исходные наблюдательные данные, результаты трансформации, моделирования, сопоставления, взаимодействие данных и сервисов в процессе выполнения общих и проблемных функций приложений предметной области.

Решение комплекса перечисленных вопросов рассматривается в настоящей работе. Основные среди них следующие:

- Виртуальное пульсарное время в коллекции,
- Интеграция наблюдательных и моделируемых данных;
- Структурирование данных, сервисов для доступа и обмена;
- Моделирование свойств, сопоставляемых с реальными характеристиками.

2 Виртуальное пульсарное время как базовый ресурс коллекции

Пульсарное время не может быть реализовано по аналогии с атомным временем. Прежде всего, невозможно получить моменты наблюдаемых пульсарных событий в реальном масштабе времени, потому что результаты хронометрирования вычисляются постнаблюдательной компьютерной обработкой и принадлежат прошлому. Кроме того, наблюдать удастся далеко не все, а лишь очень небольшую часть пульсарных событий. Ряды хронометрирования содержат в среднем одно зарегистрированное событие за сутки или более ввиду необходимости длительного накопления и анализа сильно зашумленного сигнала для достижения требуемой точности измерения. Эпизодические, выборочно наблюдаемые события не дают целостного представления дискретного континуума пульсарного времени. Пульсар к тому же постепенно замедляет вращение вследствие потери энергии, период вращения непостоянен и, соответственно, интервалы между наблюдаемыми пульсарными событиями постепенно увеличиваются.

Ввиду невозможности получить дискретный континуум пульсарного времени непосредственно по выборочным данным хронометрирования, возникает задача воссоздания целостного образа пульсарного времени в пределах рассматриваемой протяженности наблюдений. Принятое отображение результатов хронометрирования в виде остаточных отклонений для каждого из наблюдаемых событий в отдельности отодвигает на второй план временные отношения, существующие в пределах всей последовательности наблюдаемых пульсарных событий. Стабильная последовательность расчетных моментов, по которым вычисляются остаточные отклонения, определяется по предполагаемым значениям параметров вращения пульсара, которые установлены из прошлых наблюдений и не связаны напрямую с результатами текущих наблюдений и поэтому не могут дать реальный образ пульсарного времени.

Показано, что для отображения пульсарного времени по наблюдательным данным хронометрирования должны быть известны точные значения параметров, от которых зависят расчетные и наблюдаемые интервалы [5]. Эти теоретические условия однако не могут быть выполнены на

практике, так как невозможно предсказать абсолютно точные значения расчетных параметров, так же, как невозможно получить абсолютно стабильные наблюдаемые величины. Поэтому остаточные отклонения с их статистической неопределенностью, зависимостью от многих параметров, которые определены с конечной точностью, не могут стать надежной основой пульсарного времени, принимающего на себя все методические, инструментальные погрешности наблюдений и обработки [6].

Поскольку получить континуум пульсарного времени непосредственно по выборочным наблюдательным данным невозможно, то для его реализации было принято параметрическое представление интервалов как условие отображения последовательности интервалов пульсарного времени [3]. С необходимым уточнением, что значения параметров, определяющих интервалы, связываются исключительно с исходными наблюдательными данными хронометрирования, без привлечения опосредованных расчетных величин – остаточных отклонений и их статистических оценок. Не останавливаясь здесь на деталях, будем определять параметрический вид пульсарного времени как виртуальный его образ, максимально приближенный к наблюдаемой последовательности интервалов и не зависящий от случайных вариаций наблюдаемых интервалов.

На Рис.2.1 показана схема отношений наблюдаемых интервалов, виртуального пульсарного времени и реального времени, отсчитываемого измерительным инструментом.

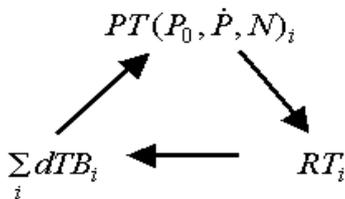


Рис.2.1. Схема отношений наблюдаемого, виртуального и реального времени.

Значения $\sum_i dTB_i$ представляют собой

наблюдаемые в барицентре Солнечной системы интервалы от начального до i -го пульсарного события.

Барицентрическое пульсарное время i -го наблюдаемого события, соответствующего N -му событию от начала, в виртуальном представлении через численные величины наблюдаемых параметров вращения пульсара выражается:

$$PT(P_0, \dot{P}, N)_i = (P_0 N + 0,5 P_0 \dot{P} N^2)_i \quad (1)$$

где P_0, \dot{P} - период вращения пульсара и его производная.

Пульсарное время выделяется из наблюдаемых интервалов путем декомпозиции их на две

последовательности: одна из них определяет собственно пульсарное время по установленным из наблюдений численным значениям параметров вращения пульсара, а другая содержит вариации наблюдаемых интервалов, вносимые хронометрированием, средой, другими внешними факторами [3]:

$$\sum_i dTB_i = PT(P_0, \dot{P}, N)_i + R_i \quad (2)$$

Реальное время RT определяется по атомному эталону AT , сопоставленному с пульсарным временем PT :

$$RT = AT + \Delta PT$$

где ΔPT - отклонение атомного эталона, установленное по пульсарному времени.

Это отклонение проявляется в изменении измеренной величины периода вращения пульсара и численно определяется разностью пульсарного времени, полученного по двум значениям этой величины:

$$\Delta PT_i = PT(P_0, \dot{P}, N)_i - PT(P_0^*, \dot{P}, N)_i \quad (3)$$

где P_0^* - значение периода, измеренное по текущему времени атомного эталона.

Величина ΔPT отклонения атомного эталона в пределах некоторого промежутка определяется разностью пульсарного времени, измеренного по двум значениям периода, соответствующим границам этого промежутка:

$$\Delta PT = (P_0 - P_0^*) N_j \quad (4)$$

N_j - общее число пульсарных событий в пределах выделенного промежутка.

Детерминированное наблюдаемыми параметрами вращения, пульсарное время представляет собой целостный образ дискретного континуума в пределах всей протяженности наблюдений. Он выполняет две основные функции:

- Хранит стабильное пульсарное время – последовательность временных интервалов, не зависящих от случайных вариаций наблюдаемых интервалов;
- Выявляет отклонения реального времени измерительного атомного эталона, возвращая поправку атомного времени относительно стабильного пульсарного времени.

Таким образом, последовательность интервалов пульсарного времени является ключевым звеном коллекции астрометрических пульсарных данных. С помощью данных предыдущих и текущих астрометрических наблюдений пульсаров, интегрированных в единую последовательность, достигается постоянство установленного масштаба единицы измерения времени в пределах протяженности наблюдений, а сопоставлением измеренного времени с пульсарным уточняется реальное время физического эталона.

3 Организация данных в коллекции

3.1 Модифицированная модель данных

Коллекция формируется на основе модели пульсарных данных с учетом особенностей структуры и типов данных, предлагаемых International Virtual Observatory Alliance (IVOA) – Data Model for Quantity. Применительно к области астрономии развивается модель данных (*Quantity Model*), оперирующая численными величинами. Представление о рассматриваемом явлении (*phenomenon*) отображается в виде пары имя-величина (*name-value*). Величины могут ассоциироваться как с физическими понятиями, так и с физическими единицами [4].

Были определены классы временных рядов, как наблюдаемых, так и рассчитываемых по численным моделям, определены отношения, на основании которых достигается трансформация наблюдаемого ряда в новый класс **Модель интервалов**. Атрибутами этого класса являются величины этих интервалов, заданные параметрами вращения пульсара. Совместное представление наблюдаемых и моделируемых данных в коллекции позволило получить обобщенные оценки численных величин параметров и их отношений, которые определяют свойства стабильности наблюдаемых рядов и отдают случайные вариации, обусловленные методическими и инструментальными ошибками наблюдений и обработки [7].

Для приложений, ориентированных на исследование свойств, поведения наблюдаемых объектов, включая сопоставление реальных и моделируемых характеристик, входящие в структуру коллекции данные и поддерживающие сервисы должны отвечать требованиям, которые определяются перечисленными задачами предметной области и особенностями согласования виртуальных и реальных характеристик пульсарного времени.

Потребовался такой набор данных, который, наряду с исходными наблюдательными данными и их статистическими оценками, включает также полученный по исходным данным упорядоченный ряд интервалов пульсарного времени, значения соответствующих ему параметров вращения и их вариаций, ограничивающих стабильность пульсарного времени.

В качестве структурной основы модифицированной коллекции принят формат обмена данными хронометрирования, предложенный в Принстонском университете для архива пульсарных данных обсерватории Аресибо [8]. В таблице 3.1 приведен фрагмент архива для пульсара B1937+21. Он включает модифицированную юлианскую дату наблюдения MJD (целая часть – сутки и дробная часть суток в относительном исчислении). Приведены величины остаточных отклонений (*resid*), их СКО (*err*) и, кроме того, другие (здесь не указаны)

характеристики, относящиеся к радиотелескопу, системе приема и регистрации радиосигналов пульсара, собственные параметры пульсара.

Таблица 3.1. Фрагмент архива пульсарных данных в формате обмена Аресибо

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
...

Принстонский формат недостаточен для преобразования наблюдательных данных к параметрическому виду расчетной модели, так как он не содержит в явном виде временных отношений наблюдаемых событий в пределах протяженности наблюдений. Остаточные отклонения сопоставимы по величине с их ошибками, что свидетельствует о вариационном характере величин, роль которых ограничивается преимущественно статистическими оценками моментов наблюдаемых событий. Сами же моменты описываются в виде изолированных значений на дату наблюдений, что не дает представления о временных отношениях наблюдаемых событий в пределах протяженности.

В Таблице 3.2 приведены преобразованные наблюдательные данные, которые отвечают требованиям параметрического представления интервалов пульсарного времени. Исходными являются моменты пульсарных событий, наблюдаемых на указанную модифицированную юлианскую дату MJD. Дробная часть даты пересчитывается из относительной безразмерной величины в измеряемое время, выраженное в его единицах. По этим данным формируется последовательность наблюдаемых интервалов, определяемых двумя соседними наблюдаемыми событиями, а по ним – суммарные интервалы каждого наблюдаемого события относительно некоторого события, выбранного в качестве начального. Исходные наблюдательные данные, кроме содержащихся в них моментов наблюдаемых событий в пределах суток на дату наблюдения, дополняются значениями интервалов между соседними наблюдаемыми событиями, а также величинами суммарных интервалов от начального события до события, которое ограничивает рассматриваемый промежуток протяженности.

Полученная последовательность выборочных наблюдаемых интервалов трансформируется в новый временной ряд класса **Модель интервалов** пульсарных событий, экземплярами которого являются последовательности интервалов в пределах текущего промежутка протяженности, а атрибутами – величины этих интервалов, детерминированные параметрами вращения пульсара, и вариации наблюдаемых интервалов.

Таблица 3.2. Преобразованные наблюдательные данные

PSR	Дата MJD, сутки	Дата MJD, дробная часть	Время суток MJD, с	Наблюдаемые интервалы $TB_i - TB_{i-1}$, с	Суммарные интервалы от начала $\sum_i dTB_i$, с
1937+21	46053	0,7825072939094	67608,63019377	1117923,81441095	0,00000000
1937+21	46087	0,6785624680786	58627,79724199	2928619,16704822	2928619,16704822
1937+21	46100	0,6315361041997	54564,71940285	1119136,92216086	4047756,08920908
1937+21	46106	0,6234494979960	53866,03662685	517701,31722400	4565457,40643308
1937+21	46107	0,5971319445599	51592,20000998	84126,16338312	4649583,56981620
1937+21	46109	0,6082686179335	52554,40858945	173762,20857948	4823345,77839568
1937+21	46110	0,6063468946379	52388,37169671	86233,96310726	4909579,74150294
1937+21	46111	0,5983172855777	51694,61347391	85706,24177720	4995285,98328014
...
1937+21	48825	0,1599016300854	13815,50083938	2151220,00115824	239447006,87064579
1937+21	48898	0,9611747881276	83045,49910222	6376429,9826285	245823436,86890864
1937+21	48926	0,8811979167732	76135,50000920	2412290,00090698	248235726,86981562
1937+21	48956	0,796359987720	68805,50138830	2584670,00137910	250820396,87119472
1937+21	48973	0,7539988659509	65145,50124056	1465139,99885226	252285536,87104699

В Таблице 3.3 приведены результаты трансформации наблюдаемых интервалов. Последовательность интервалов пульсарного времени получается линейным приближением суммарных входящих в нее наблюдаемых интервалов к некоторой детерминированной последовательности, отображающей наблюдаемые интервалы в параметрической форме по критерию наименьших квадратов.

Таблица 3.3. Пульсарное время и наблюдаемые вариации

PSR	Дата MJD, сутки	Период P_0	Производная \dot{P}	Пульсарное время PT , с	Вариации TB_i , мкс
1937+21	46100	0,00155780645567901	1,05098E-19	4047756,08921044	1,356
1937+21	46106	0,00155780645567907	1,05098E-19	4565457,40643454	1,456
1937+21	46107	0,00155780645567910	1,05098E-19	4649583,56981773	1,523
1937+21	46109	0,00155780645567914	1,05098E-19	4823345,77839728	1,601
1937+21	46110	0,00155780645567917	1,05098E-19	4909579,74150462	1,682
1937+21	46111	0,00155780645567919	1,05098E-19	4995285,98328185	1,708
...
1937+21	48825	0,00155780645568265	1,05098E-19	239447006,87064192	-3,874
1937+21	48898	0,00155780645568267	1,05098E-19	245823436,86889926	-9,387
1937+21	48926	0,00155780645568269	1,05098E-19	248235726,86981103	-4,589
1937+21	48956	0,00155780645568270	1,05098E-19	250820396,87119350	-1,221
1937+21	48973	0,00155780645568272	1,05098E-19	252285536,87104839	1,401

Полученная последовательность выборочных наблюдаемых интервалов трансформируется в новый временной ряд класса **Модель интервалов** пульсарных событий, экземплярами которого являются последовательности интервалов на текущей протяженности наблюдений, а атрибутами – величины этих интервалов, детерминированные параметрами вращения пульсаров, и вариации наблюдаемых интервалов.

Соотношение наблюдаемых интервалов и их приближений выражается:

$$(1 + \alpha_i)(1 + 0,5\dot{P}N)P_0^*N = \sum_i dTB_i - R_i \quad (5)$$

где R_i - вариации наблюдаемых интервалов,

P_0^* - начальный период по существующим оценкам на текущую эпоху,

$(1 + \alpha_i)$ – линейный коэффициент трансформации.

Выбором величины \dot{P} достигается минимизация отклонений аппроксимирующей прямой в пределах протяженности наблюдений. По величине $(1 + \alpha_i)$, соответствующей полученному значению \dot{P} , уточняется значение периода, согласованное с величиной \dot{P} в пределах этой протяженности:

$$P_0 = (1 + \alpha_i)P_0^* \quad (6)$$

В результате соотношение (5) приводится к виду:

$$(P_0N + 0,5P_0\dot{P}N^2)_i = \sum_i dTB_i - R_i \quad (7)$$

Соотношение (7) в явном виде определяет численные значения всех его составляющих – наблюдаемых интервалов, параметрического представления пульсарного времени и их разности, которые тождественно связаны между собой для любых установленных значений переменных. Из него следует, что по наблюдаемым интервалам и установленным по ним значениям P_0, \dot{P} получено пульсарное время PT_N для всех пульсарных событий в пределах протяженности наблюдений:

$$PT_N = P_0N + 0,5P_0\dot{P}N^2 \quad (8)$$

Коллекция, наряду с исходными наблюдательными данными, включает установленные по ним численные величины параметров вращения пульсаров, по которым определяются интервалы пульсарных событий. В явном виде выделены случайные вариации наблюдаемых интервалов. Как следует из Таблицы 3.3, каждое новое наблюдаемое событие определяет значение интервалов пульсарного времени и уточняет параметры вращения пульсара, которые получены по наблюдениям в шкале времени радиотелескопа.

Таким образом, трансформированная и расширенная коллекция пульсарных данных наряду с исходными наблюдательными данными включает все необходимые компоненты для получения целостного представления пульсарного времени в пределах рассматриваемой протяженности наблюдений и отвечает требованиям моделирования, выявления по результатам наблюдений устойчивых характеристик пульсаров как хранителей времени.

3.2 Данные, форматы, доступ из приложений

В этом разделе кратко рассмотрены вопросы формирования, обмена и использования ресурсов коллекции на семантическом уровне представления применительно к приложениям рассматриваемой предметной области. В качестве основы приняты

разрабатываемые концепции IVOA, изложенные в работе [9].

Табличная структура данных наиболее приемлема для рассматриваемой коллекции. Временные последовательности, как исходных наблюдательных данных, так и результатов их трансформации, обработки, моделирования, представляют собой однотипные по структуре ряды, численные элементы которых соответствуют одним и тем же значениям наблюдательных дат. Эти даты, общие для всех последовательностей, служат основным, связывающим аргументом, по которому отсчитываются сопоставляемые данные и производные величины в пределах выбранной протяженности.

Таблицы, в соответствии с Data Model for Quantity, строятся с использованием числовых форматов (действительные десятичные числа с целой и дробной частью, разрядность которых определяется требуемой точностью) для данных, представляющих измеряемую или вычисленную величину. Для обозначения имени и других сведений, включая метаданные предметной области, в соответствии с Unified Content Descriptors (UCD), используются текстовые форматы.

В разделе 3.1 приведены примеры структуры таблиц, которые можно сопоставить с требованиями стандарта VOTable Format Definition [10]. Таблицы содержат наборы метаданных, относящиеся к содержащимся в таблице данным, включая имена, описания, комментарии, связи с другими данными и сервисами. Данные в таблицах представляют собой преимущественно временные ряды – последовательности численных величин и относящихся к ним дат наблюдения, а также наблюдаемых или расчетных величин. Продолжительность ряда определяется диапазоном ячеек, содержащих численные величины, измеренные или моделируемые.

В таблицах используются численные величины десятичного формата, как целые (юлианские даты), так и смешанные, до 12 десятичных знаков целой части и до 18 – дробной части.

Принятая структура данных, как и VOTable, обладает гибкими возможностями хранения и обмена табличными данными. Но, в отличие от VOTable, она реализована не на XML, а на HTML платформе, поскольку все необходимые функции преобразования, вычисления и web-представления величин в числовом и графическом виде в полной мере обеспечиваются средствами HTML и не требуют дополнительного расширения. Компактный набор используемых типов данных, несложные формы представления результатов и достаточно консервативные сценарии, которые, впрочем, могут быть при необходимости легко модифицированы, вполне укладываются в обычные возможности используемых средств.

Особенностью применяемых таблиц является их реализация в объектно-ориентированной среде программирования промежуточного слоя, в котором

совмещаются как средства разработки программной функциональности приложения, так и непосредственное выполнение прикладных программ. Благодаря тому, что в объектно-ориентированной среде данные и сервисы структурно взаимосвязаны, в приложении естественным образом достигается требуемое по смыслу сочетание данных и проблемно-ориентированных программных сервисов с возможностью их гибкого реструктурирования в соответствии с задачей приложения.

4 Коллекция и реальное пульсарное время

Рассмотрим теперь более подробно приложение коллекции к решению задач предметной области, относящихся к сопоставлению пульсарного и реального времени. На нескольких примерах будет показано, каким образом с помощью обработки и анализа данных коллекции достигается извлечение свойств объекта, сопоставляемых с характеристиками реальных процессов, которые получаются путем непосредственных измерений.

4.1 Обработка и анализ данных

Содержащиеся в коллекции временные ряды наблюдательных данных, трансформированные и моделируемые последовательности используются в сценариях выявления свойств предметной области, характер которых определяется приложениями. Сценарии определяют последовательность действий под управлением программ приложения, в результате которых проявляются интересующие свойства объекта. Последовательность действий реализуется с помощью программных сервисов.

Объектно-ориентированная компонентная среда приложения выступает в качестве промежуточного слоя, интегрирующего данные и сервисы в процессе подготовки и выполнения сценария. При подготовке с помощью соответствующих сервисов общего назначения необходимые для приложения данные отбираются, форматируются и структурируются по ячейкам таблицы в соответствии с выбранным диапазоном значений. В процессе выполнения сценария структуры временных рядов последовательно трансформируются из начального состояния, определяемого набором исходных данных, в новую структуру, содержащую результаты обработки исходных данных и моделирования по сценарию приложения.

Общее пространство данных, доступное для используемых сервисов в любом выбранном диапазоне, позволяет выполнять требуемые действия над заданными фрагментами последовательностей и воспринимать их последствия.

Далее рассмотрены примеры реализации нескольких сценариев анализа и выявления свойств временных рядов пульсарного времени и сопоставления с текущим измеряемым временем.

Показаны особенности рассматриваемых задач в понятиях предметной области и физический смысл получаемых результатов. Исходные данные взяты из коллекции, а программы управления, вычисления и сопоставления выполнены в виде специализированных сервисов приложения.

4.2 Хранение и воспроизведение масштаба единицы времени

Последовательность наблюдаемых интервалов, благодаря высокой стабильности вращения пульсара, фиксирует и хранит неограниченное время установленную единицу шкалы измерительного эталона, с помощью которого было проведено хронометрирование. Если в процессе дальнейших наблюдений масштаб единицы не выдерживается строго постоянным, то наблюдаемые интервалы будут отображены уже несколько другими величинами, что скажется в свою очередь и на измеренной величине периода вращения пульсара. По выявленным изменениям интервалов и периода измерительная шкала может быть скорректирована, а масштаб единицы приведен в соответствие с исходной величиной.

Отображение наблюдаемых интервалов в параметрическом виде позволяет по пульсарному времени выявить текущие изменения масштаба времени измерительного атомного эталона в составе наблюдательных средств радиотелескопа. Изменения масштаба проявляется на измеренной величине интервала пульсарного времени и соответственно на усредненной величине наблюдаемого в этом интервале периода. Наблюдаемым значениям интервалов и среднего периода может быть сопоставлен текущий масштаб измерительного эталона, и по выявленным изменениям можно скорректировать его с целью приведения к номинальному значению.

Проиллюстрируем на примерах это свойство коллекции численным моделированием масштаба единицы времени. Установкой выбранного масштабного коэффициента $(1 + \delta)$, представляющего собой относительную величину изменения исходного масштаба единицы времени, будем модифицировать наблюдаемые интервалы умножением на этот коэффициент:

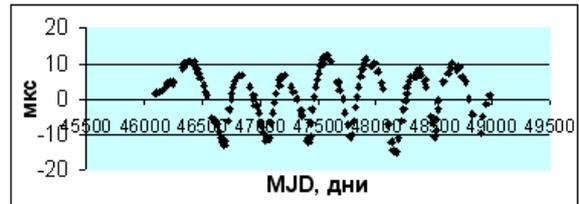
$$\sum_i dTB_{\text{mod}i} = (1 + \delta) \sum_i dTB_i.$$

Затем будем определять численные величины разности между модифицированными и исходными наблюдаемыми интервалами в пределах протяженности наблюдений:

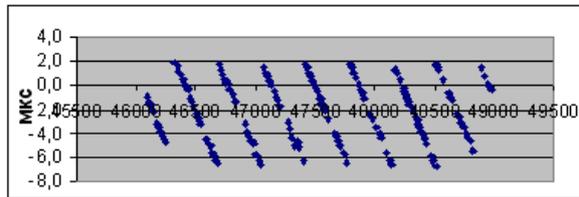
$$\Delta TB_i = \sum_i dTB_{\text{mod}i} - \sum_i dTB_i$$

Результаты моделирования по данным наблюдений пульсара B1937+21 приведены на Рис.4.1. На Рис.4.1б показана разность модифицированных и немодифицированных исходных наблюдаемых интервалов для $\delta = 10^{-10}$.

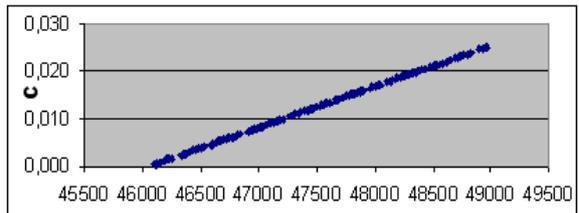
На Рис.4.1в приведена разность интервалов пульсарного времени, полученных линейным приближением по тем же исходным наблюдаемым интервалам для $\delta = 10^{-10}$. Видно, что разность интервалов пульсарного времени представляет собой линейную монотонную зависимость от времени, а та же разность, полученная по исходным наблюдаемым интервалам, имеет вид знакопеременной последовательности, характер которой определяется вариациями исходных наблюдаемых интервалов (показаны на Рис.4.1а).



а) вариации исходных наблюдаемых интервалов



б) разность наблюдаемых интервалов ($\delta = 10^{-10}$)



в) разность интервалов пульсарного времени ($\delta = 10^{-10}$).

Рис.4.1. Влияние масштаба единицы величины для PSR B1937+21

Угол наклона разностной линии пульсарного времени пропорционален установленному масштабному коэффициенту. Как следует из Рис.4.1в, для значения $\delta = 10^{-10}$, например, величина разности за 8 лет составляет 0,025 с для пульсара B1937+21 с периодом вращения около 0,00156 с.

Заметим попутно, что с помощью масштабного коэффициента по разности исходных наблюдаемых интервалов (Рис.4.1б) очень просто обнаруживается присутствие вариаций интервалов, не относящихся к интервалам пульсарного времени. И наоборот, монотонный характер линейной зависимости разности интервалов пульсарного времени подтверждает, что синтезированные по параметрам интервалы нечувствительны к этим вариациям.

Таким образом, параметрическая последовательность интервалов пульсарного времени хранит масштаб установленной единицы времени измерительного эталона, и все его изменения в процессе хронометрирования выявляются по разности интервалов пульсарного времени в пределах всей протяженности.

4.3 Синхронизация по пульсарному времени

Используя свойство пульсарного времени поддерживать постоянство и выявлять отклонения масштаба времени, можно определить отклонение времени измерительного атомного эталона сопоставлением исходных наблюдаемых интервалов и интервалов пульсарного времени и получить таким образом реальное время измерительного эталона, согласованное с пульсарным временем:

$$RT = AT + \Delta PT$$

Несколько изменим условия моделирования масштаба единицы времени. Будем распространять действие устанавливаемых масштабных коэффициентов не на всю протяженность наблюдений, а только на выбранный промежуток. Задача моделирования состоит в том, чтобы перенести исходный масштаб установленной в начальных интервалах единицы в выбранный промежуток, сопоставить его с реально наблюдаемым масштабом единицы в этом промежутке, и по ним определить разницу пульсарного времени и соответствующую поправку атомного эталона, приводящего его в соответствие с пульсарным временем.

Отклонение измерительного эталона в пределах выделенного интервала определяется в соответствии с (4) по разнице значений периода для сопоставляемых промежутков, одно из которых определяется по предыдущим наблюдениям и соответствует исходному масштабу единицы, а другое получается по усредненному отклонению периода в пределах выбранного промежутка. Расчетное значение периода находится по исходному периоду P_0 , который соответствует установленной единице времени, с учетом его изменения в пределах этого промежутка из-за производной периода:

$$P = P_0 + \dot{P} \sum_j dTB_j \quad (9)$$

Значение периода в наблюдаемом интервале определяется по его модифицированному значению и числу укладываемых в нем событий:

$$P^* = (1 + \delta) dPT_j / N_j$$

В Таблице 4.1 приведены значения разности пульсарного времени и периода для выделенного интервала, который определен двумя последними строками Таблицы 3.3. Интервал ограничен событиями, которые наблюдались на юлианские даты 48956 ($PT=250820396,87119350$ с) и 48973

($PT=252285536,87104839$ с). Его длительность по пульсарному времени равна 1465139,99985489 с (около 17 суток).

Таблица 4.1. Отклонение пульсарного времени и периода

δ	$\Delta PT, \text{с}$	$P, \text{с}$	$\Delta P, \text{с}$
0	0,00000000	0,001557806482 19747	0,0000000000000000
10 ⁻¹⁰	0,000 14651	0,001557806482 35325	0,000000000000 15578
10 ⁻⁹	0,00 146514	0,001557806483 75528	0,000000000000 155781
10 ⁻⁸	0,0 1465140	0,00155780649 77554	0,000000000000 1557806
10 ⁻⁷	0, 14651400	0,001557806 63797812	0,0000000000 15578065
10 ⁻⁶	1,46513998	0,001557806 04000396	0,000000000 155780648

Отметим, что численные величины отклонения периода и пульсарного времени находятся непосредственно по разности коэффициентов линейного приближения в двух указанных промежутках:

$$\Delta P = P_0 (\alpha_i - \alpha_j)$$

$$\Delta PT = P_0 (\alpha_i - \alpha_j) N_j$$

Как следует из Таблицы 4.1, полученные моделированием масштаба единицы времени отклонения пульсарного времени для выбранных масштабных коэффициентов точно соответствуют отклонениям периода в текущем наблюдаемом интервале. Это означает, что по сохраняемой предыдущими наблюдениями единице времени и наблюдаемым текущим параметрам вращения пульсара находятся отклонения масштаба единицы величины и абсолютные поправки реального времени измерительного атомного эталона на эпоху наблюдения относительно пульсарного времени.

5 Перспективы коллекции в приложениях

Высокая стабильность параметрических рядов пульсарного времени, чувствительность к вариациям масштаба единицы величины измерительного эталона времени, позволяющие определять даже небольшие отклонения реального времени физических хранителей, открывают новые возможности контроля характеристик стабильности и коррекции хода атомных часов.

Формирование и ведение шкал Всемирного времени (UT1), Всемирного координированного времени (UTC) осуществляется на основе Международного атомного времени (TAI), которое представляет собой усредненное время по показаниям большой группы, примерно 220 атомных часов из почти 50 лабораторий времени по всему миру [2,11], для обеспечения приемлемой точности и стабильности. Включение пульсарного времени в состав группового атомного хранителя для формирования шкалы атомного времени позволяет, используя его в качестве опорного эталона, произвести сличение и определить

поправки, которые приводят показания всех атомных хранителей в соответствие с высокостабильной шкалой пульсарного времени.

Следующий шаг – использование группового фактора пульсарного времени, полученного независимо по нескольким пульсарам. Включение ансамбля пульсарных хранителей в качестве опорного эталона с независимым синтезом времени по каждому из них позволяет уменьшить вариации шкалы на ансамбле пульсарных хранителей, по аналогии с групповой шкалой атомного эталона. И, что более существенно, при этом исключается влияния случайных вариаций наблюдаемых интервалов по каждому пульсару ансамбля. Сопоставлением отклонений интервалов пульсарного времени по группе пульсаров могут быть выявлены предпочтительные пульсары как хранители времени по характеристикам стабильности отдельных пульсаров.

Коллекция, располагающая временными рядами по группе наблюдаемых пульсаров, позволяет получить характеристики собственной долговременной стабильности пульсаров, численные величины вариаций пульсарного времени, характеристики межзвездной среды, которые проявляются через наблюдаемые отклонения пульсарного времени.

Заключение

Трансформация временных рядов пульсарных данных к параметрическому виду определила новую структуру и содержание коллекции астрометрических пульсарных данных. Исходные наблюдательные данные, представленные в виде отдельных фрагментов временного ряда и их статистических оценок, расширены взаимосвязанными численными компонентами, формирующими целостное представление пульсарного времени в пределах протяженности наблюдений.

Коллекция поддерживает единство численной модели пульсарного времени, наблюдательных признаков объекта и характеристик измерительных средств, создает возможность сопоставления моделируемых и наблюдаемых величин, выявления свойств и условий долговременной стабильности характеристик, разделения целевых и мешающих факторов применительно к приложению.

Предложенные методы интеграции и сопоставления виртуальных и реальных характеристик во временной области переменных отвечают требованиям приложений коллекции как к задачам формирования и ведения высокостабильных хранителей времени, так и для исследований физических особенностей и поведения пульсаров и окружающей среды, свойства которых проявляются через наблюдаемые вариации пульсарного времени.

Литература

- [1] Ф.Г.Смит. Пульсары. Пер. с англ., под ред. проф. А.Д.Кузьмина. Москва, «Мир», 1979. 267 с.
- [2] К.Одуан, Б.Гино. Измерение времени. Основы GPS. Пер. с англ. под ред. В.М.Татаренкова. М., ТЕХНОСФЕРА, 2002.
- [3] А.Е.Авраменко. Параметрический синтез пульсарного времени. //Измерительная техника, 2006, № 6, 39-44.
- [4] Data Model for Quantity, Version 0.2. IVOA DM WG Internal Draft 2004-03-01. <http://www.ivoa.net/internal/IVOA/IvoaDataModel/qty.v0.2.pdf>
- [5] G.Petit and P.Tavella. Pulsars and Time Scales. //Astron.Astrophys., 1996, **308**, 290-298.
- [6] B.Guinot and G.Petit. Atomic Time and the Rotation of Pulsars. //Astron.Astrophys., 1991, **248**, 292-296.
- [7] А.Е.Авраменко. Разделяемые онтологии в виртуальной среде астрометрических наблюдений пульсаров. //Труды RCDL 2006. Суздаль, 2006, стр.330-336.
- [8] 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.
- [9] Briukhov D.O., Kalinichenko L.A., Zakharov V.N. Diversity of domain descriptions in natural science: virtual observatory as a case study. //Труды RCDL 2005. Ярославль, 2005, стр.23-30.
- [10] VOTable Format Definition. Version 1.1. IVOA Recommendation 2004-08-11.
- [11] W.Lewandowski, J.Azoubib. GPS+GLONASS: toward subnanosecond time transfer. //GPS World, Nov.1998, 30-39. (Русский перевод: Измерительная техника, 2004, №12, 34-40.

Работа поддерживается грантом РФФИ № 06-07-89043

Toward a Consensual Virtual and Real Time Clock in the Collection of Pulsar Timing Data Sets

A.E.Avramenko

A problem of accordance of the observed values and their formal images, is considered. A structure and components of collection, which are appropriated to that accordance, are determined. By integration of observed and modeled data, the pulsar timing sets are transformed to parametric type, which is defined by observed parameters of rotation of pulsar. The methods of collation of virtual and real features of sets in time area of variables, are defined. The instances of problem application of collection, is considered.