

## АППАРАТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ КОРОТКИХ РАДИОВСПЛЕСКОВ НА ТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

Р. Д. Дагкесаманский, А. В. Коваленко, А. А. Сальников

*Для регистрации очень коротких спорадических всплесков радиоизлучения, которые могут возникать, в частности, при взаимодействии космических лучей предельно высоких энергий с Луной, создан и испытан аппаратно-программный комплекс. Он включает в себя двухканальный цифровой приемник и комплект программ для проведения соответствующих наблюдений и обработки данных. Приводится краткое описание системы регистрации, схема первичной обработки и примеры зарегистрированных на базе радиотелескопа БСА ФИАН коротких всплесков.*

**Ключевые слова:** радиотелескоп, метровый диапазон, временное разрешение, дисперсионное запаздывание, компенсация дисперсии, фильтрация помех.

*Введение.* Бурное развитие новых, в первую очередь, IT-технологий обеспечило и стремительный рост возможностей наблюдательной радиоастрономии. Многократно возросла информативность новых инструментов. В десятки, а иногда и в сотню раз увеличилось поле зрения новых и модернизированных радиотелескопов, то же можно сказать и относительно спектрального и временного разрешения современных регистрирующих систем. Быстрый рост информативности радиотелескопов и регистрирующих систем привел к развитию новых направлений в радиоастрономии, в частности, к обнаружению и исследованию чрезвычайно коротких спорадических всплесков радиоизлучения.

Этот прогресс коснулся и одного из высокочувствительных инструментов Пушчинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) АКЦ ФИАН, а именно радиотелескопа метрового диапазона БСА ФИАН. В ходе модернизации этого меридианного ра-

---

ФИАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, 142290 Россия, Пушкино, Московская обл., Радиотелескопная ул., 1А; e-mail: rdd@prao.ru, alx@prao.ru.

диотелескопа в 2010–2013 годах (подробнее см. [1]) была заметно повышена чувствительность радиотелескопа путем замены 256 прежних антенных усилителей на новые с меньшим шум-фактором. Но, главное, в дополнение к прежней 8-лучевой управляемой диаграмме направленности была создана вторая, 128-лучевая стационарная диаграмма, поле зрения которой составляет уже порядка 50 квадратных градусов. Что немало важно, обе системы диаграммообразования работают параллельно и по независимым научным программам. Другими словами, на базе той же антенной решетки создан еще один радиотелескоп. Рассматривается также возможность создания антенных решеток с еще бóльшим полем зрения. К примеру, макет подобной антенной решетки метрового диапазона с полем зрения более 1 стерадиана описан в работе [2].

С целью поиска и исследования всевозможных коротких спорадических всплесков излучения была разработана система регистрации, реализующая максимально возможное временное разрешение ( $\sim 1$  мксек), которое определяется полосой пропускания ( $\sim 2$  МГц) антенно-фидерной системы радиотелескопа БСА ФИАН. К таким спорадическим всплескам относятся и гигантские импульсы пульсаров (см., напр., [3, 4]) амплитуда которых в сотни и тысячи раз превышает среднюю интенсивность импульсов того же пульсара, и так называемые быстрые радиовсплески (fast radio bursts, FRBs, см., напр., [5, 6]), регистрируемые преимущественно в дециметровом диапазоне волн, природа которых пока еще выясняется.

Столь высокое временное разрешение может оказаться очень кстати и для поиска возможных всплесков черенковского излучения от Луны, предсказанных в работах [7–11]. Попытки регистрации этих всплесков радиоизлучения неоднократно предпринимались за последнюю четверть века (см., напр., [12–14]). Большинство таких наблюдений были выполнены в дециметровом диапазоне волн, но все они пока оказались безуспешными. Позже подобные наблюдения с целью поиска всплесков черенковского радиоизлучения от Луны проводились и на более низких частотах (см., напр., [15–17]), но и они пока не привели к успеху. Учитывая, однако, что исходная длительность ожидаемого радиовсплеска в этом случае составляет наносекунды, такие наблюдения нуждаются в максимально возможной полосе приема и соответствующем временном разрешении.

Ниже будет описана система быстрой регистрации сигнала, поступающего с антенны БСА ФИАН, и схема обработки этого сигнала с целью выделения коротких спорадических всплесков радиоизлучения.

*Состав и основные характеристики регистрирующей системы.* Для надежного выделения интересующего нас короткого спорадического сигнала на фоне шумовых флуктуаций и возможных помех следует максимально использовать всю имеющуюся априорную информацию об отыскиваемом сигнале. Эта информация включает в себя характерные признаки сигнала, отличающие его от прочих коротких случайных вариаций регистрируемой мощности. К таким признакам может относиться характерная форма и длительность сигнала, его динамический спектр. Чтобы исключить возможность принятия локальной помехи за интересующий нас сигнал, можно использовать схему антисовпадений, но для этого надо иметь возможность проведения одновременных наблюдений еще хотя бы в одном канале сравнения. В дальнейшем, в качестве примера, мы будем рассматривать, главным образом, конкретную задачу регистрации предполагаемых радиовсплесков черенковского излучения от Луны на фоне шумовых флуктуаций и возможных помех на выходе радиотелескопа БСА ФИАН в рабочем диапазоне частот  $\sim 109\text{--}111$  МГц.

Одним из характерных признаков ожидаемого всплеска черенковского излучения от Луны служит эффект дисперсии, обусловленный прохождением сигнала через плазму. Зависимость величины дисперсионной задержки ( $t_{\text{дисп}}$ ) от частоты ( $f$ ) определяется следующим выражением:

$$t_{\text{дисп}}(f) = kDM/f^2. \quad (1)$$

Здесь  $k$  – постоянная, а  $DM = \int n_e dl$  – мера дисперсии, определяемая числом свободных электронов в столбце с единичной площадью сечения на всем пути следования сигнала от его источника до наблюдателя. В нашем случае величина меры дисперсии практически полностью определяется ионосферой. Для типичной величины меры дисперсии в ионосфере порядка  $1 - 3 \cdot 10^{-4}$  пк/см<sup>3</sup> длительность сигнала, регистрируемого в полосе приема 109–111 МГц, будет составлять примерно 2–3 микросекунды. При этом амплитуда диспергированного (размытого) импульса будет уменьшаться, а длительность увеличиваться до 2 мксек и более. Однако, используя в ходе обработки процедуру компенсации дисперсии, можно восстановить ширину импульса, которую он имел бы в отсутствие эффекта дисперсии сигнала, и при этом уменьшить амплитуду возможных не диспергированных помех или сигналов, характеризующихся иной мерой дисперсии.

Следующим неременным условием, которому должен удовлетворять искомый всплеск черенковского радиоизлучения, состоит в том, что в момент регистрации всплеска Луна должна находиться в пределах главного лепестка диаграммы направ-

ленности радиотелескопа. При ширине главного лепестка  $\sim 50'$  и диаметре Луны  $30'$  это соответствует примерно интервалу времени около 7 минут, а точнее,  $\pm 3.5$  минуты относительно момента прохождения Луны через максимум диаграммы направленности БСА ФИАН.

Далее, с целью дополнительной фильтрации искомого сигнала от возможных локальных импульсных помех, которые могут появиться именно в этот небольшой интервал времени, было решено использовать двухлучевой прием. Для этого регистрация сигнала производится одновременно в двух лучах диаграммы направленности, один из которых направлен на Луну, а второй – на существенно иное склонение. Эта фильтрация осуществляется по принципу антисовпадения, то есть за искомым всплеск черенковского радиоизлучения будет приниматься только такой всплеск, поступающий из луча, направленного на Луну, для которого нет совпадающего по времени всплеска в канале сравнения.

Итак, для выделения всплесков черенковского радиоизлучения от Луны на фоне шумов и возможных помех мы планируем использовать следующие признаки интересующего нас сигнала:

- 1) чрезвычайно короткая продолжительность, которая после компенсации меры дисперсии не должна превышать двух микросекунд;
- 2) сигнал должен исходить от Луны, а значит, регистрироваться, когда Луна находится в пределах главного лепестка диаграммы направленности радиотелескопа;
- 3) сигнал не должен совпадать по времени с заметным всплеском в канале сравнения;
- 4) всплеск должен быть диспергированным и характеризоваться мерой дисперсии, близкой к оценке последней, полученной с использованием данных о текущем состоянии ионосферы для конкретного сеанса наблюдений;
- 5) при этом амплитуда всплеска должна быть настолько большой, чтобы вероятность регистрации всплеска шумового характера такой величины была бы ничтожно мала.

Для фильтрации локальных помех с использованием принципа антисовпадений был создан и размещен на радиотелескопе БСА ФИАН специально разработанный двухканальный цифровой приемник с регистрацией данных на компактную флэш-карту (КФК).

На рис. 1 представлена структурная схема приемника, который создан на базе платы DSP Evaluation Board фирмы Aletra в виде загружаемого в программируемую логическую матрицу (FPGA) проекта. Работа приемника осуществляется под управлением

персонального компьютера (ПК). Установка имеет следующие основные параметры:

* Центральная частота приема	110 МГц
* Полоса приема ( $2\Delta f$ )	1.814 МГц
* Количество каналов регистрации данных	2
* Разрядность отсчетов	8
* Используемая компактная флеш-карта (КФК)	SunDisc Extreme PRO 16GB
* Скорость записи КФК	$3.623 \cdot 10^6$ отсчетов в секунду
* Длительность непрерывной записи на КФК	2000 с
* Файловая система КФК	FAT32

При указанных параметрах приема и среднем значении  $DM_o \sim 2 \cdot 10^{-4}$  пк/см<sup>3</sup> выигрыш в отношении сигнал/шум за счет компенсации дисперсии будет примерно в 4 раза.

Для контроля уровня сигнала и текущего состояния установки обеспечивается выполнение следующих сервисных функций:

1. Мониторинг и индикация на экране ПК графика средней мощности сигнала.
2. Вывод на экран ПК зависимости величины сигнала от времени и его спектра.
3. Индикация параметров наблюдаемого источника и параметров установки.
4. Индикация свободного объема компактной флэш-карты (в секундах).

Рабочий цикл начинается с того, что ПК производит расчет значений параметров и их загрузку в регистры приемника. Запускается съем отсчетов. Происходит настройка оптимального уровня сигнала, после чего установка переходит в режим ожидания сеанса записи данных. Запуск сеанса происходит в одном из двух случаев:

1) По команде оператора. Этот режим используется, в основном, для проверки работоспособности и измерения параметров аппаратуры, отладки программного обеспечения и при решении прочих технических проблем.

2) При наступлении указанного в расписании времени начала наблюдений. Этот режим является основным для мониторинга всплесков черенковского радиоизлучения или записи сигналов контрольных источников (например, пульсаров).

По завершении сеанса записи ПК оформляет сохраненные в КФК данные в виде одного или нескольких файлов, и установка возвращается в режим ожидания. Во всех описываемых ниже экспериментах сеансы наблюдений записывались в файлы, объемом 130 MSPS каждый, что соответствует 18-секундной длительности отрезка записи.

Как следует из рис. 1, приемник состоит из двух идентичных каналов. В состав каждого канала входят усилитель, полосовой фильтр, аналогово-цифровой преобразователь

(ADC) и цифровой фильтр низких частот (ЦФНЧ). Совокупность этих устройств образует даун-конвертор, сдвигающий спектр сигнала в область нулевых частот. В состав каждого из каналов входит также блок нормализации данных, предназначенный для регулировки усиления и для согласования 32-разрядной сетки ЦФНЧ с 8-разрядной сеткой КФК. С выходов блоков нормализации потоки отсчетов поступают на входы данных контроллера КФК. Последний обеспечивает как взаимодействие ПК с КФК в режиме программного обмена, так и режим прямого доступа при записи отсчетов в КФК. Имеющийся в составе приемника имитатор предназначен для контроля работоспособности цифровой части приемника и отладки программного обеспечения.

Файл данных состоит из заголовка (под который отводится 1 кластер) и поля данных, занимающего весь остальной объем. В зависимости от модели КФК заголовки может занимать от 8 кВ до 64 кВ, что необходимо учитывать при обработке. В заголовке указываются основные характеристики источника, значения параметров приемника,

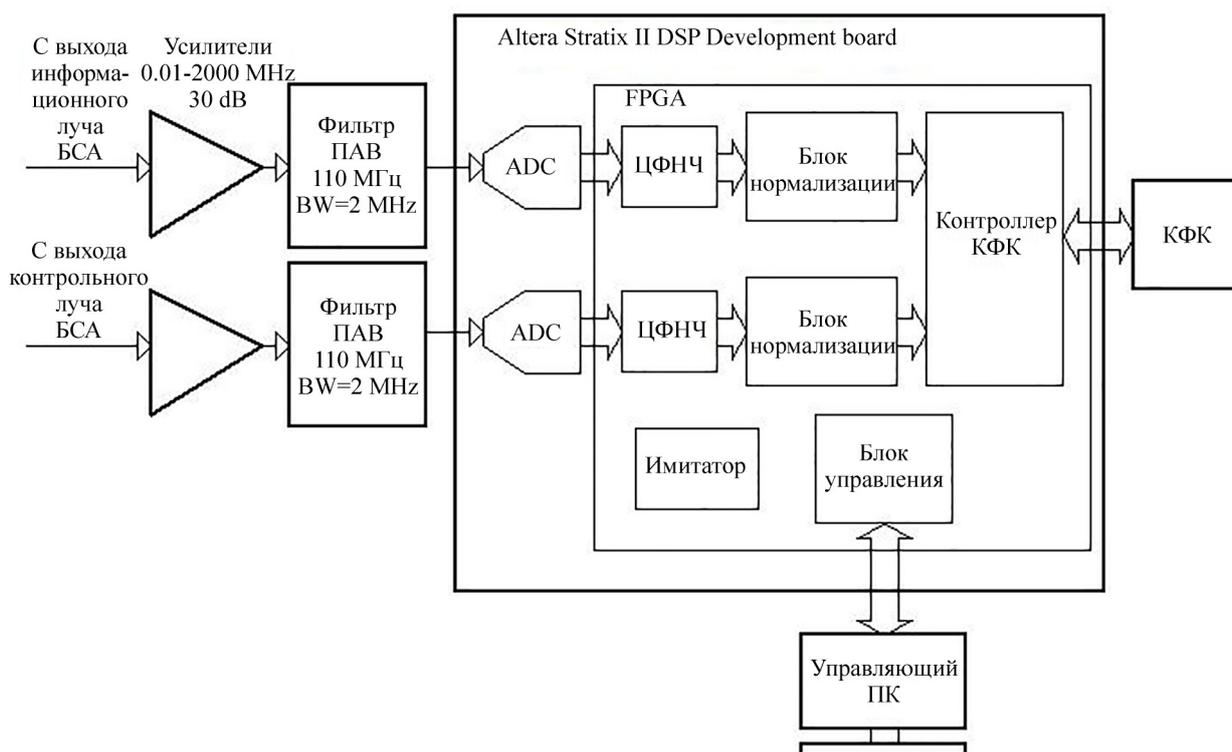


Рис. 1: Структурная схема приемника. Используемые сокращения: ПАВ – фильтр (на поверхностных акустических волнах), вырезающий полосу 2 МГц с центром на 110 МГц; ADC – аналогово-цифровой преобразователь; ЦФНЧ – цифровой фильтр низких частот.

модель и серийный номер КФК. Структура области данных следующая: отсчеты основного канала (№ 1) находятся в четных байтах, а канала сравнения (или контрольного, № 2) – в нечетных.

*Первичная обработка данных.* В задачу программы первичной обработки данных входит восстановление формы сигнала путем компенсации дисперсии, а также вывод результатов на экран и печать. Предусмотрен пакетный режим (если данные оформлены в виде нескольких файлов) и режим со сканированием по мере дисперсии.

Рабочий цикл включает в себя процедуру компенсации меры дисперсии, которая сводится к нахождению фурье-преобразования каждого из 18-секундных отрезков записи принятого сигнала (по 65 миллионов отсчетов в каждом), коррекции фаз спектральных составляющих и обратному преобразованию Фурье. Сама процедура коррекции фаз заключается в расчете фазовых сдвигов спектральных составляющих, для конкретных значений меры дисперсии, и вычитания найденных фазовых сдвигов из фаз соответствующих спектральных составляющих.

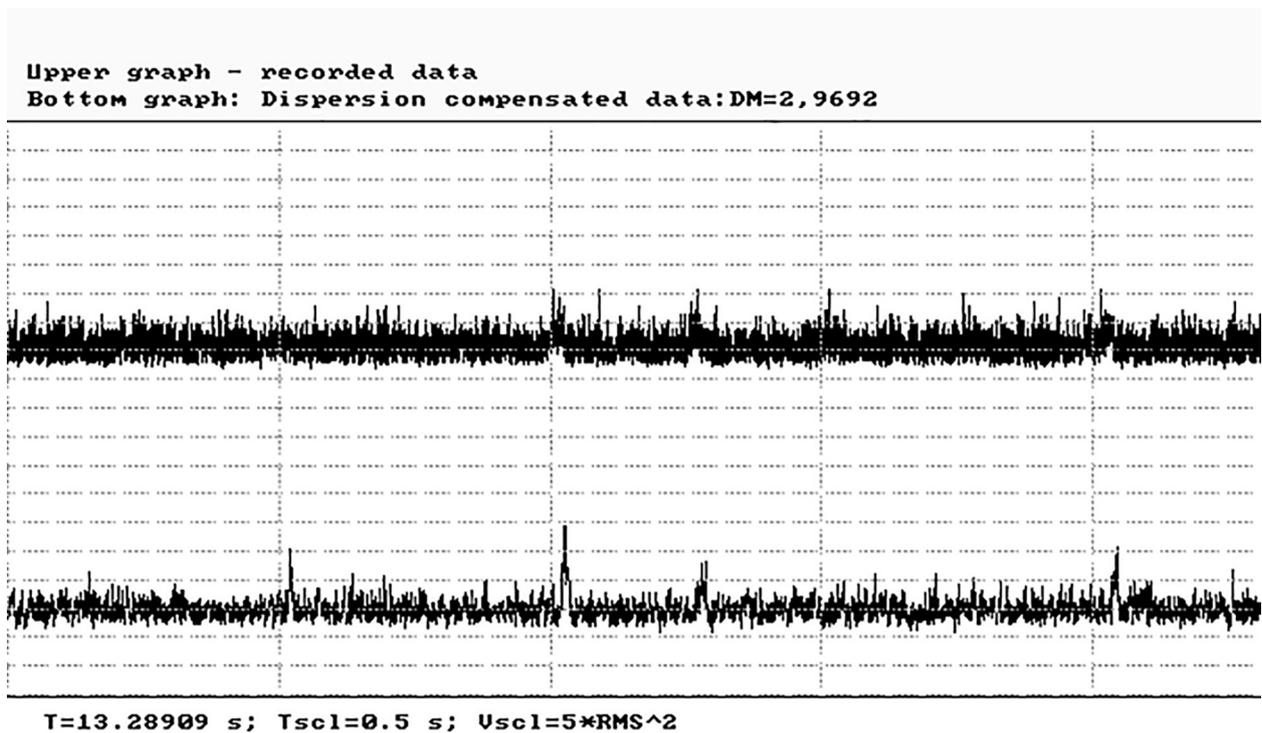


Рис. 2: Фрагмент записи импульсов пульсара B0950 + 08 на интервале в 2.5 секунды с временным разрешением 100 микросекунд. Вверху исходная запись, тогда как внизу – запись после компенсации известной меры дисперсии пульсара  $DM = 2.9692$  нк/см<sup>3</sup>.

Для расчета фазовых сдвигов необходимо либо знать, как меняется со временем мера дисперсии ( $DM$ ) в течение сеанса записи, либо пытаться определить наиболее подходящую ее величину путем сканирования в интервале возможных значений. Так как мы не располагаем оперативной информацией о состоянии ионосферы, в программе обработки был реализован режим сканирования меры дисперсии в интервале ее возможных значений от  $DM = 0.0001$  до  $DM = 0.002$  пк/см<sup>3</sup> с шагом  $0.0001$  пк/см<sup>3</sup> (здесь мы используем общепринятые в астрономической литературе единицы измерения меры дисперсии, а именно, парсек на кубический сантиметр). На каждом шаге в каждой из скорректированных записей фиксировались все отклонения от среднего, превышающие заданное граничное отношение сигнал/шум.

С целью проверки корректной работы регистрирующей аппаратуры и используемых программ обработки была произведена запись известного пульсара B0950+08 с периодом следования импульсов  $0.2531$  секунды. На рис. 2 вверху приведен фрагмент записи регистрируемой мощности, когда пульсар находится в главном лепестке диаграммы направленности антенны. Длительность приведенной записи составляет  $2.5$  секунды, а усреднение по времени –  $100$  микросекунд. Ниже представлена та же запись, но когда возведение регистрируемого напряжения в квадрат и усреднение по времени производится уже после компенсации известной меры дисперсии пульсара, равной  $2.9692$  пк/см<sup>3</sup>. Четыре индивидуальных импульса пульсара, которые можно видеть на верхней записи, значительно увереннее регистрируются после выполнения процедуры компенсации дисперсии. Все это свидетельствует о том, что и система регистрации, и процедура компенсации дисперсии работают исправно. На рис. 3 приведен профиль импульса этого пульсара, усредненный по  $73$  индивидуальным импульсам. Длительность этой записи составляет  $0.25$  сек (то есть примерно один период следования импульсов), а временное разрешение составляет те же  $100$  микросекунд, что и на рис. 2.

К настоящему времени с использованием выше описанной двухлучевой системы регистрации на радиотелескопе БСА ФИАН было выполнено несколько сеансов мониторинга коротких спорадических всплесков радиоизлучения от Луны. Продолжительность каждого сеанса составляла не менее  $\pm 15$  минут около момента верхней кульминации Луны. При этом, в качестве основного луча выбирался луч, склонение которого было наиболее близко к склонению центра лунного диска на момент наблюдений, в то время как луч сравнения находился, как минимум, на  $10$  градусов ниже по склонению. На рис. 4 представлен отрезок записи с одним из зарегистрированных микросекундных

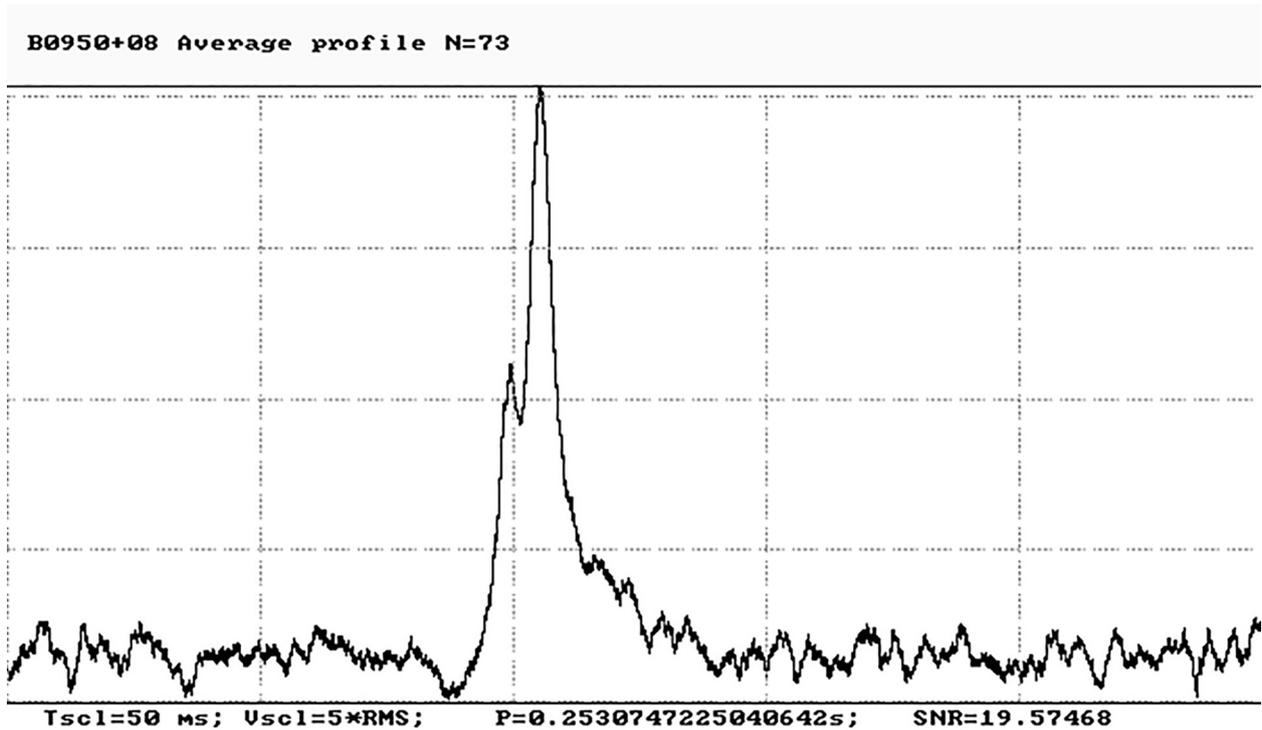


Рис. 3: Усредненный примерно за 73 периода профиль импульса пульсара B0955 + 08. Интервал между вертикальными штрихованными прямыми равен 50 миллисекундам.

всплесков. В момент регистрации этого всплеска большая часть Луны находилась в пределах главного луча диаграммы направленности телескопа БСА ФИАН.

Протяженность представленного на этом рисунке отрезка записи составляет 37 микросекунд. Вверху представлена исходная запись регистрируемого напряжения, тогда как ниже представлена запись этого же напряжения на выходе приемника после компенсации меры дисперсии величиной  $DM = 0.00074$  пк/см<sup>3</sup>. Что касается канала сравнения, то ни исходная запись мощности в этом канале, ни эта запись мощности после компенсации указанной меры дисперсии не обнаруживают сколь-нибудь заметного всплеска. Заметим, что приведенное на рисунке отношение сигнал/шум ( $SNR \sim 5.8$ ) определяется как отношение амплитуды всплеска напряжения к среднеквадратичным флуктуациям напряжения на выходе приемника. Тем не менее, несмотря на, казалось бы, столь значительную амплитуду этого всплеска, и на то, что измеренная мера дисперсии не сильно отличается от типичной величины меры дисперсии в ионосфере, делать вывод о том, что это искомый всплеск черенковского излучения от Луны, пока рано. Дело в том, что наш опыт показывает, что всплески с таким и с близкими зна-

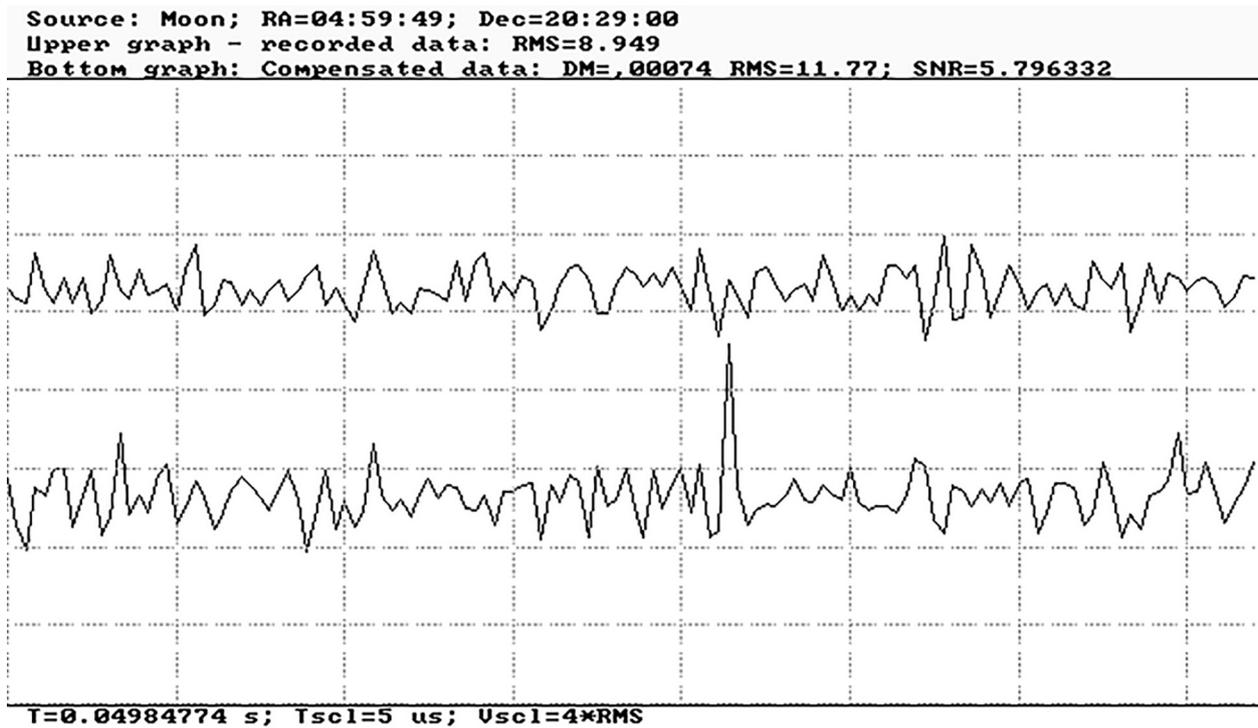


Рис. 4: Запись одного из зарегистрированных всплесков. Вверху – отрезок (37 мксек) исходной записи, внизу – та же запись после компенсации дисперсии  $DM = 0.00074$  нк/см<sup>3</sup>.

чениями отношения сигнал/шум время от времени регистрируются, не только когда Луна находится в главном лепестке диаграммы направленности радиотелескопа БСА ФИАН, а значит нельзя исключить, что и этот всплеск имеет шумовую природу или представляет собой помеху. Для корректного вывода нам следует проанализировать сотни подобных событий и только после тщательного статистического анализа делать вывод о природе подобных обнаруживаемых всплесков. Мы надеемся, что результаты подобного анализа составят содержание следующей нашей публикации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. В. Орешко, Г. А. Латышев, И. А. Алексеев и др., Труды Института прикладной астрономии РАН **24**, 80 (2012).
- [2] Р. Д. Дагкесаманский, А. В. Веселовский, И. М. Железных и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(3), 3 (2020).

- [3] В. М. Конторович, *Вопросы атомной науки и техники*, Серия: Коллективные процессы в космической плазме, № 4, 143 (2010).
- [4] A. N. Kazantsev, V. A. Potapov, *Res. Astron. Astrophys.* **18**(8), 97 (2018). DOI: 10.1088/1674-4527/18/8/97.
- [5] D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, et al., *Science* **8**, 777 (2007). DOI: 10.1126/science.1147532.
- [6] E. F. Keane, B. W. Stappers, M. Kramer, A. G. Lyne, *Mon. Not. of the RAS* **425**, L71 (2012). DOI: 10.1111/j.1745-3933.2012.01306.
- [7] Г. А. Аскарьян, *ЖЭТФ* **41**, 616 (1961).
- [8] Г. А. Аскарьян, *ЖЭТФ* **48**, 988 (1965).
- [9] A. F. Bogomolov et al., *Proc. Symp. Undergr. Phys., Vaxan Valley* (M., Nauka, 1987), p. 237.
- [10] Р. Д. Дагкесаманский, И. М. Железных, *Письма в ЖЭТФ* **50**(5), 233 (1989).
- [11] R. D. Dagkesamanskii, I. M. Zheleznykh, *Radioastronomical Method of the Neutrino and Hadron Detection: in ICRR Intern. Symp. "Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays"*, Kofu, Japan, eds. M. Nagano, F. Takahara, World Sci. Publ. Co., pp. 373-381 (1991).
- [12] T. H. Jenkins, R. D. Ekers, J. D. O'Sullivan, *Monthly Notices of the Royal Astr. Soc.* **283**, 1027 (1996).
- [13] D. Saltzberg, P. W. Gorham, D. Walz, et al., *Phys. Rev. Lett.* **86**, 2802 (2001).
- [14] А. Р. Березняк, Р. Д. Дагкесаманский, И. М. Железных и др., *Астрон. журн.* **82**, 149 (2005).
- [15] S. Buitink, O. Scholten, J. Bacelar, et al., *Astronomy & Astrophysics* **521**, A47-59 (2010).
- [16] J. D. Bray, R. D. Ekers, P. Roberts, et al., *Nuclear Instruments and Methods A* **662**, 95 (2012).
- [17] K. Singh, M. Meviusa, O. Scholten, et al., *Nuclear Instruments and Methods A* **664**, 171 (2012).

Поступила в редакцию 30 ноября 2021 г.

После доработки 9 января 2022 г.

Принята к публикации 10 января 2022 г.