

УДК 523.164.42

**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ХРОНОМЕТРИРОВАНИЯ  
МИЛЛИСЕКУНДНОГО ПУЛЬСАРА 1937+21 НА  
РАДИОТЕЛЕСКОПЕ ТНА-1500 ОКБ МЭИ**

*Ю. И. Белов, Ю. П. Илясов, Б. А. Попереченко, В. В. Орешко,  
О. В. Дорошенко*

Начались регулярные наблюдения по программе хронометрирования миллисекундного пульсара PSR 1937+21 на частоте 610 МГц на пункте М. Озера ОКБ МЭИ с помощью полноповоротного радиотелескопа диаметром 64 м — ТНА-1500. Для наблюдений установлена аппаратура первой очереди в составе 40-канального анализатора спектра, системы быстрой регистрации и сбора данных наблюдений, объединенных вместе с опорной синхронизирующей системой с помощью интерфейсов КАМАК и управляющего компьютера типа РС-АТ/286. Прием ведется в полосе 1,6 Мгц (40 каналов по 40 кГц). Полная шумовая температура системы порядка 160 К. Отношение сигнал/шум порядка 50 при наблюдении пульсара в течение 30 мин. Среднеквадратичная ошибка измерения времени прихода импульса пульсара составляет 400 нс.

Данные по пульсару 1937+21 совместно с результатами хронометрирования опорных "нормальных" пульсаров PSR 0834+06 и 1919+21, полученных в Астрокосмическом центре ФИАН, в Пущино, за 13 лет наблюдения, будут использованы для построения Пульсарной шкалы времени.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1979 г. было предложено использовать наиболее стабильные пульсары в качестве хранителей новой астрономической шкалы времени — Пульсарной шкалы — РТ [1]. Для этого первоначально были выбраны (как опорные для шкалы) пульсары: PSR 0834+06, 1919+21 [2]. После обнаружения в сентябре 1982 г. миллисекундного пульсара PSR 1937+21 с очень стабильным периодом вращения и незначительным вековым ходом Р [3] стало очевидным, что на длительных отрезках времени пульсары в качестве часов могут конкурировать с лучшими атомными стандартами частоты [4]. Перспективы и возможности Пульсарной шкалы времени с достаточной полнотой рассмотрены в [5, 6].

Наблюдения реперных пульсаров по программе хронометрирования ведутся на Радиоастрономической научной станции ФИАН в Пущино (РАС ФИАН) с 1979 г. на частоте 102,5 МГц с помощью радиотелескопа БСА ФИАН. Измерения момента прихода импульсов (МПИ) выполняются в местной шкале времени, формируемой службой времени РАС

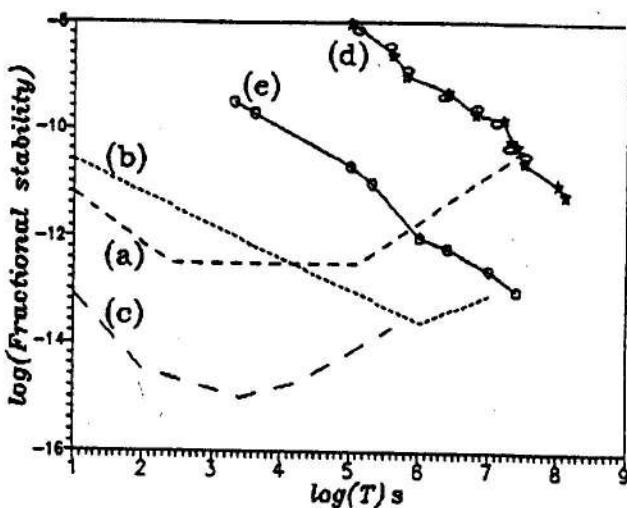


Рис. 1. Относительная стабильность (дисперсия Аллана) различных стандартов времени на интервале  $\tau_c$ :

- а. Рубидиевый, б. Цезиевый, в. Водородный,
- г. PSR 0834+06, 1919+21 — (Пущино),
- д. PSR 1937+21 — (Аресибо).

ФИАН с использованием рубидиевого и цезиевого стандартов. Сличения этой шкалы со шкалой Госэталона времени и частоты (ГЭВЧ) производятся 3 раза в сутки с помощью аппаратуры ТВ-сличений [7] по прямому сигналу Останкинского телекоммуникационного центра (расстояние 120 км). Полная суточная среднеквадратичная погрешность местной шкалы времени составляет 100 нс.

Хронометрирование пульсаров PSR 0834+06 и 1919+21 на интервале в 13 лет показало, что стабильность их периода, оцененная с помощью дисперсии Аллана, лучше, чем  $10^{-12}$ . На таком интервале они хранят средний мерный интервал времени (период) лучше, чем рубидиевые или цезиевые стандарты частоты (см. рис. 1). Массив остаточных уклонений времени прихода импульсов в барицентр солнечной системы, относительно предвычисленных, характеризует эти пульсары как генераторы периодического процесса с белыми фазовыми шумами, с СКО 450 мкс и 800 мкс для пульсаров PSR 0834+06 и 1919+21 соответственно [8].

Как отмечено выше, миллисекундный пульсар PSR 1937+21 и некоторые другие, например PSR 1957+20, должны быть тоже включены в состав реперных для формирования независимой Пульсарной шкалы времени — РТ. На рис. 1 приведена характеристика относительной стабильности (станд. уклонения Аллана) пульсара 1937+21 из [9]. Очевидно, что миллисекундные и нормальные пульсары взаимно дополняют друг друга, тем более что у них, в принципе, подобное качество (отношение СКО к

периоду порядка  $10^{-3}$ : для миллисекундных — 0,5–1 мкс к 1,5 мс, для нормальных — 0,5–1,5 мс к 1–2 с). Поэтому любые дополнительные возможности по хронометрированию миллисекундных пульсаров желательны на долговременных интервалах в комплексе с хронометрированием нормальных пульсаров.

## 2. АППАРАТУРА

Хронометрирование миллисекундных пульсаров в 1993 г. было включено в программу работ радиотелескопа ТНА-1500 ОКБ МЭИ в М. Озерах. Как известно [10], это полноповоротный радиотелескоп работает по схеме Грегори с главным квазипарabolическим рефлектором диаметром 64 м и вторичным зеркалом диаметром 6 м.

Рабочая частота 610 МГц для хронометрирования пульсаров была выбрана как частота, выделенная "Регламентом радиосвязи" для радиоастрономических служб на вторичной основе. Предварительное изучение помех в этом диапазоне в пункте М. Озера показало, что полоса 608–614 МГц не загружена регулярными помехами. Для первой стадии хронометрирования миллисекундных пульсаров частота 610 МГц была выбрана также потому, что в этом диапазоне отношение сигнал/шум при регистрации импульсов пульсаров максимально, следовательно, ошибка измерения момента прихода импульсов из-за шумов системы минимальна [8]. Для уменьшения неопределенности МПИ, из-за распространения сигналов пульсара в межзвездной неоднородной среде, на втором этапе планируется одновременно вести наблюдения на второй частоте 1415 МГц. Эта частота выделена "Регламентом радиосвязи" для радиоастрономии на первичной основе.

Для наблюдений на частоте 610 МГц в первичном фокусе Грегорианской системы радиотелескопа был установлен облучатель с двумя ортогональными линейными поляризациями, выполненный по схеме Килдала с кольцевым директором [11]. С этим облучателем была получена эффективная площадь приема порядка  $1500 \text{ м}^2$  (КИП  $\approx 0,5$ ). Для уменьшения "переливания" за края рефлектора и, как следствие, уменьшения влияния шумов земли и местных индустриальных помех, освещение края главного зеркала было обеспечено на уровне  $-20 \text{ дБ}$ .

Малошумящий транзисторный усилитель был установлен в непосредственной близости от облучателя в термостатированном фокальном боксе вместе с первым смесителем и ПУПЧ на 38 МГц. На первом этапе шумовая температура системы составляла порядка 160 К, полная полоса приема — 1,6 МГц. На втором этапе шумовая температура будет снижена до 100 К и добавлена вторая поляризация с одновременным расширением полосы приема до 3,2 МГц, что увеличивает чувствительность в 3–4 раза.

На рис. 2 приведена блок-схема комплекса хронометрирования пульсаров для одной поляризации. После первого преобразования частоты сигналы из фокального бокса на частоте 38 МГц передаются к анализатору спектра фильтрового типа. Здесь проводится второе преобразование частоты и фильтрация на 40 каналов с полосой 40 кГц каждый. Сигналы 1-го и второго гетеродинов формируются на основе опорной высокостабильной частоты 5 МГц местной службы времени. Приняты специальные меры для стабилизации частоты полосовых фильтров.

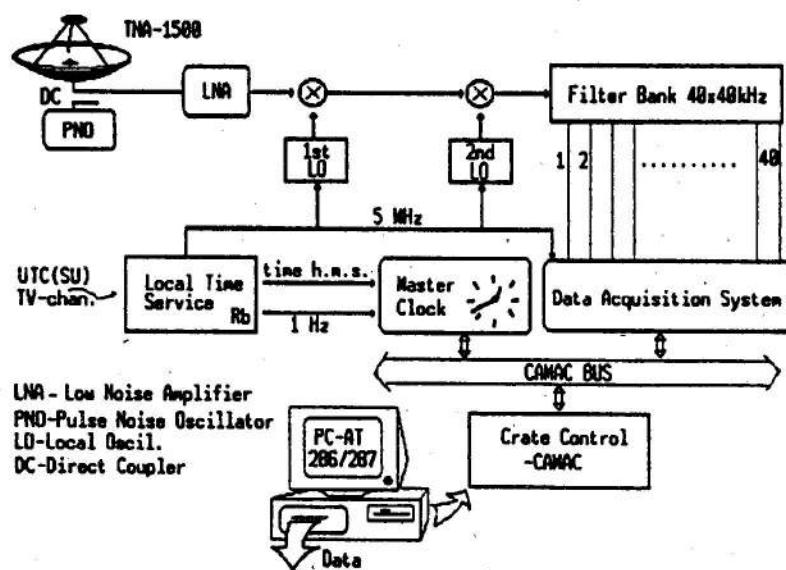


Рис. 2. Блок-схема комплекса хронометрирования миллисекундного пульсара 1937+21 на 610 МГц с радиотелескопом ТНА-1500 ОКБ МЭИ (Медвежьи Озера).

В системе сбора данных производится преобразование сигналов в цифровую форму с помощью быстрых АЦП (время 50 нс), подключенных через 5 коммутаторов к 8 каналам анализатора спектра\*. От блока управления организована параллельная синхронная работа коммутаторов с тактом 1,2 мкс, так что при 8 последовательно опрашиваемых каналах время выборки в канале составляет 10 мкс. Отсчеты снимаются на 150 точках по полному периоду PSR 1937+21 и заносятся в буферную память каждого канала, по 24 разряда в каждом регистре. Объем этой памяти, 6 Кб, позволяет накапливать данные синхронного с периодом пульсара сложения по 150 точкам в 40 каналах в течение 3 мин наблюдения (6000 чисел).

\*Система разработана А. Г. Серкиным.

Синхронизация работы блока управления системы сбора данных ведется с помощью опорных часов, которые вырабатывают "стартовый" импульс в момент совпадения текущего времени и расчетного времени, вычисляемого в компьютере РС-АТ/286 по наблюдаемому периоду пульсара с неопределенностью в 10-м знаке после запятой (0,1 нс). При совпадении этого значения с ближайшим текущим значением времени в опорных часах, на интервале 100 нс генерируется импульс "старт" каждый раз с периодом пульсара. Очевидно, что изменение периода пульсара из-за эффекта Доплера, которое контролируется программой компьютера, учитывается автоматически при таком режиме, в котором опорные часы работают в качестве программируемого синтезатора периода. В расчетное время аналогичным образом вырабатывается сигнал "стоп" (обычно через 3 мин наблюдений). Накопленный массив из 6000 значений для 40 каналов перебрасывается на "жесткий" диск. Для нового, 3-х минутного цикла, программно рассчитывается начало следующего цикла, синхронное с предыдущим. Одновременно корректируется и наблюдаемый период пульсара.

Управление и автоматизация процесса наблюдения осуществляется с помощью компьютера РС-АТ/286 через интерфейс системы КАМАК. Для синхронизации работы использованы сигналы местной службы времени: опорная частота 5 МГц, последовательность сигналов 1 Гц (секунда) и код текущего времени (час, мин, сек).

Для устранения дисперсионного запаздывания отсчеты, накопленные по 40 каналам в 150 точках по периоду пульсара, суммируются поканально в режиме off-line, что дает возможность коррекции на вариации меры дисперсии межзвездной среды, которая будет определяться в последующем по двухчастотным наблюдениям.

Алгоритм синхронного накопления импульсов пульсара PSR 1937+21 реализован в виде программы PHAS [12]. С ее помощью вычисляется момент начала наблюдения, текущий период пульсара, момент окончания цикла накопления. Длительность цикла, кроме объема буферной памяти, определяется допустимыми изменениями периода при его доплеровском сдвиге, за счет изменения проекции вектора скорости наблюдения на направление на пульсар. При наблюдениях пульсара PSR 1937+21 цикл длится 3 мин, при этом истинное изменение наблюдаемого периода не оказывается на уширении импульса при синхронном накоплении с фиксированным периодом. На каждый новый цикл вычисляется новый период пульсара. За начало каждого цикла наблюдения выбирается момент времени, соответствующий нулевой фазе вращения пульсара. Эта фаза вычисляется с помощью обычной полиномиальной зависимости номера пульсара в барицентре от момента барицентрического времени ТВ. Для вычисления координат и скорости наблюдателя используются эфемериды JPL DE 200/LE 200, а для преобразования шкал времени применяется

аналитическая формула связи шкал Земного динамического времени — ТТ и барицентрического времени — ТВ.

Сеансы наблюдения строятся таким образом, что накопление импульсов пульсара ведется несколько часов циклами по 3 мин. Для уменьшения влияния систематических погрешностей, до и после сеанса наблюдения, несколько минут наблюдается опорная площадка. Процесс накопления данных наблюдений контролируется на мониторе управляющего компьютера. Помеховая обстановка в процессе наблюдения фиксируется на самописце контрольного выхода во всей рабочей полосе частот приема.

Суммарный средний профиль импульса получается после сложения данных по всем 40 каналам с учетом дисперсионного запаздывания по каналам. Как правило, эта обработка делается после наблюдения, хотя во время сеанса суммарный контрольный импульс выводится на дисплей в процессе накопления. Момент прихода импульса определяется стандартным путем вписывания шаблона импульса в полученный средний профиль методом кросс-корреляционной функции (ККФ).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Регулярные наблюдения по программе хронометрирования пульсара PSR 1937+21 начались на радиотелескопе ТНА-1500 с 16 апреля 1993 г., когда после юстировочных работ был получен средний профиль импульса этого пульсара за 30 мин накопления сигнала. Наблюдения проводились в дневное время, когда обнаруживались помехи индустриального характера, приводившие к эквивалентному увеличению шумов порядка 30–50 К. Их влияние уменьшалось как за счет синхронного накопления, так и за счет сложения каналов с дисперсионной задержкой. В дальнейшем, как правило, наблюдения проводились вочные или утренние часы. В большинстве этих сеансов помехи не присутствовали. Пример получающихся профилей импульсов PSR 1937+21 по наблюдениям приведен на рис. 3 а (28 апреля 1993 г.). Профиль шаблона для определения момента прихода импульса показан на рис. 3 б. Он получен из 4-х дневной серии наблюдений, длительностью каждого сеанса 4 час. При таком качестве полученных профилей СКО определения момента прихода импульса (МПИ) составляет 400 нс, что сопоставимо с результатами, полученными в [9].

Результаты переборки меры дисперсии  $DM$  при сложении каналов показаны на рис. 4, когда  $DM$  изменялась с шагом  $\Delta DM = 1$  в обе стороны от  $DM = 71,044$ . Очевидно, что максимальный сигнал получается при расчетной мере дисперсии. Дополнительных систематических сдвигов, как в частотных каналах, так и за счет распространения сигналов пульсара, не обнаружено.

Для анализа влияния среды на МПИ был проведен анализ по массиву данных 64 циклов по 3 мин за 28 апреля 1993 г. На рис. 5 приведены сред-

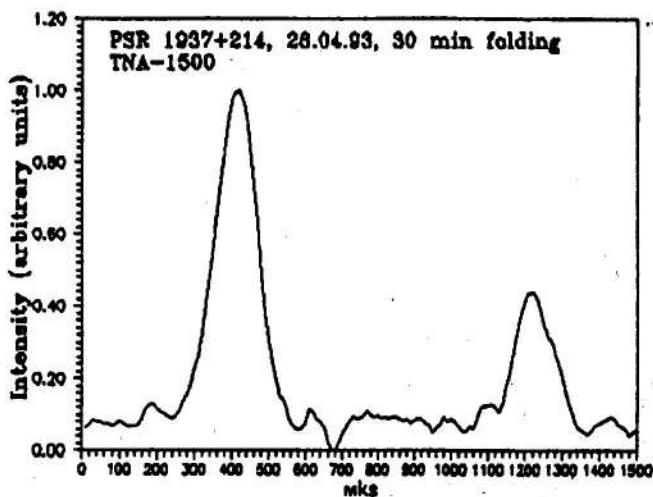


Рис. 3 а. Средний профиль импульсов пульсара PSR 1937+21, накопленный за 30 мин 28.04.93 по наблюдениям на 610 МГц на радиотелескопе ТНА-1500.

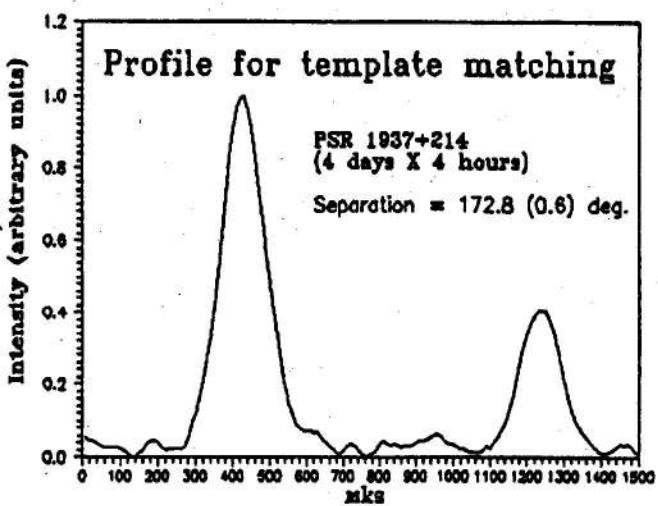


Рис. 3 б. Стандартный профиль (шаблон) импульса PSR 1937+21 (усреднение за 4 дня по 4 часа накопления) на 610 МГц.

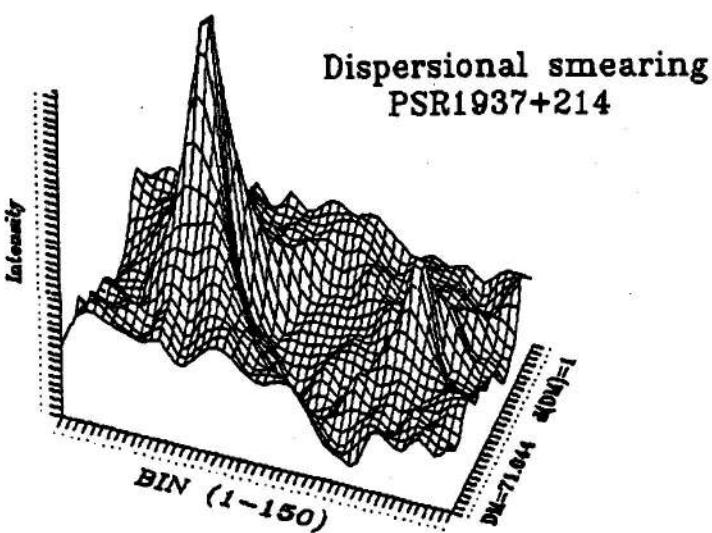


Рис. 4. Профили импульса PSR 1937+21 при вариации меры дисперсии  $DM$  с шагом 1 относительно  $DM_0 = 71,044$ .

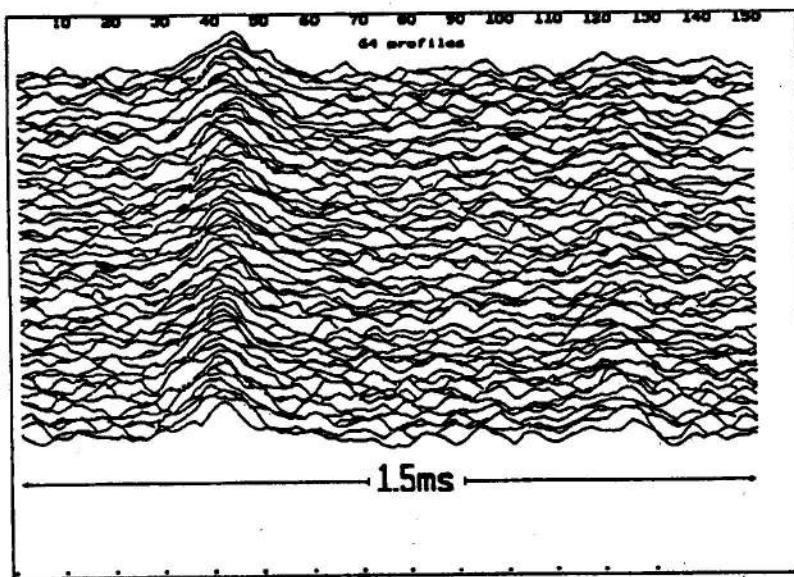


Рис. 5. Средние профили PSR 1937+21 при накоплении в цикле за 3 мин 28.04.93

ние профили импульсов, полученных 28.04.93, в каждом цикле — по 3 мин. При отношении сигнал/шум порядка 10–15, СКО МПИ в каждом цикле было меньше 3 мкс. На рис. 6а, б показано изменение МПИ по 3-х минутным циклам 28.04 и 29.04 по 3-х часовым сеансам наблюдений. Оценка СКО МПИ по этим данным за счет распространения сигналов пульсара PSR 1937+21 в межзвездной среде приводит к значению 150–200 нс. Очевидно, что при двухчастотном приеме появляется возможность определять текущее действующее значение меры дисперсии и вносить коррекции в изменение МПИ, тем самым повысив их точность.

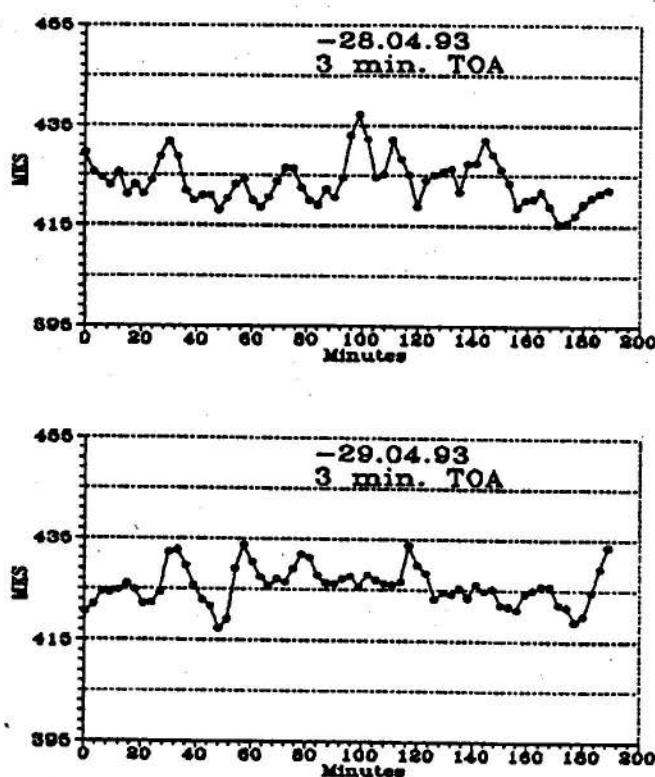


Рис. 6 а, б. Моменты прихода импульсов PSR 1937+21 за цикл 3 мин на 610 МГц:  
а) 28.04.93; б) 29.04.93.

На рис. 7 приведены остаточные уклонации барицентрических МПИ, полученные для PSR 1937+21 с апреля 1993 г. по наблюдениям на ТНА-1500. Эти данные можно считать за начало ведения Пульсарной шкалы времени по миллисекундному пульсару PSR 1937+21. Наблюдения этого пульсара будут продолжаться.

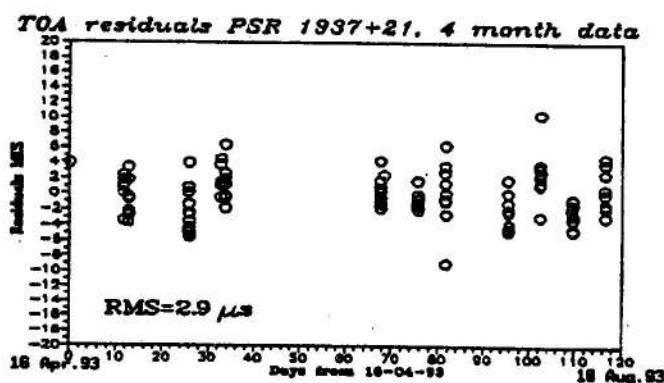


Рис. 7. Остаточные уклоны барицентрических моментов прихода импульсов PSR 1937+21 по наблюдениям на 610 МГц на радиотелескопе ТНА-1500 ОКБ МЭИ.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить признательность К. А. Лапаеву, А. А. Петровскому, А. Г. Серкину, А. С. Сизову за разработку узлов аппаратуры 610 МГц; С. Г. Гусеву, М. А. Долгову, Б. Д. Сапожникову, В. Т. Солодкову за участие в юстировочных работах; В. П. Саурину за большую помощь при проведении наблюдений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин В. Г., Илясов Ю. П., Иванова Ю. Д. и др. Способ создания и хранения временных интервалов. А. с. N 995062 от 8.10.82 с приоритетом 17.09.79. Опубл. 7.02.83. Бюл. N 5.
2. Шабанова Т. В., Ильин В. Г., Илясов Ю. П. и др. Исследование стабильности периодов радиоизлучения пульсаров // Издмер. техника, 1979. N 10. С. 73–74.
3. Backer D. C., Kulkarni S., Heiles C. et al. Millisecond Pulsar // Nature, 1982. V. 300. P. 615–618.
4. Rawley L. A., Taylor J. H., Davis M. M. et al. Millisecond pulsar PSR 1937+21: A Highly Stable Clock // Science, 1987. V. 238. P. 761.
5. П'ун В. Г., Isaev L. K., Pushkin S. B. et al. Pulsar Time Scale-PT // Metrologia, 1986. V. 22. P. 65–67.
6. Guinot B., Petit G. Atomic time and the rotation of pulsars // Astron. Astroph., 1991. V. 248. P. 292–296.
7. Вдовин А. С., Илясов Ю. П., Орешко В. В., Федоров Ю. А. Служба времени для ведения пульсарной шкалы на Радиоастрономической

- станции ФИАН. В кн: Исследования в области измерений времени и частоты. — М.: Госстандарт, 1989. С. 46–58.
8. Илясов Ю. П., Кузьмин А. Д., Шабанова Т. В., Шитов Ю. П. Пульсарная шкала времени. В кн: Пульсары. — М.: Наука, 1989. С. 149–159. (Тр. ФИАН. Т. 199.)
  9. Davis M. M., Taylor J. H., Weisberg J. M. et al. High-precision timing observations of the Millisecond pulsar PSR 1937+21 // Nature, 1985. V. 315. P. 547–550.
  10. Богомолов А. Ф., Поперченко Б. А., Соколов А. Г. и др. Полноповоротный радиотелескоп ТНА-1500 с параболическим рефлектором диаметром 64 м. // Сб. Антенны (под ред. А. А. Пистолькорса), 1982. Вып. 30. С. 3–13.
  11. Kildal H. S., Skyttemyr S. A. Dipol-disk Antenna with Beam-Forming Ring // IEEE Tran. Antennas Propagat., 1982. V. AP-30. P. 529–534.
  12. Дорошенко О. В., Копейкин С. М. Алгоритм высокоточного фазового анализа наблюдений одиночных пульсаров // Астр. журн., 1990. Т. 67. С. 986–997.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
16 сентября 1993 г.

**THE FIRST RESULTS OF MILLISECOND PULSAR 1937+21 TIMING BY  
RADIOTELESCOPE TNA-1500 OF SPECIAL BUREAU OF THE MOSCOW  
POWER ENGINEERING INSTITUTE**

*Yu. I. Belov, Yu. P. Ilyasov, B. A. Poperechenko, V. V. Oreshko,  
O. V. Doroshenko*

Timing observations of the millisecond pulsar 1937+21 are beginning at 610 MHz by means of radiotelescope TNA-1500 with 64-m full steerable antenna at "Medvezhy Ozera" (Bear Lakes) Radio Observatory of the Special Research Bureau of the Moscow Power Engineering Institute not far from Moscow. A 40-channel filter bank receiver at the bandwidth 1.6 MHz and data acquisition system controlled by computer PC AT-286/287 are used now in the timing observations. The total noise temperature is about 160 K. The signal/noise ratio is about 50 for 30 min time integration. RMS of TOA measurement (time of arrival) is 400 ns. The PSR 1937+21 timing data will be used for forming of the Pulsar Timing Scale complementary with the data obtained from timing observations of the reference "normal" pulsars PSR 0834+06 and PSR 1919+21 at the Pushino Radio Observatory of the Lebedev Physical Institute for more than 13-yrs time interval.