

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени П. Н. ЛЕБЕДЕВА.

На правах рукописи

**Потапов Владимир Алексеевич**

УДК 52.16/17, 521.95, 524.38

**ХРОНОМЕТРИРОВАНИЕ МИЛЛИСЕКУНДНЫХ  
ПУЛЬСАРОВ В ПРИСУТСТВИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ  
ШУМОВ.**

Специальность 01.03.02 - астрофизика, радиоастрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2006

Работа выполнена  
в Пушинской Радиоастрономической обсерватории  
Астрокосмического центра Физического института  
им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук

- Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор Ю. П. Илясов  
(ПРАО АКЦ ФИАН),
- Официальные оппоненты:** доктор физико - математических наук,  
профессор В.Е.Жаров  
(ГАИШ МГУ)  
доктор физико - математических наук  
М.В.Попов  
(АКЦ ФИАН),
- Ведущая организация:** Всероссийский  
Научно-Исследовательский Институт  
Физико-Технических и  
Радиотехнических Измерений  
(ВНИИФТРИ).

Защита состоится 26 июня 2006 года в 15:00 на заседании Диссертационного совета Д.002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_ мая 2006 г.

**Ученый секретарь**  
Диссертационного совета Д.002.023.01

доктор физико - математических наук



Ю. А. Ковалев

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы.

Хронометрирование является одним из основных методов наблюдения пульсаров в современной радиоастрономии. К настоящему моменту удалось обеспечить точности в определении моментов прихода импульсов (МПИ) пульсаров в точку наблюдения порядка сотен наносекунд.

Благодаря высокой стабильности периода собственного вращения пульсары являются единственным астрономическими объектами, реализующими идею макроскопических часов в космосе. Это позволяет решать широкий круг астрометрических, небесномеханических и астрофизических задач. В частности, проводить точное определение координат пульсара, параметров его собственного вращения, кеплеровских и посткеплеровских параметров его двойной системы. Включение в математическую модель хронометрирования дополнительных параметров позволяет проводить исследования физических условий в двойной системе, тестировать согласованность теории движения Земли, Луны и планет (тестирование эфемерид), исследовать вариации межзвездной среды. Точные соотношения между МПИ в барицентрической и топоцентрической системах отсчета, а также теория движения двойного пульсара, построены на основе т.н. параметризованного постньютоновского формализма (ППН), позволяющего путем вариации входящих в базовые соотношения параметров тестировать различные теории гравитации в приближении сильного поля. Отметим, что термин “приближение сильного поля” употреблен здесь в том смысле, что потенциал гравитационного поля в окрестностях пульсара значительно превосходит потенциал внутри солнечной системы. Это очевидно дает больше возможностей для обнаружения возможных отклонений от модели ОТО в сравнении с экспериментами, проводимыми в Солнечной системе.

Отдельной задачей, инструментом для решения которой служит пульсарное хронометрирование, является построение шкалы времени, основанной на стабильности периода собственного вращения пульсара или его орбитального периода (в случае двойного пульсара).

Использование методов Радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) совместно с хронометрированием пульсаров, позволяет произвести привязку квазиинерциальной (ICRF) и динамической (DE)

систем координат путем сравнения координат и собственных движений пульсаров, полученных как методами РСДБ, так и с помощью хронометрирования.

Естественным ограничивающим фактором, снижающим возможности применения метода хронометрирования для решения перечисленных задач, является присутствие в рядах МПИ пульсаров не только детерминированных составляющих, которые могут быть описаны в рамках модели хронометрирования, но и стохастических вариаций различного астрофизического и геофизического происхождения (на практике обычно рассматриваются ряды остаточных уклонений (ОУ) МПИ, характеризующие отличие наблюдательных данных от предсказанных моделью), проявляющихся в виде так называемого “шума хронометрирования” (данный термин является возможно не слишком удачной, но широко употребляемой калькой с английского “timing noise”).

Следует отметить, что понятие “шум хронометрирования” (или “пульсарный шум”) интерпретируется здесь и далее в расширенном смысле, т.е. шумом считаются не только процессы, принципиально не поддающиеся детерминированному описанию (такие, например, как случайные вариации электронной межзвездной среды), но и процессы, неучтенные вследствие отсутствия достаточной о них информации и/или адекватной модели описания, или, наконец, вследствие проблематичности включения некоторых параметров в стандартную модель хронометрирования (например, многокомпонентная прецессия, учет релятивистских поправок высоких степеней и т.д.). С точки зрения исследователя, имеющего дело с интерпретацией готовых остаточных уклонений МПИ, любой из вышеуказанных эффектов проявится в виде аддитивных шумов в ОУ МПИ.

Особенностью данных шумов является то, что их спектр существенно отличается от спектра т.н. “белого шума”. Большое влияние на остаточные уклонения МПИ оказывает присутствие коррелированного низкочастотного шума (“красного шума”). Эффект влияния “красного шума” безотносительно к его физической причине выражается двояко. С одной стороны, поскольку общепринятая методика обработки пульсаров и уточнения их параметров базируется на предположении о некоррелированном характере шума в МПИ пульсаров и адекватности описывающей пульсар модели, то, в результате применения Метода наименьших квадратов

(МНК), неизбежно получают смещенные оценки параметров пульсара. Таким образом, “маскируются” неизвестные, возможно значимые физические эффекты. С другой стороны, присутствие шумов, не описываемых в рамках модели хронометрирования, приводит к трендам в ОУ МПИ на длительных интервалах времени.

Стационарный коррелированный шум может рассматриваться не только как помеха, но также как источник информации о внутреннем строении и динамике пульсара и системы, в которую он входит в качестве компонента, о среде распространения импульса, а также о динамике системы отсчета, связанной с наблюдателем.

С учетом всего вышеизложенного, очевидно, что адекватное описание коррелированных шумов в МПИ пульсаров является весьма сложной задачей, включающей в себя как теоретическую составляющую, а именно, построение математического аппарата, формально описывающего влияние шумов достаточно общей природы на МПИ и построение моделей их происхождения, так и практическую часть, заключающуюся в проведении продолжительных непрерывных наблюдений (мониторинга) пульсаров и последующей обработки их результатов с целью поиска и анализа различных шумовых составляющих.

Решению некоторых аспектов этой проблемы посвящена данная диссертация.

### **Цели и задачи диссертационной работы.**

- Теоретическое исследование спектральной чувствительности хронометрирования двойных пульсаров к низкочастотным шумам, в частности, к шумам космологического происхождения.
- Систематизация наблюдений МПИ пульсаров, проводившихся на радиотелескопе РТ-64 (ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине) в 1997 - 2005 гг. Расчет барицентрических МПИ, их остаточных уклонений и определение параметров этих пульсаров, а также параметров среды распространения сигнала (вариации меры дисперсии).
- Исследование характеристик нестабильности частоты собственного вращения пульсаров по рядам их МПИ.
- Оценка по рядам МПИ двойных пульсаров верхнего уровня шумов космологического происхождения, в частности, шума, вызван-

ного стохастическим реликтовым гравитационно-волновым фоном (ГВШ).

### **Личный вклад автора.**

1. Проведен расчет дуальных функций, определяющих вид ковариационных матриц наилучших оценок параметров двойных пульсаров и численно промоделировано их поведение в окрестностях орбитальных и малых частот. Проведен расчет ковариационных матриц в виде разложений в тригонометрические ряды с удержанием высоких степеней параметра  $1/T$ , где  $T$  - общее время наблюдений. Проведено численное моделирование поведения фильтрующей функции и выражений для дисперсии ОУ МПИ в присутствии низкочастотного шума для различных времен наблюдений. Показано, что на длительных временах наблюдений результаты аналитических расчетов совпадают с результатами численного моделирования с хорошей точностью. Написано программное обеспечение для аналитических расчетов и численного моделирования.
2. Проведена обработка рядов МПИ 6 пульсаров, наблюдавшихся на радиотелескопе РТ-64 и комплексе АС-600/160 в Калязине, а также обработка совместных рядов МПИ пульсара В1937+21, наблюдавшихся в Калязине и Кашиме. Получены ряды барицентрических МПИ и ОУ МПИ и уточнены параметры пульсаров. Оценены характеристики частотной нестабильности  $\sigma_z$  (дисперсии Тейлора).
3. Определена вариация производной орбитального периода  $\Delta\dot{P}_b$  по наблюдениям двойного миллисекундного пульсара J1640+2224. По величине вариации  $\Delta\dot{P}_b$  оценен верхний предел стохастического реликтового гравитационно-волнового фона (ГВШ).
4. Проанализированы вариации меры дисперсии  $DM$  в направлении на пульсар В1937+21, найденные по результатам совместного двухчастотного хронометрирования в Калязине и Кашиме в 1997 - 2002 гг. на частотах 0.6 и 2.15 ГГц, а также по опубликованным другими авторами данным (с 1984 года). Результаты анализа позволили сделать вывод о наличии векового изменения  $DM$  в направлении на этот пульсар.

## **Научная новизна работы.**

- Впервые получены в частотной области аналитические выражения зависимости дисперсий ОУ МПИ и ковариационных матриц наилучших оценок параметров двойных пульсаров от амплитуд низкочастотных шумов со степенными спектрами и от продолжительности наблюдений.
- Обоснована адекватность оценок низкочастотных шумов, в частности ГВШ, по анализу рядов ОУ МПИ, полученных в результате стандартной процедуры уточнения параметров двойного пульсара.
- Проанализированы ряды МПИ 6 миллисекундных и двойных пульсаров по результатам наблюдений на радиотелескопе РТ-64 (ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине) в 1997 - 2005 гг. Получены новые значения параметров пульсаров J1640+2224 и B1937+21, оценены характеристики нестабильности частоты их собственного вращения.
- Обнаружено постоянное уменьшение меры дисперсии в направлении на миллисекундный пульсар B1937+21, продолжающееся около 20 лет (1984 - 2002).

## **Научная и практическая ценность работы.**

Развитый в работе математический формализм может быть использован при расчете влияния на результаты хронометрирования пульсаров красных шумов в ОУ МПИ, независимо от их физического происхождения.

Полученные ряды барицентрических ОУ МПИ, а также параметры пульсаров и межзвездной среды могут быть использованы как для независимых исследований, так и для совместной обработки с рядами, полученными независимо на других обсерваториях и других частотах. Систематизированные ряды МПИ двойных миллисекундных пульсаров представляют собой ценный исходный экспериментальный материал для решения задач астрофизики, релятивистской астрометрии и небесной механики, а также для формирования шкалы пульсарного времени.

## **Апробация результатов работы.**

Изложенные в диссертации результаты докладывались на следующих научных конференциях:

- Коллоквиуме МАС 177 "Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond", Бонн, Германия, 1999.
- На конференции Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM), Москва, 2000.
- Симпозиуме МАС 218, "Young Neutron Stars and their Environments", Сидней, Австралия, 2003.
- Всероссийской Астрономической Конференции ВАК-2004 "Горизонты Вселенной", Москва, 2004.
- На отчетных сессиях АКЦ ФИАН в Пушино в 1997 - 2005 гг.

## **Основные результаты, выносимые на защиту.**

1. Получены аналитические выражения для расчета в частотной области дисперсии ОУ МПИ и ковариационных матриц наилучших оценок параметров двойных пульсаров в присутствии низкочастотных шумов со степенными спектрами. Проведена сравнительная оценка чувствительности хронометрирования к красным шумам в различных спектральных диапазонах.
2. Доказано, что применение МНК для вычисления орбитальных параметров двойных пульсаров не приводит к существенному подавлению низкочастотных красных шумов в ОУ МПИ. Это обосновывает использование результатов хронометрирования двойных пульсаров для поиска и оценки интенсивности красных шумов, в частности, для оценки верхнего предела плотности энергии реликтового стохастического гравитационно-волнового фона (ГВШ).
3. Проведены обработка и анализ рядов МПИ двойных миллисекундных пульсаров J0613-0200, J1640+2224, J1643-1223, J1713+0747, J2145-0750 и одиночного миллисекундного пульсара B1937+21 за 1997 - 2005 гг. Использовались результаты наблюдений на эталонном комплексе пульсарного времени, установленном на радиотелескопе РТ-64 (ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине). Вычислены новые значения астрометрических, спиновых и орбитальных параметров



пульсаров J1640+2224 и B1937+21. Результаты обработки с использованием различных алгоритмов, реализованных в компьютерных программах TIMAPR (ПРАО АКЦ ФИАН) и ТЕМРО (Принстонский университет), а также аналитических и численных эфемерид преобразования шкал времени в Солнечной системе, показали совпадение в пределах ошибок измерения.

4. Оценена нестабильность частоты собственного вращения для пульсаров J0613-0200, J1640+2224, J1643-1223, J1713+0747, J2145-0750 и B1937+21 по ходу дисперсии Тейлора  $\sigma_z$ . Подтверждено доминирование в шумах ОУ МПИ белого фазового шума вплоть до частоты  $5 \times 10^{-9}$  Гц при минимальном значении  $\sigma_z = 1.7 \times 10^{-14}$  достигаемом на временном интервале 5 лет (по двухчастотным наблюдениям пульсара B1937+21).
5. Оценен верхний предел ГВШ по результатам наблюдений двойного миллисекундного пульсара J1640+2224. В диапазоне частот  $10^{-11} < f < 7.1 \times 10^{-9}$  Гц получено значение относительной плотности энергии ГВШ  $\Omega_g h^2 \leq 8.5 \times 10^{-4}$ .
6. По результатам совместного двухчастотного хронометрирования обнаружено вековое уменьшения меры дисперсии  $DM$  в направлении на пульсар B1937+21 со средней скоростью  $-0.00114(1)$  пк  $\text{см}^{-3}/\text{год}$  (на промежутке 1984 - 2002 гг.). Наблюдения проводились на частотах 0.6 и 2.15 ГГц на радиотелескопах РТ-64 (ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине) и РТ-34 (Каширский центр космических исследований Национального института информационных и коммуникационных технологий KSRC NICT, Япония).

## Содержание работы

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц, включая список литературы из 105 библиографических ссылок, 18 таблиц и 18 рисунков.

**Введение** содержит краткий обзор проблемы хронометрирования в присутствии низкочастотных шумов. Особое внимание уделено описа-

нию современного состояния проблемы адекватного моделирования стохастических процессов, порождающих низкочастотные шумы в ОУ МПИ пульсаров. Обсуждается актуальность и новизна работы. Перечислены выносимые на защиту результаты, и отмечен личный вклад автора. Приведен список публикаций по теме диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу спектральной чувствительности хронометрирования пульсаров к низкочастотным шумам. Анализ проводится в рамках реалистичной 14-параметрической (6 параметров описывают собственное вращение пульсара и 8 - его орбитальное обращение) модели движения пульсара в двойной системе с малым эксцентриситетом (круговая орбита) (Копейкин, 1999). Физическая природа рассматриваемых шумов не конкретизируется. Предполагается, что они вызваны стохастическими процессами, моделируемыми случайными блужданиями в фазе собственного вращения, частоте собственного вращения и производной частоты собственного вращения пульсара (см., например, Грот, 1975), которые порождают в ОУ МПИ шумы со спектром мощности  $S(f) \sim 1/f^2, 1/f^4, 1/f^6$ . В ОУ МПИ пульсаров могут присутствовать и фликер-шумы вида  $1/f, 1/f^3, 1/f^5$  (см., например, Бертоцци и др., 1983), которые вызываются процессами распространения сигнала на пути от пульсара к наблюдателю и шумами, внесенными в ОУ МПИ на этапе регистрации сигнала и обработки данных. Особое место среди шумов хронометрирования занимает шум вида  $1/f^5$ , который вызван присутствием низкочастотного фонового стохастического гравитационно-волнового излучения (Машхун, Грищук, 1980).

Для характеристики влияния шумов со степенными спектрами на хронометрирование пульсара был проведен теоретических расчет значений дисперсии ОУ МПИ пульсаров, а также ковариационных матриц наилучших оценок параметров пульсара в частотной области. Использован метод регуляризации сингулярных в нуле функций спектра мощности путем ограничения низкочастотных компонентов, что позволило получить удобные для численных расчетов выражения (Копейкин, Потапов, 2004 в Списке публикаций).

Расчеты произведены в аналитической форме, результат оформлен в виде рядов и интегралов от функций, зависящих от общего времени наблюдений и фурье-частоты, что позволяет легко предвычислить ожидаемые значения дисперсий наилучших оценок параметров пульсаров и

Таблица 1: Зависимость дисперсий наилучших оценок (МНК-оценок) частоты собственного вращения и орбитальных параметров от общего времени наблюдений  $T$  (из работы Копейкин, Потапов, 2000 в Списке публикаций)

$S(f)$	Дисперсии параметров:					
	$\nu$	$\sigma_0 = n_b T_0$	$x$	$P_b$	$\dot{x}$	$\dot{P}_b$
$h_0$	$T^{-3}$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$T^{-3}$	$T^{-3}$	$T^{-5}$
$h_1/f$	$T^{-2}$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$T^{-3}$	$T^{-3}$	$T^{-5}$
$h_2/f^2$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$T^{-3}$	$T^{-3}$	$T^{-5}$
$h_3/f^3$	<i>const</i>	<i>const</i>	<i>const</i>	$T^{-2}$	$T^{-2}$	$T^{-4}$
$h_4/f^4$	$T$	$T$	$T$	$T^{-1}$	$T^{-1}$	$T^{-3}$
$h_5/f^5$	$T^2$	$T^2$	$T^2$	<i>const</i>	<i>const</i>	$T^{-2}$
$h_6/f^6$	$T^3$	$T^3$	$T^3$	$T$	$T$	$T^{-1}$

дисперсии ОУ МПИ для любой продолжительности наблюдений подстановкой экспериментальных значений. Оценить зависимость дисперсий параметров двойного пульсара от времени наблюдений качественно можно по Таблице 1, в которой приведены значения дисперсий для следующих параметров:  $\nu$  - частота собственного вращения пульсара,  $\sigma_0 = n_b T_0$  - начальная фаза орбитального обращения,  $x, \dot{x}$  - проекция большой полуоси орбиты пульсара на луч зрения и ее производная,  $P_b, \dot{P}_b$  - период орбитального обращения и его производная.

Моделирование поведения дисперсии ОУ МПИ и вариаций наилучших оценок вращательных и орбитальных параметров пульсаров позволило сделать вывод, что процедура МНК-оценивания орбитальных параметров двойных пульсаров не приводит к подавлению низкочастотных шумов. Следствием этого является строгое обоснование возможности оценки низкочастотных шумов (в частоте ГВШ), по результатам

анализа рядов ОУ МПИ двойных пульсаров.

Моделирование чувствительности вариаций наилучших оценок параметров пульсаров к шуму, расположенному в спектральных окнах в окрестностях низких и сверхнизких частот (меньше частоты орбитального обращения), привело к интересному выводу: на низких частотах орбитальные параметры пульсара на длительных временах подвержены доминирующему влиянию шумов со спектральным индексом  $n \geq 5$ ,  $S(f) \sim 1/f^n$ . Шумы с такими спектрами ассоциируются с шумами космологического происхождения (в частности, ГВШ), которые и будут служить фундаментальными факторами, ограничивающими предельную точность определения параметров пульсара на длительных временах наблюдений. С другой стороны это означает, что анализ хода вариаций орбитальных параметров по достаточно длительным наблюдениям дает возможность обнаружить низкочастотные космологические шумы, которые не будут “замаскированы” более высокочастотными составляющими.

**Во второй главе** представлены результаты обработки и анализа рядов МПИ двойных миллисекундных пульсаров J0613-0200, J1640+2224, J1643-1223, J1713+0747, J2145-0750 и одиночного миллисекундного пульсара B1937+21, наблюдавшихся в 1997 - 2005 гг. на эталонном комплексе пульсарного времени, установленном на радиотелескопе РТ-64 (ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине).

В общей сложности для анализа использовались данные более 1000 сеансов наблюдений по программе хронометрирования пульсаров. Ряды МПИ анализировались с помощью компьютерных программ TIMAPR (Дорошенко, Копейкин, 1990) и ТЕМРО (Тейлор, Вайсбер, 1989). Для редукции МПИ пульсаров в Барицентр Солнечной системы использованы эфемериды DE405, релятивистские преобразования шкал времени производились как с помощью численных, так и с помощью аналитических эфемерид (Файрхед, Бретаньон, 1990). Все методы показали хорошее (в пределах ошибок) совпадения результатов.

Получены ряды барицентрических ОУ МПИ и новые значения вращательных, астрометрических и орбитальных параметров пульсаров J1640+2224 и B1937+21. Значения параметров приведены в таблицах в тексте Диссертации.

Было проведено исследование неустойчивости частоты собственного

вращения пульсара в зависимости от продолжительности наблюдений. В качестве меры оценки нестабильности собственного вращения пульсара в хронометрировании используется статистика  $\sigma_z$ , так называемая дисперсия Тейлора (Тейлор, 1991), которая строится на основе трехточечной выборки по рядам ОУ МПИ. В работе была использована оценка значения дисперсии Тейлора (Мацакис и др., 1997):

$$\sigma_z(\tau) = \tau^2 \langle c_3^2 \rangle^{1/2} / 2\sqrt{5}$$

где  $\tau$  - длительность интервала времени, на котором оценивается  $\sigma_z$ ,  $\langle c_3^2 \rangle$  - оценка среднего значения квадрата коэффициента при третьей степени полинома по времени, вписанного в ОУ МПИ в интервале  $\tau$ , для всех неперекрывающихся интервалов на всем времени наблюдений.

В результате анализа хода дисперсии Тейлора был сделан вывод, что в рядах ОУ МПИ пульсаров J0613-0200, J1640+2224, J1643-1223, J1713+0747, J2145-0750, B1937+21 на длительных временах (7 лет и более) доминирует белый фазовый шум. Дисперсия  $\sigma_z(\tau)$  продолжает уменьшаться, и ее ход не демонстрирует тенденции к перелому. Таким образом, подтверждается надежность выбранных пульсаров в качестве хранителей пульсарного времени. Наилучшее значение  $\sigma_z(\tau) = 1.7 \times 10^{-14}$  достигается для B1937+21 на 5-летнем интервале (двухчастотные наблюдения) (Илясов и др, 2005 в Списке публикаций).

На основании анализа рядов МПИ пульсара J1640+2224 и модели вариации постньютоновского параметра производной периода вращения в двойной системе (Копейкин, Потапов, 2000, 2004 в Списке публикаций). сделана оценка верхнего предела сверхнизкочастотного стохастического гравитационно-волнового излучения. Оценка произведена в диапазоне частот  $1/L < f < 1/T$  где  $L$  - выраженное во временных единицах расстояние от пульсара к наблюдателю,  $T$  общее время наблюдений. Использована формула (Копейкин, 1997):

$$\Omega_g \leq \frac{56\pi^4}{5} \left[ \sin^2 \sigma + \frac{578}{\pi^2} \left( \frac{P_b}{T} \right)^2 \cos^2 \sigma \right]^{-1} \left( \frac{T}{P_b} \right)^2 \left( \frac{x}{P_b} \right)^2 \left[ \frac{\Delta \dot{P}_b / P_b}{10^{-10} yr^{-1}} \right]^2 h^{-2},$$

где  $P_b = 2\pi/n_b$  - орбитальный период пульсара,  $x$  - проекция большой полуоси орбиты,  $T$  - общее время наблюдений (длительность ряда хронометрирования),  $\sigma$  - орбитальная фаза пульсара в момент начала наблюдений,  $\Omega_g$  - относительная плотность энергии гравитационно-волнового

фона в единичном диапазоне частот,  $h$  - безразмерная постоянная Хаббла.

Вариация  $\Delta \dot{P}_b$  оценивалась с учетом эффектов уменьшения  $P_b$  вследствие гравитационно-волнового излучения двойной системы, а также изменения и неопределенности оценки  $P_b$  из-за движения Галактики (кинематические поправки). Полученное значение  $\Delta \dot{P}_b = -1.4 \times 10^{-9}$  позволило получить следующую оценку (Потапов и др., 2003 в Списке публикаций):

$$\Omega_g h^2 < 8.5 \times 10^{-4} \text{ в диапазоне частот } 10^{-11} < f < 7.1 \times 10^{-9} \text{ Гц.}$$

**В третьей главе** приведены результаты анализа рядов совместного двухчастотного хронометрирования миллисекундного пульсара B1937+21 на радиотелескопах РТ-64 (ТНА-1500 ОКБ МЭИ в Калязине) и РТ-34 (Кашимский центр космических исследований Национального института информационных и коммуникационных технологий - KSRC NICT, Япония). Были проанализированы результаты наблюдений 1997-2002 гг. Наблюдения проводились на РТ-64 в Калязине на частоте 0.6 ГГц на пульсарном комплексе АС-600/160 ПРАО АКЦ ФИАН, а также на РТ-34 в Кашиме на частоте 2.15 ГГц с использованием акустооптического анализатора. На обоих радиотелескопах продолжительность сеанса наблюдений составляла до 2 часов, временная привязка осуществлялась с помощью GPS.

В результате учета влияния вариаций меры дисперсии  $DM$  удалось получить уточненные значения параметров пульсара B1937+21. Дисперсия ОУ МПИ уменьшилась и составила 1.8 мкс, в сравнении с величиной 2.2 мкс, полученной по результатам одночастотных наблюдений. Оценки параметров собственного вращения пульсара были существенно уточнены, так как изменение меры дисперсии, приблизительно описываемое на интервале совместных наблюдений полиномом третьей степени по времени, в случае одночастотных наблюдений приводит к переопределению МНК-оценок параметров периода собственного вращения и его производных.

Были рассчитаны значения поправок в меру дисперсии в направлении на данный пульсар и найдено, что значения  $DM$  непрерывно уменьшается на всем промежутке наблюдений. Сравнение с ранее опубликованными данными показывает постоянное уменьшение меры дисперсии в направлении на данный пульсар со средней скоростью около  $-0.00114(1)$

пк см<sup>-3</sup>/год на промежутке времени 1984 - 2002 гг. (Илясов и др., 2005 в Списке публикаций)

**В Заключении** кратко сформулированы результаты, полученные в ходе работы над диссертацией.

**В Приложении А** приводятся таблицы параметров миллисекундных пульсаров.

**В Приложение В** помещен дополнительный материал к Главе 1, в том числе громоздкие аналитические выражения для описания ковариационных матриц наилучших оценок параметров пульсаров; графики, иллюстрирующие зависимость от фурье-частоты дополнительных функций (дуальных функций), определяющих вид диагональных элементов ковариационных матриц параметров модели хронометрирования.

## Список публикаций по теме диссертации:

1. Kopeikin, S.M., Potapov, V.A., Binary Pulsar Tests of General Relativity in the Presence of Low-frequency Noise. ASP Conference Series, **202**, 117, (Ed. M.Kramer, N.Wex, R.Wielebinski, San Francisco, 2000).
2. В.А.Потапов, Ю.П.Илясов, В.В.Орешко, А.Е.Родин, Результаты хронометрирования двойного миллисекундного пульсара J1640+2224 на радиотелескопе РТ-64 в Калязине. Письма в Астрономический Журнал, **29**, No 4, 282, (2003)
3. Ilyasov, Y.P., Oreshko, V.V., Potapov, V.A., Rodin A.E., Timing of millisecond binary pulsars at Kalyazin (Russia), In the proceedings of IAU Symp.218, "Young Neutron Stars and their Environments", p.433, 2004 (ed. by F.Camilo and B.Gaensler, San Francisco, 2004).
4. Ilyasov, Y.P., Imae.M., Hanado Y., Oreshko, V.V., Potapov, V.A., Rodin, A.E., Sekido, M. Results of Russian-Japanese Precise timing of PSR B1937+21. In the proceedings of IAU Symp.218, "Young Neutron Stars and their Environments", p.435, 2004 (ed. by F.Camilo and B.Gaensler, San Francisco, 2004).
5. Kopeikin S.M., Potapov V.A. Millisecond and Binary Pulsars as Nature's Frequency Standards. III. Fourier Analysis and Spectral Sensitivity of Timing Observations to Low-Frequency Noise. MNRAS **355**, 395 (2004).
6. 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 1997-2002 гг., Письма в Астрон. Журн., **31**, No 1, 33, (2005).



## Список литературы.

1. Бертоцци и др., (Bertotti B., Carr B.J., Rees M.J.), MNRAS, **203**, 945, (1983).
2. Грот, (Groth E.J.), Astrophys.J. Suppl. Series, **29**, 453 (1975).
3. Дорошенко О.В., Копейкин С.М., Астрон.журн.**68**, 986, (1990).
4. Копейкин, (Koreikin S.M.), Phys. Rev. D, **56**, 4455 (1997).
5. Копейкин, (Koreikin S.M.), MNRAS, **305**, 563 (1999).
6. Мацакис и др., (Matsakis D. N., Taylor J. H., Eubanks T. M.), Astron.Astrophys, **326**, 924 (1997).
7. Машхун, Грищук, (Mashhoon B., Grishchuk L.P.), ApJ, **236**, 990 (1980).
8. Тейлор, Вайсберг, (Taylor, J.H., Weisberg, J.M.), Astrophys.J., **345**, 434 (1989).
9. Тейлор, (Taylor, J.H.), Proc. IEEE, **79**, 1054 (1991).
10. Файрхед, Бретаньон, (Fairhead, L., Bretagnon,P.), Astron. Astrophys., **229**, 240 (1990).