

Лабораторная работа.

Хронометрирование миллисекундных пульсаров.

В.А. Потапов *(1),

(1) Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,

Пущинская радиоастрономическая обсерватория, Пущино, Московская обл., Россия

Аннотация

Целью данного практикума является ознакомление с методом хронометрирования (тайминга) пульсаров. Хронометрирование пульсаров является (наряду с РСДБ) одним из самых высокоточных современных радиоастрономических методов, позволяющих решать ряд астрофизических и астрометрических задач путем анализа временных рядов барицентрических Моментов Прихода Импульсов (МПИ) от одиночных (изолированных) и двойных пульсаров. В ходе работы студенты должны получить навыки в обработке данных на всех этапах хронометрирования: получение топоцентрических и барицентрических МПИ пульсаров по первичных наблюдательным данным, расчет параметров пульсаров, последующий анализ рядов остаточных уклонений (ОУ) МПИ пульсаров.

Задачи:

1. По первичным данным наблюдений миллисекундных пульсаров на многоканальном приемнике получить профили пульсаров и рассчитать МПИ в локальной шкале времени.
2. Определить топоцентрические МПИ в опорной шкале времени.
3. Проанализировать длительные ряды топоцентрических МПИ миллисекундных пульсаров, рассчитать барицентрические МПИ, определить астрометрические (координаты и собственные движения), вращательные (барицентрический период и его производные) и орбитальные кеплеровские и пост-кеплеровские (релятивистские) параметры пульсаров, а также остаточные уклонения барицентрических МПИ пульсаров с использованием различных планетных эфемерид и опорных шкал времени.

Необходимые ресурсы: Программа определения топоцентрических МПИ пульсаров по результатам многоканальных наблюдений пульсаров **kkfs3**; программа прецизионного фазового анализа рядов МПИ пульсаров **TEMP01** или **TEMP02** [1] (при использовании ОС Linux или X Window клиента на иной ОС), или (альтернативно) программа прецизионного фазового анализа **TIMAPR** [4] или **TIMAPRv4** (при работе под ОС WindowsXX); компьютер; доступ к Интернету.

Контрольные вопросы:

1. Что такое топоцентрические МПИ пульсаров и чем они отличаются от барицентрических МПИ?
2. Чем вызвана необходимость использования в пульсарных наблюдениях многоканальных приемников?
3. Какими причинами может быть обусловлен тот факт, что наряду с "белым" шумом в многолетних рядах остаточных уклонений МПИ могут присутствовать разного рода долговременные тренды? Объясните возможные причины возникновения "пульсарных шумов" (шумов в ОУ МПИ.)

*E-mail: potap@prao.ru

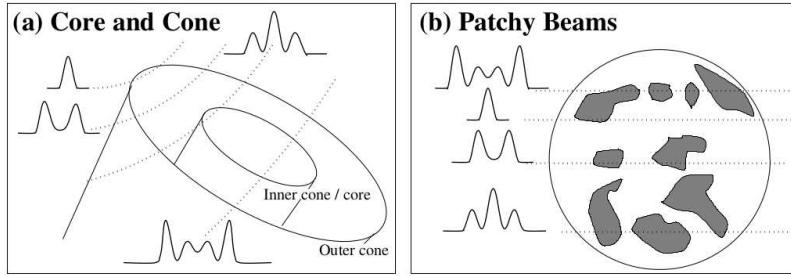


Рис. 1: Демонстрация наблюдаемых форм импульсов пульсаров как "срезов" области формирования излучения лучом зрения, рисунок из [2].

4. Как проявится в ОУ МПИ неточное знание координат и собственных движений пульсара, возможно ли устранить возникшие ходы МПИ с помощью вариаций иных пульсарных параметров.
5. Почему для моделирования барицентрических МПИ двойных пульсаров не используются полиномы высоких степеней по времени (выше второй).
6. * Почему хронометрирование двойных пульсаров позволяет в некоторых случаях (при высоком качестве наблюдений) определить массы пульсара и его компаньона в двойной системе, в то время как обычные наблюдения кривых лучевых скоростей двойных звезд - только функцию масс?

1 Общее описание работы.

Предлагаемая практическая работа дает возможность ознакомиться с методом хронометрирования пульсаров, который используется в радиоастрономии, а также (в меньшей степени), в рентгеновских, гамма- и оптических наблюдениях пульсаров.

Пульсары - быстровращающиеся нейтронные звезды, излучение которых регистрируется в широком диапазоне частот. Излучение пульсара становится видимым в тот момент, когда область, в которой оно формируется (вблизи магнитных полюсов), пересекает луч зрения наблюдателя. Таким образом, излучение пульсаров регистрируется земным наблюдателем (например, в виде графика зависимости напряжения на выходах приемной системы радиотелескопа от времени) как последовательность импульсов довольно сложной формы, обусловленной главным образом распределением магнитных силовых линий в области излучения (См. Рис. 1).

Отметим, что, в первом приближении, наблюдаемый период пульсара (время между излучением последовательных импульсов) - величина стабильная.

В то время как отдельные импульсы пульсаров обладают уникальной формой, суммарный (интегральный) импульс пульсаров (профиль), полученный суммированием синхронно с периодом большого количества (до нескольких миллионов для пульсаров с миллисекундным периодом) сохраняет постоянную форму (Рис. 2). Именно это обстоятельство имеет огромное значение для возможности точного определения Моментов Прихода Импульсов (МПИ) пульсаров, которое является основой метода хронометрирования.

Хронометрирование пульсаров позволяет с высокой точностью определять их основные параметры: наблюдаемый период собственного вращения и его производные, в случае двойных пульсаров - кеплеровские орбитальные и релятивистские параметры двойной системы и массу входящих в двойную систему пульсара и компаньона. Так как импульсы пульсара, распространяясь в межзвездной, межпланетной плазме и ионосфере, испытывают задержки, анализ последовательности МПИ предоставляет нам информацию о вариациях характеристик среды. Хронометрирование

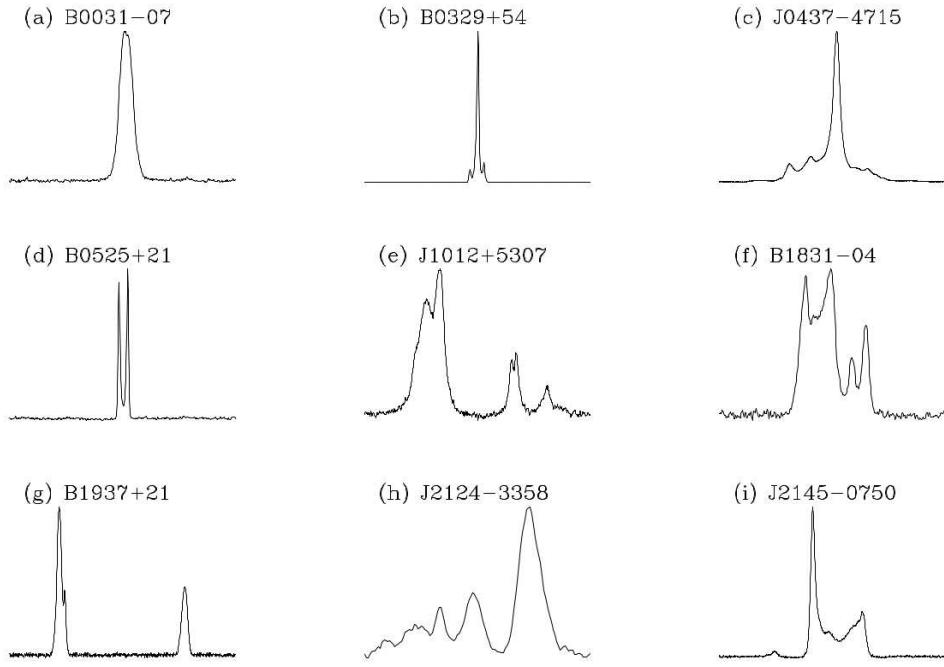


Рис. 2: Примеры интегральных импульсов (профилей) ряда пульсаров [3]

пульсаров позволяет определить их координаты и собственные движения с точностями, сравнимыми с точностями РСДБ-методов, и, в некоторых случаях, найти их годичный параллакс.

К настоящему времени зарегистрировано более 2000 пульсаров, наиболее полный on-line каталог которых доступен в Интернете [5, 6] (Рис.3).

Перечислим ряд ярких результатов, полученных в результате хронометрирования пульсаров. К таковым относятся прямое экспериментальное подтверждение гравитационно-волнового излучения от двойной системы [7], обнаружение планетной системы у пульсара [8], открытие двойной системы, оба компаньона которой являются пульсарами [9].

Анализ результатов наблюдений пульсаров методом хронометрирования распадается на следующие основные этапы

1. Определение суммарного (интегрального) за сеанс профиля пульсара
2. Определение МПИ пульсара в точку наблюдения в локальной шкале времени (токоцентрические МПИ)
3. Редукция МПИ в барицентр Солнечной системы и в барицентрическое время (TDB) (барицентрические МПИ).
4. Расчет на основе принятой модели пульсара (параметров пульсара) ОУ барицентрических МПИ (разницы между теоретически рассчитанными и наблюденными МПИ).
5. Уточнение параметров пульсара минимизацией СКО ОУ МПИ, повторное вычисление ОУ МПИ.
6. Окончательный анализ ОУ МПИ пульсаров.

Дадим краткое пояснение к содержанию работы.

Так как пульсары являются довольно слабыми радиоисточниками (потоки типично распределены от 0.1 мЯн до 5 Ян [5]), наблюдения их производятся обычно на крупных радиотелескопах,

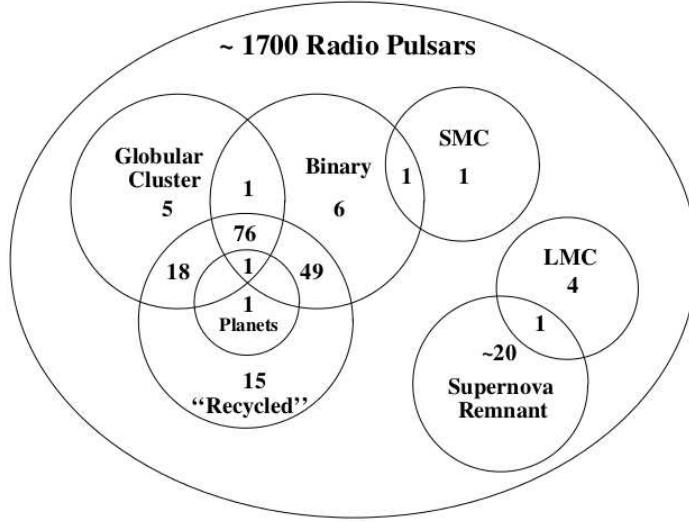


Рис. 3: Диаграмма, демонстрирующая распределение 1700 радиопульсаров (по состоянию на 2005 г.) [2] по типам. Binary - пульсары в двойной системе, "Recycled" повторно "раскрученные" в ходе эволюции в двойной системе, Supernova Remnant - ассоциированные с остатками сверхновых, Globular Claster - пульсары в шаровых скоплениях, Planets - пульсары с планетами, SMC - в малом Магеллановом облаке, LMC - в большом Магеллановом облаке.

а для определения МПИ используются интегральные импульсы пульсаров с хорошим (более 10) отношением сигнал/шум, что требует продолжительного синхронного накопления импульсов. Дополнительной проблемой в построении интегрального профиля является задержка радиосигнала в среде, вызванное зависимостью скорости его распространения от частоты (дисперсионное запаздывание), которое определяется по формуле

$$\delta t = 4.15_{[ms]} \times DM_{[pc \times cm^{-3}]} \times \left(f_{2[GHz]}^{-2} - f_{1[GHz]}^{-2} \right) \quad (1)$$

где $f_2 < f_1$ и мера дисперсии

$$DM = \int_0^d n_e dl$$

где n_e - плотность электронов на луче зрения и d - дистанция до пульсара.

Наличие дисперсионного запаздывание импульса при наблюдениях в конечной полосе частот приводит к его размыванию и требует использования специальной процедуры компенсации влияния меры дисперсии.

Существуют различные реализации пульсарных приемников (так называемых "пульсарных машин"), которые позволяют производить синхронное накопление сигнала в режиме on-line и off-line. При этом возможны два подхода, позволяющие в дальнейшем компенсировать влияние DM : 1) полученные при высокоскоростном опросе АЦП с дискретом $1/\Delta f$ (где Δf - полоса частот приемника) данные подвергаются преобразованию Фурье, производится смещение фазы сигнала, величина которого зависит от частоты и DM и обратное преобразование Фурье, при этом восстанавливается компенсированный за DM импульс пульсара - это метод носит название додетекторной компенсации меры дисперсии, 2) в пределах общей частотной полосы аналоговым (с помощью набора узкополосных фильтров) или цифровым (с помощью аппаратно реализованного on-line быстрого преобразования Фурье) способом реализуются дискретные частотные каналы, ширина которых достаточно мала, чтобы влиянием дисперсионного размывания в каждом из каналов можно было пренебречь, затем каналы суммируются во временной области с учетом временного сдвига рассчитанного по формуле (1). В лабораторной работе используются данные, полученные по методу 2).

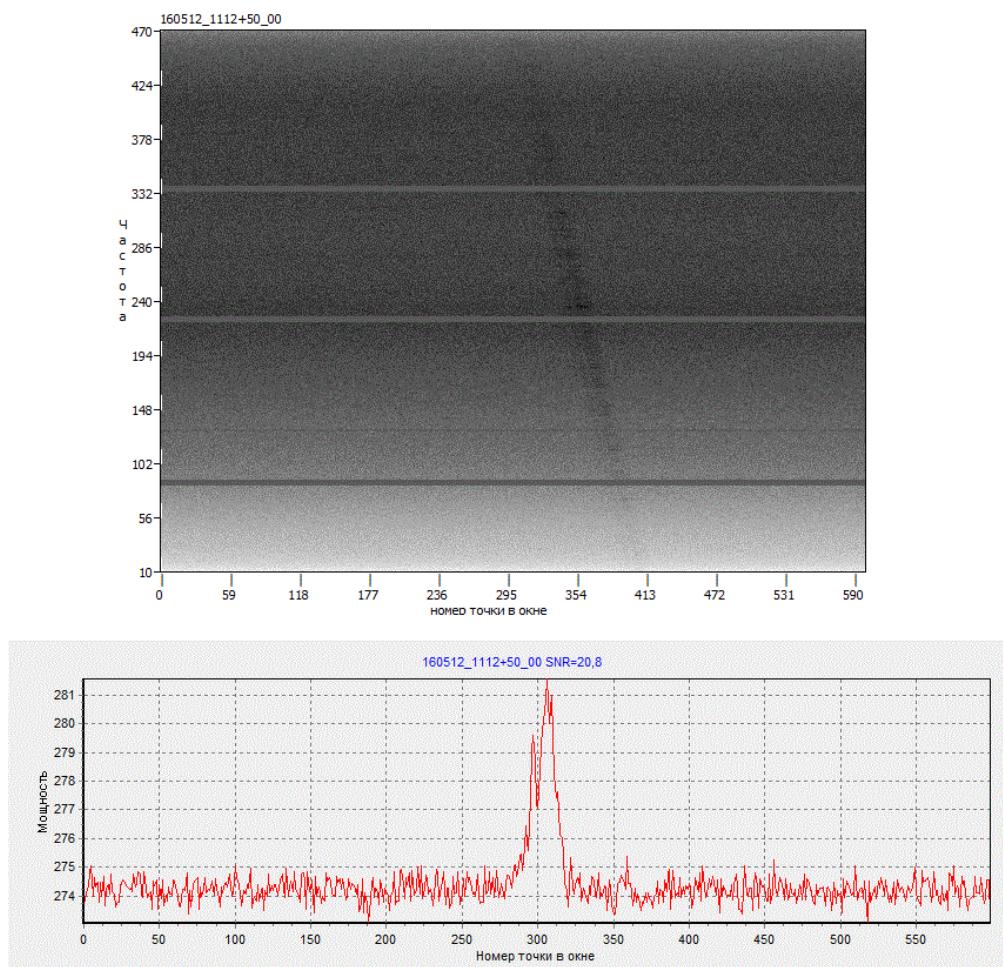


Рис. 4: Иллюстрация работы программы первичной обработки пульсарных данных PulseViewer (Логвиненко С.В.. ПРАО АКЦ ФИАН). Сверху - развертка время-частотный канал, демонстрирующая дисперсионное запаздывание суммарного импульса, снизу - суммарный импульс после устранения меры дисперсии.

Необходимым требованием к пульсарным данным является наличие временных меток в записи пульсарных данных, которые привязывают время начала накопления сигнала пульсара к локальной шкале времени.

Компенсация меры дисперсии и синхронное off-line суммирование (если необходимо), проводится с использованием специализированных программ, результатом работы которых является суммарный профиль пульсара за сеанс. (См. Рис. 4).

Далее производится кросс-корреляция полученного в сеансе интегрального профиля пульсара с так называемым "эталонным" профилем, формируемым путем суммирования большого числа импульсов, либо синтезируемым (обычно набором гауссиан, наилучшим образом описывающим структуру профиля пульсара). В результате кросс-корреляция определяется задержка импульса δt_{ccf} пульсара относительно эталонного профиля. МПИ в точке наблюдения (токоцентрический МПИ) определяется как $t_{TOA} = t_0 + \delta t_{ccf} + \delta t_{loc}$, где t_0 - время старта накопления сигнала, δt_{loc} - поправка в локальную шкалу времени относительно опорной шкалы времени (обычно GPS(TS), так как сигналы опорной шкалы времени синхронизируются по GPS).

Полученные в результате ряда сеансов токоцентрические МПИ преобразуются (редуцируются) далее в барицентрические МПИ. Редукция производится с учетом эффекта влияния рас-

пространения сигнала пульсара в поле Солнца и больших планет, релятивистских aberrации и эффекта Доплера вследствие вращения и орбитального движения Земли, а также релятивистского преобразования шкал времени в Солнечной системе [4]. Для расчета положения Солнца и больших планет используется эфемериды DE200 и DE405 [10]. Эфемериды DE405 в виде коэффициентов рядов Чебышева и сервисные программы доступны в сети Internet [11].

Для расчета ОУ барицентрических МПИ необходимо произвести расчет МПИ в барицентр Солнечной системы импульса пульсара на основе принятой модели. Для одиночных пульсаров может быть использована модель [4], для двойных пульсаров барицентрические МПИ рассчитываются с использованием релятивистской модели движения пульсара в двойной системе, например, наиболее распространенной модели DD [12, 13].

Определим остаточные уклонения МПИ $r(t)$ как разность между наблюдаемым значением фазы импульса \mathcal{N}^{obs} , и предсказанным значением $\mathcal{N}(t, \theta)$, отнесенную к частоте собственного вращения пульсара ν ,

$$r(t, \theta) = \frac{\mathcal{N}^{obs} - \mathcal{N}(t, \theta)}{\nu}, \quad (2)$$

где $\theta = \{\theta_a, a = 1, 2, \dots, k\}$ обозначает набор k измеряемых параметров.

При наблюдениях двойных пульсаров обычным набором параметров является:

- вращательные параметры: частота собственного вращения пульсара и ее производные - $\nu, \dot{\nu}, \ddot{\nu}$, начальная фаза \mathcal{N}_0 на эпоху T_0
- астрометрические параметры: координаты, собственные движения и параллакс - $\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi$
- кеплеровские орбитальные параметры: период орбитального обращения, эксцентриситет орбиты, проекция большой полуоси орбиты на луч зрения, эпоха прохождения перигея, долгота перигея, долгота восходящего узла - $P_b, e, x, T_\omega, \omega, \Omega$
- посткеплеровские и релятивистские параметры, производные кеплеровских параметров - $\dot{P}_b, \dot{e}, \dot{x}, \dot{\omega}$, задержка сигнала в поле пульсара компаньона (поправка Эйнштейна) γ , поправки Шапиро на распространение сигнала в поле компаньона пульсара - r, s

Данный набор параметров не является окончательным и может дополняться при постановке специфических задач.

Как правило, начальные параметры для вычисления барицентрических МПИ и ОУ МПИ берутся из одного из пульсарных каталогов, и после расчета ОУ МПИ (2) производится уточнение параметров по МНК. Все операции с топоцентрическими МПИ проводятся с использованием одной из программ фазового анализа пульсаров (TIMAPv4, TEMP02). Результатом обработки на этом этапе являются ряды барицентрических ОУ МПИ и уточненные параметры пульсара.

2 Описание этапов выполнения работы.

2.1 Получение среднего профиля и расчет топоцентрических МПИ.

При выполнении работы используется программа kkfs3.exe (Дорошенко О.В., Потапов В.А., ПРАО АКЦ ФИАН), предназначенная для пакетной обработки результатов наблюдений пульсаров, проведенных на многоканальных комплексах (в частности будут обрабатываться данные с АС-600/160 – Анализатора спектра с центральной частотой 600 МГц и 160 частотными каналами, использующегося в наблюдениях на радиотелескопе РТ-64 в Калязине).

При запуске kkfs3 пользователем интерактивно вводится информация о мере дисперсии пульсара, номере начального и конечного файла обрабатываемых данных, число файлов в обрабатываемой группе, сдвиг фазы импульса, после чего производится считывание данных из 3-х групп файлов:

- Файлы данных – `pulse.xxx` – `pulse.yyy`, содержащие поканальные записи интегральных импульсов и временные метки старта накопления
- Файл поправок в локальную шкалу `dt`
- Файл шаблона (эталонного профиля) `tpl`

При удачном чтении данных для каждого файла, содержащего один наблюдательный скан, производится поканальная нормировка данных, суммирование их с временным сдвигом, определяемым заданной оператором мерой дисперсии, суммирование отдельных импульсов за каждый скан, кросс-корреляция с шаблоном и вычисление тоопцентрических МПИ в опорной шкале времени.

Пример сеанса работы с программой:

```
>kkfs3.exe
READ from dt correction -7.000000 us
Profile matching by KKF with template
PRAO FIAN - 2010
DM constant pc*cm-3 ->71.045
First file name extension PULSE.xx->84
Last file name extension PULSE.xx->103
Number of files in one group ->5
Shift phase ->0
```

После ввода данных пользователем на терминале отображаются данные, считанные из заголовка файла `pulse.xxx`:

имя пульсара,
число каналов и число отсчетов,
модифицированная юлианская дата (MJD) начала наблюдений, число секунд от полуночи MJD, дискрет в микросекундах,
период пульсара, использованный при накоплении (расчетный), число импульсов, накопленных в каждом скане.

Параметры шаблона.

```
PSRNAM: 1937+21
nchan, nbins 160 150
53403.000000 35629.000078432280000 10.000000
1.557784666548899 115547
```

Template: `tpl`

```
Template parameters Left= 32 Right=130 Center= 43.00000
Press a key...
```

После нажатия Enter производится расчет кросс-корреляции, МПИ и профиля пульсара и вывод данных в файлы `kkf`, `toa` и `prf`.

`kkf` – ASCII-файл, содержащий промежуточную информацию о результате вписывания методом кросс-корреляции в профиль, полученный при обработке каждой группы сканов.

`toa` – в данном файле отображается основной результат работы программы – последовательность МПИ для каждой группы сканов сеанса в формате `itoa`, в каждой строке приводится имя пульсара, тоопцентрические МПИ в MJD, ошибка вписывания профиля в шаблон в мкс (априорная ошибка), центральная частота наблюдений, код обсерватории и отношение сигнал/шум для интегрального импульса пульсара, полученного в соответствующей группе сканов:

```
1937+21 53403.4209375132231 .13 599.2000 .000000 KZ 105.5-sn
1937+21 53403.4316435330166 .13 599.2000 .000000 KZ 102.6-sn
```

```
1937+21 53403.4423495532559 .26 599.2000 .000000 KZ 52.2-sn
1937+21 53403.4530555737110 .18 599.2000 .000000 KZ 76.1-sn
```

prf – текстовый файл, содержит нормированный на единицу профиль импульса пульсара, полученный интегрированием индивидуальных импульсов всего массива обрабатываемых данных. Профиль записан в виде простой последовательности отсчетов в ASCII формате и может быть визуализирован любой программой для построения графиков (например, gnuplot) (См. Рис.5).

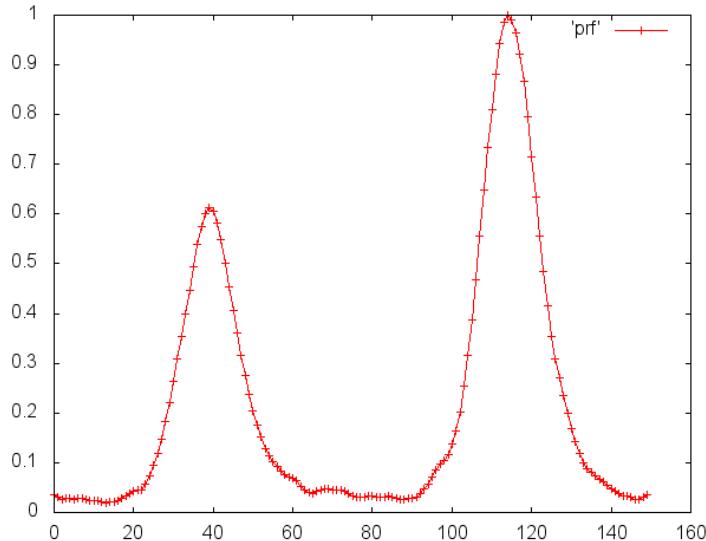


Рис. 5: Пример суммарного профиля пульсара B1937+21, полученного в наблюдениях на радиотелескопе РТ-64. По оси абсцисс - отсчеты приемника, по оси ординат - интенсивность в условных единицах.

2.2 Анализ первичных данных с использованием программы TEMPO. Расчет барицентрических ОУ МПИ и уточнение параметров.

Используем в качестве примера результат обработки рядов топоцентрических МПИ пульсара J1640+2224 с помощью программы TEMPO. Подробное описание форматов данных и процедур работы с программой дается в описании (предоставляется в ходе выполнения практикума).

Для работы программы необходимо наличие в рабочей папке файла, содержащего осредненные на суточном интервале топоцентрические МПИ - 1640.tim (пример файла в формате itoa приведен ниже):

```
1640+22 50646.8718171734155 10.68 599.20000 0.000000 KZ 8pRMS: 30.2mks
1640+22 50794.4211458679567 5.47 599.20000 0.000000 KZ 15pRMS: 21.2mks
1640+22 50800.3093171673090 3.49 599.20000 0.000000 KZ 15pRMS: 13.5mks
1640+22 50843.2813773359226 2.42 599.20000 0.000000 KZ 5pRMS: 5.4mks
1640+22 50912.2443981768742 3.80 599.20000 0.000000 KZ 8pRMS: 10.8mks
```

А также файла с параметрами пульсара, которые будут использоваться для расчета теоретически значений МПИ - 1640.par, пример файла приведен ниже: PSR 1640+22

```
RAJ 16:40:16.74267141 1 0.00025853
DECJ 22:24:09.0150769 1 0.0043734
PMRA 1.0826 1 0.4045
PMDEC -10.9966 1 0.5113
```

```

PX 18.1785 1 9.4432
F0 316.1239843704113923 1 0.0000000000481826
F1 -2.811713279077E-16 1 1.849747044628E-19
F2 0 1
PEPOCH 49360.000000
START 50646.871
FINISH 53846.242
DM 18.424500
EPHEM DE405
CLK UNCORR
NTOA 213
NITS 9
BINARY DD
A1 55.329735292 1 0.000002358
E 0.0007970070 1 0.0000000703
T0 49345.157907980 1 0.002675438
PB 175.462568316772 1 0.000000279996
OM 50.665218381511 1 0.005489538531
OMDOT 0.0081244
GAMMA 0.0000300
PBDOT -1434.6170813
SINI 0.999950
DTHETA 18492.218395
XDOT -0.141730
EDOT 0.000565

```

Файл с начальными данными для расчета МПИ подготавливается студентами самостоятельно с использованием каталога пульсаров (Например, [5]). в каждой строке файла дается название, значение и ошибка одного из параметров пульсара (уточняемый или фиксированный - полное описание формата дается в описании программы TEMPO). Ключ 1 между значением параметра и ошибкой означает, что в ходе обработки данных данный параметр соответственно должен уточняться (в приведенном примере кеплеровский параметр OM - долгота перигея, уточняется, а пост-кеплеровский параметр OMDOT - движение перигея, не уточняется).

Запуск программы осуществляется командой:

`tempo 1640.tim -t` ключ `-t` означает, что в ходе работы программы при уточнении параметров будет генерироваться файл с именем, соответствующим параметру PSR и расширением ".par содержащий значение уточненных параметров пульсара.

Файл `tempo.lis` содержит большое количество информации о ходе обработки данных (см. инструкцию), файл `resid2.tmp` содержит информацию о вычисленных МПИ пульсаров и может быть использован для построения графиков рядов ОУ МПИ до и после уточнения параметров. Для вывода данных из файла `resid2.tmp` в ASCII-файл используется предоставляемая студентам программа `rdr`.

Пример графика остаточных уклонений барицентрических МПИ после уточнения параметров приведен ниже на Рис. 6:

В ходе работы следует расчитать уточненные параметры пульсаров при использовании эфемерид DE200 и DE405 (задается параметром EPHEM) в файле `****.par`, а также в различных опорных шкалах, TAI, TT(BIPM), (задается параметром CLK). Следует получить ряды ОУ МПИ во всех случаях и проанализировать причины расхождения результатов.

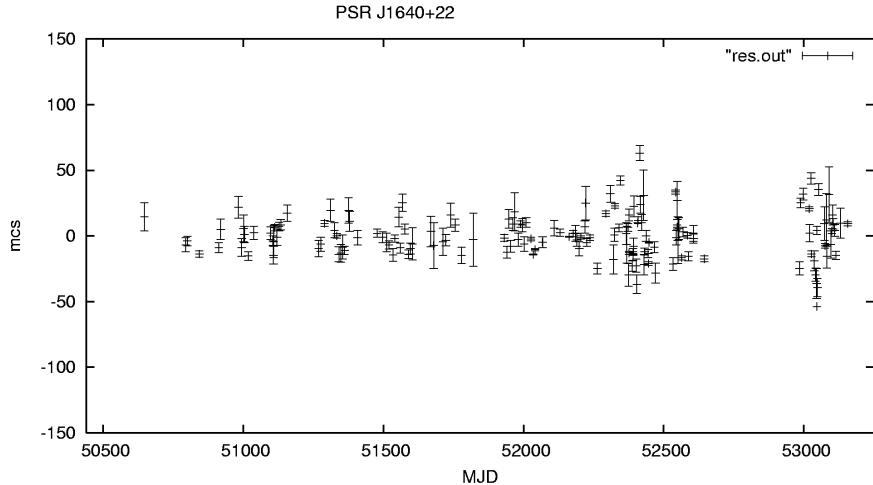


Рис. 6: ОУ МПИ пульсара J1640+2224 (по результатам наблюдений в Калязинской радиоастрономической обсерватории). По оси абсцисс - MJD, по оси ординат - ОУ МПИ в микросекундах.

Список литературы

- [1] Hobbs, G. B.; Edwards, R. T.; Manchester, R. N., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **369**, Issue 2, 655-672
- [2] Lorimer, D.R., [arXiv:astro-ph/0511258v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511258v1).
- [3] "The EPN data archive <http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/Resources/epn>
- [4] Дорошенко О.В., Копейкин С.М., *Астрон.журн.*, **68**, 986 (1990).
- [5] ATNF "The Pulsar catalogue web interface to pulsar database, <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat>
- [6] Manchester, R.N. et al., [http://arXiv.org/abs/astro-ph/0412641](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0412641)
- [7] Taylor J.H., and Weisberg, J.M., *Astrophys. J.*, **345**, 434-450, (1989).
- [8] Wolszczan, A., and Frail, D.A., *Nature*, **335**, 145-147, (1992)
- [9] Lyne, A.G. et al., *Science*, **303**, 1153-1157, (2004).
- [10] Standish, E.M., *JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405*, Jet Propulsion Laboratory Interoffice memorandum IOM 312. F98-048.
- [11] <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/export/>
- [12] Damour, T., Deruelle, N., *Ann/ Inst. Henri Poincare, Physique Theorique*, **43**, 107 (1985)
- [13] Damour, T., Deruelle, N., *Ann/ Inst. Henri Poincare, Physique Theorique*, **44**, 263 (1986)