

СОБЫТИЙНАЯ НЕПРЕРЫВНОСТЬ КОЛЛЕКЦИИ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПУЛЬСАРНЫХ ДАННЫХ

А.Е.Авраменко О.В.Дорошенко, Ю.П.Илясов, В.А.Потапов
avr@prao.psn.ru olegd@psun32.prao.psn.ru ilyasov@prao.psn.ru potap@prao.psn.ru

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН

О.Б.Длужневская

olgad@inasan.rssi.ru

Институт астрономии РАН

Абстракт. Рассматривается коллекция астрометрических данных, основанная на прецизионном хронометрировании пульсаров. Описываются особенности отображения синхронизации регистрируемых событий пульсаров в процессе формирования долговременных рядов наблюдательных данных и извлечения частотно-временных характеристик пульсаров методами моделирования их свойств и поведения. Анализируются требования и условия интеграции компонентов проблемно-ориентированных приложений в объектно-ориентированной среде.

1. Введение

Электронные коллекции проблемно-ориентированных информационных ресурсов являются признанным направлением активно развиваемых электронных библиотек для научных исследований [1]. Аккумуляция уже имеющихся и все более возрастающих объемов астрономических данных осуществляется в виде цифровых электронных каталогов (computer ready catalogues), которые содержат набор значимых параметров наблюдаемых объектов, используемых для изучения их свойств и поведения. Разработанный ПРАО ФИАН совместно с Центром астрономических данных Института астрономии РАН (ЦАД ИНАСАН) пополняемый каталог пульсарных наблюдательных данных в унифицированном формате Европейской пульсарной сети (EPN-формат) включает упорядоченный набор признаков, которые доступны с помощью SQL-запросов на локальном и удаленном Web-серверах [2]. Связывание пульсарных наблюдательных данных и необходимых для их трансформации и обработки сервисов осуществляется в интероперабельной объектно-ориентированной среде, что позволяет интегрировать требуемые компоненты коллекции либо непосредственно в проблемно-ориентированном приложении, либо посредством пользовательского интерфейса [3]. Приложение представляет собой информационно-операционную среду, в которой реализуется отображение результатов моделирования предметной области.

В рассматриваемой коллекции астрометрических пульсарных данных осуществляется регистрация моментов прихода импульсов (МПИ) электромагнитного излучения пульсаров, которые обусловлены его собственным вращением. Каждый МПИ представляет собой элементарное событие, которое регистрируется методом прецизионного хронометрирования пульсаров и относится к определенному моменту времени в определенной точке пространства.

Накапливаемые в результате наблюдений МПИ в виде временных рядов строго сохраняют все временные соотношения последовательностей событий пульсара и несут в себе фундаментальные сведения о физической природе пульсаров – нейтронных звезд и окружающей их среды, отражая особенности их свойств и поведения, которые выявляются методами математического моделирования по данным полученных временных рядов. Достоверность, точность приближения результатов

моделирования определяются полнотой (протяженностью) полученных рядов на совокупности наблюдаемых объектов.

Накапливаемые и пополняемые данные хронометрирования пульсаров составляют основу уникальной астрометрической коллекции, которая содержит долговременные последовательности регистрируемых событий и должна обеспечивать выполнение следующих условий и требований применительно к особенностям ее использования в проблемно-ориентированных приложениях:

- Синхронизация последовательностей регистрируемых событий в процессе наблюдений;
- Отображение синхронизации событий в форматах хранения, обработки и обмена пульсарных данных;
- Отображение атрибутов времени в базах пульсарных данных;
- Моделирование частотно-временных свойств событийных последовательностей.

2. Синхронизация последовательностей регистрируемых событий

Последовательность и взаимосвязь пульсарных событий в пространстве и времени с высокой точностью описываются математической моделью, детально рассмотренной С.М.Копейкиным и О.В.Дорошенко [4]. Момент прихода N-го импульса в барицентр Солнечной системы (неподвижная точка, ее центр масс) определяется параметрами вращения пульсара, которые задают последовательность временных интервалов электромагнитного излучения:

$$t_N = t_0 + NP_0 + \dot{P}P_0N + 1/2\ddot{P}P_0^2N, \quad (1)$$

где t_N – МПИ в барицентре Солнечной системы,

t_0 – начальный момент

P, \dot{P}, \ddot{P} – период вращения пульсара и его производные

Точность определения МПИ пульсаров требуется очень высокая (300 нс для пульсара В1937+21, например). Поэтому используется прецизионная методика обработки на основе фазового анализа МПИ, который учитывает множество факторов: орбитальное и вращательное движение Земли, небесные координаты и собственное движение пульсара, величину гравитационного потенциала солнечной системы в точке наблюдения и вдоль траектории распространения импульса, параметры межпланетной и межзвездной плазмы.

Переход от измеренных в наблюдениях на Земле последовательности топоцентрических МПИ t_n к барицентрическим МПИ t_N осуществляется в соответствии с соотношением:

$$t_N = t_n + (\bar{r} \cdot \bar{n})/c + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t(f), \quad (2)$$

где \bar{r} – радиус-вектор наблюдатель-барицентр,

\bar{n} – единичный вектор направления на пульсар из геоцентра,

Δt_1 – релятивистская поправка на вариации хода земных часов в переменном гравитационном поле Солнечной системы при движении Земли по орбите,

Δt_2 – суммарная поправка на релятивистские эффекты распространения сигналов на трассе пульсар – Земля;

$\Delta t(f)$ – дисперсионная частотно-зависимая поправка на запаздывание сигнала в межзвездной среде.

Вычислительный алгоритм трансформации t_n в t_N основан на использовании численной теории движения планет – эфемерид Земли и планет DE200/LE200, эфемерид релятивистских шкал времени, а также данные из каталога пульсаров, включая меру дисперсии для определения величины Δt_3 .

Поскольку МПИ определяется относительно некоторой фиксированной точки пространства, не зависящей от положения наблюдателя, то первоначально вычисленные МПИ в точке наблюдения последовательно трансформируются к геоцентру, а затем к барицентру Солнечной системы (неподвижная точка – ее центр масс). Аналогичным образом, должна быть произведена и трансформация координатных шкал времени – от шкалы местного времени на радиотелескопе, к шкале барицентра. Для прецизионного фазового анализа МПИ пульсаров используется три шкалы времени: барицентрическое (ТВ), земное (ГТ) и международное атомное (ТАИ). Непосредственное определение МПИ производится в шкале реального времени (RT), задаваемой местным стандартом частоты на радиотелескопе, который синхронизован со шкалой ТАИ с помощью телевизионного или спутникового канала связи. Переход от шкалы RT к более точной ТАИ осуществляется через промежуточную шкалу Всемирного координированного времени UTC, которую в России представляет шкала Госэталона времени и частоты UTC(SU):

$$RT \Rightarrow UTC \Rightarrow TAI \Rightarrow TB \quad (3)$$

Переход к ТВ и соответственно определение барицентрических МПИ на основе локальных МПИ осуществляется с помощью уравнений распространения электромагнитных сигналов в гравитационном поле Солнечной системы.

Использование прецизионного фазового метода, с помощью которого точно определяется положение импульса излучения пульсара внутри периода вращения, позволяет предвычислять МПИ вперед на большие (более года) интервалы времени и регистрировать по существу все события, связанные с приходом каждого импульса. Так, в наблюдениях пульсара B1937+21 более чем за 11 лет не пропущено ни одного импульса из общего числа 10^{11} (период $P = 1,56$ мс).

3. Отображение синхронизации событий в форматах и базах пульсарных данных

Поскольку реальное время как переменная входит в уравнения регистрируемых событий пульсара, оно определяет всю последовательность (циклограмму) сбора и накопления данных в процессе наблюдений. С другой стороны, накопленные в виде временных рядов исходные данные должны сохранять существующие в зарегистрированных событиях временные соотношения, которые можно было бы при необходимости извлечь и использовать для выявления частотно-временных свойств методами моделирования этих рядов. В этой связи в коллекции пульсарных данных хронометрирования время выступает в двух качествах: реальное время как текущий физический параметр процесса регистрации пульсарных событий в наблюдениях и виртуальное (присваиваемое данным) время, которое отождествляется с наблюдательными данными, трансформируемыми в соответствующие системы отсчета и шкалы, и используется при моделировании свойств временных рядов пульсарных событий. Реальное время связывает физические события пульсара и высокостабильной внешней шкалы времени, обеспечивая однозначное соответствие этих событий на сколь угодно длительном интервале времени.

Реальное время, непосредственно определяющее достоверность и точность получаемых в приложениях результатов, отображается в виде следующих временных рядов, используемых в процессе накопления и редуцирования первичных наблюдательных данных и оптимизации параметров математических моделей:

- Последовательность предвычисленных моментов регистрации импульсов электромагнитного излучения для каждого периода пульсара в абсолютной шкале времени (в секундах с точностью до 13-го десятичного знака) с учетом длительности периода и его производных на эпоху наблюдения;
- Последовательность стартовых моментов синхронного накопления для заданного числа периодов сигналов электромагнитного излучения в относительной (в пределах суток) шкале с точностью до 12-го десятичного знака, однозначно связанной с абсолютной шкалой.

Ниже приведен формат стартовых моментов, рассчитанных для заданного числа периодов:

*Date: Tuesday - 18/4/2000 = 2451652.5 * UTC(SU)=TOA- 0(s)*

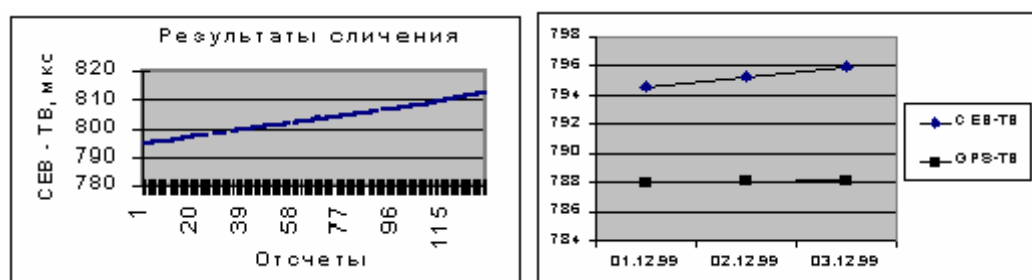
**PSR 1937+ts* D(t) = 0.100 min.= 3856 puls.*

Sampl.= 10mks. Nbin= 150. Nchan= 160

```
-----
nF  TOA (s)          (H M S)  P-obs.(s)  Shift.(mks) - Az  Hg
MEM:176
1. 14919.001122000001= 4: 8:44 0.0015560000000000  0.00
2. 14929.001534000001= 4: 8:54 0.0015560000000000  0.00
3. 14939.000390000001= 4: 9: 4 0.0015560000000000  0.00
```

- Последовательность разностных данных регулярных сличений местной шкалы времени радиотелескопа с шкалой Госэталона России с точностью в пределах 10 нс.

На Рис.1 приведены данные сличений местной шкалы времени, поддерживаемой Атомным стандартом Службы единого времени (СЕВ) радиотелескопа и шкалы Госэталона по сигналам ТВ (Рис.1а), а также данные сличений в сопоставлении с характеристиками стандартами России (ТВ) и глобальной системы GPS (Рис.1б).



а) разностные данные сличения шкал

б) данные сличения местной и эталонных шкал

Рис.1. Временные ряды сличений местной шкалы времени с шкалой Госэталона

Результатам, получаемым в процессе редуцирования, обработки данных хронометрирования пульсаров, ставятся в соответствие определенные значения времени, которые определяются на основании зарегистрированных событий пульсаров и используются как для идентификации данных, так и для моделирования предметной области. Такими значениями времени являются:

- Календарная дата: день-месяц-год (формат dd.mm.yy), присваиваемая файлам первичных наблюдательных данных и результатам обработки в EPN-формате. Используется в качестве идентификатора файлов в базе пульсарных данных, а ее атрибуты (dd, mm, yy) – в качестве полей выборки данных из БД.

- Модифицированная юлианская дата MJD (целые дни и их доли вплоть до 13-го десятичного знака), принятая в качестве временной шкалы. Обеспечивает требуемую точность на любом интервале. Используется для идентификации файлов в EPN-формате и в качестве формата отображения барицентрических МПИ.
- Топоцентрические МПИ, выраженные в секундах и их долях до 12-го десятичного знака относительно некоторого начального момента в пределах суток. Являются исходными данными для вычислений барицентрических МПИ.
- Барицентрические МПИ, вычисляемые методом глобальной подгонки с оптимизацией по критерию наименьших квадратов отклонений известных по каталогу параметров пульсаров и результатов наблюдений.
- Остаточные отклонения как разность барицентрических МПИ, полученных в результате предрасчета и из наблюдений. Используются в качестве обобщенной характеристики долговременных рядов хронометрирования и для моделирования их свойств и поведения.

Таким образом, в процессе наблюдений в шкале реального времени формируются данные на основе регистрируемых событий пульсаров, а в процессе трансформации наблюдательных данных осуществляется привязка последовательностей этих событий в виде рядов к пространственно-временным системам, в которых методами моделирования выявляются свойства и поведение пульсаров в межзвездной среде.

4. Отображение частотно-временных свойств пульсаров в моделях

Долговременные последовательности МПИ пульсаров с высокостабильным периодом используются для формирования и исследования предложенной отечественными специалистами (Илясов Ю.П. и др.) новой астрономической Пульсарной шкалы времени [5], точность хода которой сравнивается с Атомным стандартом, в шкале которого регистрируются МПИ. Сопоставление рядов предрасчитанных и измеренных МПИ позволяет произвести оценки систематических погрешностей и стабильности Пульсарной шкалы времени, выявить требуемую продолжительность регистрации для достижения заданной точности Пульсарной шкалы. На Рис.2 приведена зависимость относительной нестабильности МПИ от длительности зарегистрированных временных рядов.

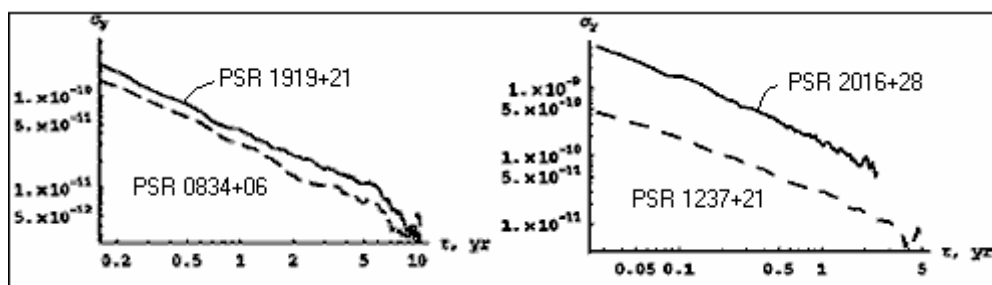


Рис.2. Зависимость относительной нестабильности МПИ от длительности временных рядов

Как следует из рисунка, относительная нестабильность МПИ для приведенных здесь четырех пульсаров прямо зависит от длительности временных рядов МПИ, и для достижения стабильности Пульсарной шкалы, сопоставимой или превосходящей Атомный стандарт, требуемая длительность зарегистрированных рядов МПИ лежит в пределах от нескольких лет до нескольких десятков лет.

Моделирование спектра мощности шумов остаточных уклонений МПИ методом дискретного Фурье-преобразования на длительных интервалах используется для выявления шумов различного происхождения в их фазе и частоте [6]. На Рис.3 приведены зависимости спектра мощности шумов для двух пульсаров на 20-летнем интервале хронометрирования..

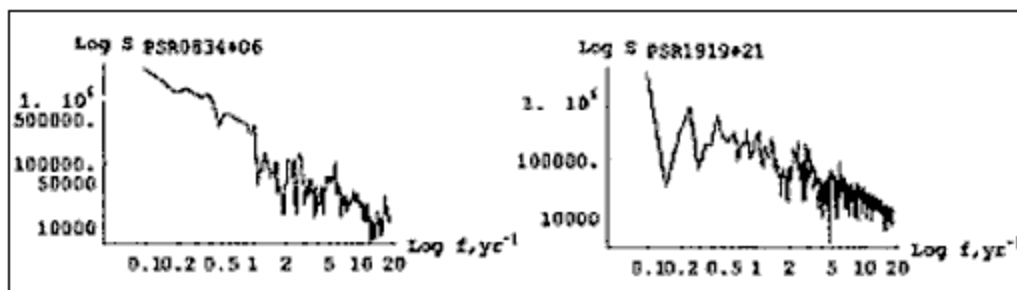


Рис.3. Отображение спектров мощности (Log S) шумов остаточных уклонений МПИ пульсаров

Различные составляющие спектра мощности шумов несут в себе информацию об их физических источниках. В частности, составляющая шума со спектром f^{-5} обусловлена реликтовым гравитационно-волновым фоном. Выявление этой составляющей, как показывают оценки, возможно только при реалистичном значении плотности гравитационного фона и при достижении величины относительной нестабильности МПИ порядка $\sigma_y = 10^{-13}$, что потребует, наряду с использованием прецизионной техники хронометрирования, существенно большей продолжительности регистрации временных рядов МПИ, вплоть до нескольких десятилетий.

Таким образом, моделирование долговременных рядов хронометрирования пульсаров позволяет отобразить частотно-временные свойства фундаментальных явлений, обусловленных физическими характеристиками пульсаров. При этом, во-первых, в процессе моделирования используются все содержащиеся во временных рядах МПИ зарегистрированные события пульсаров и, во-вторых, достоверность и надежность результатов моделирования прямо зависят от продолжительности рядов МПИ, которая может достигать нескольких десятков лет.

5. Интеграция компонентов коллекции

Проблемно-ориентированные приложения оперируют определенным набором данных, который соответствует особенностям выявляемых свойств исследуемых объектов, и программными сервисами, которые реализуют разнообразные специализированные функции, связанные с трансформацией данных и выявлением присущих им частотно-временных свойств. Задача интеграции данных и сервисов в коллекции решается с учетом перечисленных ниже особенностей их использования в приложениях:

- Данные и сервисы могут поддерживаться как в приложении, так и вне его;
- Связывание данных и сервисов осуществляется на стороне клиента из приложения с помощью пользовательского интерфейса;
- Реализация и отображение результатов моделирования частотно-временных свойств предметной области осуществляется в приложении.

Интеграция компонентов – данных и сервисов – достигается за счет комплекса системных средств, включая:

- Унифицированные форматы хранения и обмена данных, принятые на всех стадиях редуцирования и обработки;
- Управление из приложений интерфейсными функциями вызова данных и сервисов в глобальном пространстве имен объектов;
- Интероперабельное использование на месте специализированных сервисов обработки данных, моделирования.

Использование этих средств в рамках объектно-ориентированной архитектуры коллекции позволяет поддерживать в приложении требуемый набор компонентов, реализовать программные сервисы доступа и обработки данных. В объектно-ориентированной среде, благодаря развитым возможностям событийного программирования с визуальной интерпретацией результатов, осуществляется доступ к компонентам коллекции, которые поддерживаются на удаленных серверах, извлечение структурированных фрагментов баз данных, каталогов, связывание их в приложениях в процессе трансформации и обработки. Согласованные форматы хранения и обмена, принятые в базах пульсарных данных и программах их обработки, обеспечивает совместимость компонентов коллекции в процессе их создания, модификации и использования в приложениях..

Заключение

Показана взаимосвязь событий, регистрируемых в процессе наблюдений пульсаров, с атрибутами коллекции пульсарных данных. Рассмотрены особенности отображения регистрируемых событий в форматах хранения, обработки и обмена пульсарных данных, особенности выявления частотно-временных свойств пульсаров методами моделирования долговременных рядов наблюдательных данных. С учетом особенностей проблемно-ориентированных приложений проанализированы требования и условия интеграции компонентов – данных и сервисов – в объектно-ориентированной среде.

Работа поддерживается грантом РФФИ № 00-07-90033.

Список литературы

1. М.Р. Когаловский. Научные коллекции информационных ресурсов в электронных библиотеках.//Труды Первой Всероссийской научной конференции “Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции”. – Digital Libraries’99, С-Петербург, октябрь 1999. – С-ПбГУ, с.16-31.
2. А.Е.Авраменко, А.Н.Беликов, М.Л.Белоус, О.Б.Длужневская, Ю.П.Илясов, Е.Ю.Кильпио, Д.А.Ковалева, О.Ю.Малков, А.Э.Пискунов, Л.А.Сат. Интегрирование информационных астрономических ресурсов. Там же, с.250-253.
3. А.Е.Авраменко, О.Б.Длужневская, О.В.Дорошенко, В.А.Потапов, А.Е.Родин. Объектная модель коллекции астрометрических пульсарных данных. // Труды Второй Всероссийской научной конференции “Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции”. – Протвино, сентябрь 2000, с.193-197.

4. О.В.Дорошенко, С.М.Копейкин. Алгоритм высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров. //Астрономический журнал, 1990, т.67, с.986-997.
5. Ильин В.Г., Илясов Ю.П., Кузьмин А.Д. и др. Шкала Пульсарного времени. //ДАН СССР. 1984, т.275, № 4, с.835-838.
6. Yu.P.Ilyasov, V.A.Potapov and A.E.Rodin, Pulsar timing noise spectra of pulsars 0834+06, 1237+25, 1919+21, 216+28 from 1978 - 1999 yrs. observations. Report on IAU Colloquium 177, 30 Aug. - 3 Sept. 1999, Bonn, Germany.

EVENT-CONTINUOUS PULSAR ASTROMETRY DATA COLLECTION

A.E.Avramenko, O.V.Doroshenko, Yu.P.Ilyasov, V.A.Potapov, O.B.Dluzhnevskaya

The collection of astrometric timing pulsar data is under consideration. We describe the specific features of the registered event's synchronization procedures, of the long sequences' observed data storing, and the time-and-frequency features evaluation methods which are based on the simulation of pulsar's behaviour. We also present analysis of the required conditions for the problem-oriented components integration in frame of the object-oriented environment.