

Регистрация радиоизлучения в спектральных линиях на основе многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов

© С. А. Гренков, И. А. Рахимов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Начиная с 2006 г. в обсерватории «Светлое» проводятся наблюдения радиоизлучений в спектральных линиях гидроксила и воды. При этом для регистрации спектров сигналов использовались макетные образцы различной аппаратуры, в том числе основанной на методе калибровки спектров, разработанном в ИПА РАН специально для цифровых спектрометров. В настоящее время все радиотелескопы комплекса «Квazar-КВО» оснащаются новыми многофункциональными цифровыми системами преобразования сигналов (МСПС). На радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» уже установлена МСПС, которая обеспечивает цифровую обработку сигналов промежуточных частот радиотелескопа в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). МСПС может заменить любую систему, отвечающую за преобразование сигналов на радиотелескопе, и за счёт загрузки специализированных прошивок ПЛИС обеспечивает регистрацию сигналов не только при РСДБ-, но также при радиометрических и спектральных наблюдениях. Для спектрометрических наблюдений разработаны прошивки ПЛИС с разными полосомами регистрации для обеспечения наблюдений мазерных радиоизлучений гидроксила (18 см) и воды (1.35 см).

В статье дано описание принципа действия спектрометрических модулей на основе каналов многофункциональной системы, а также разработанного алгоритма и структуры конфигурации ПЛИС. Каждый такой модуль обеспечивает цифровую обработку сигналов с тактовой частотой дискретизации до 4096 МГц в полосе приема до 2 ГГц и позволяет с использованием разработанных прошивок ПЛИС выделять 32768 спектральных компонент с частотным разрешением до ≈ 61.035 Гц. В программном обеспечении (ПО) и прошивке модуля реализованы цифровая регистрация и измерение мощности радиометрических сигналов, анализ спектров сигналов, а также обнаружение, анализ и исключение помех из спектра сигнала. Многофункциональная система с разработанными прошивками ПЛИС и ПО были испытаны в обсерватории «Светлое» на радиотелескопе РТ-32. Для этого были проведены специальные спектрометрические наблюдения с параллельным использованием МСПС и штатного спектрометра на базе каналов системы преобразования сигналов P1002M, основные результаты которых приводятся в статье. Испытания показали эффективность применения новой многофункциональной системы преобразования сигналов для спектрометрической регистрации радиоастрономических сигналов.

Разработанные прошивки ПЛИС для каналов многофункциональной системы будут использованы в опытных образцах, вводимых в эксплуатацию на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО».

Ключевые слова: радиотелескоп, система преобразования сигналов, цифровая обработка сигналов, спектрометрическая регистрация сигналов.

Контакты для связи: Гренков Сергей Александрович (grenkov@iaaras.ru).

Для цитирования: Гренков С. А., Рахимов И. А., Федотов Л. В. Регистрация радиоизлучения в спектральных линиях на основе многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 11–17.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.11-17>

Registration of Narrowband Cosmic Radio Emissions with Multifunctional Digital Backend System

S. A. Grenkov, I. A. Rahimov, L. V. Fedotov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Since 2006 the observations of radio emissions in the spectral lines of hydroxyl and water masers have been carried out at the “Svetloe” observatory. In order to record the spectra of signal at “Svetloe” the prototype samples of various equipment were used. The samples of equipment that used at “Svetloe” based on the spectrum calibration method that developed at the IAA RAS specifically for digital spectrometers. At present day all radio telescopes of “Quasar” VLBI network are equipped with new multifunctional digital backend systems (MDBE). On the RT-32 radio telescope in obs. “Svetloe” the MDBE has already installed. The MDBE provides digital processing of signals with intermediate frequencies from the radio telescope by field-programmable logic integrated circuits (FPGA). MDBE can replace any system responsible for converting signals on a radio telescope by used specialized FPGA firmware that provides signal condition not only for VLBI, but also for radiometric and spectral observations. For spectrometric observations the FPGA firmware

with different bands has been developed to provide observations of hydroxyl (18 cm) and water (1.35 cm) maser radio emissions.

The article describes the principle of operation of spectrometric modules based on the channels of a multifunctional system, as well as the developed algorithm and FPGA configuration structure. Each such module provides digital signal processing with a sampling rate of up to 4096 MHz in a reception band of up to 2 GHz and allows using the developed FPGA firmware to get 32768 spectral components with a frequency resolution of up to ≈ 61.035 Hz. The software and firmware of the module implement digital registration and measurement of the power of radiometric signals, analysis of signal spectra, as well as detection, analysis and elimination of interference within the signal spectrum. The multifunctional system with the developed FPGA firmware and software was tested at the “Svetloe” observatory on the RT-32 radio telescope. For this the special spectrometric observations were carried out using a spectrometer based on channels of R1002M and the main results of which are presented in the article. Tests have shown the possibility of using a new MDBE for spectrometric registration of radio astronomy signals.

The developed FPGA firmware for the channels of the MDBE will be used in prototypes that put into operation on the radio telescopes of “Quasar” VLBI network. The main parameters of the spectrometric module and the results of test observations with its use at the Svetloe observatory are presented.

Keywords: radio telescope, data acquisition system, digital signal processing, spectrometric signal recording.

Contacts: Sergey A. Grenkov (grenkov@iaaras.ru).

For citation: Grenkov S. A., Rahimov I. A., Fedotov L. V. Registration of narrowband cosmic radio emissions with Multifunctional Digital Backend system // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 66. P. 11–17. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.11-17>

Введение

С 2006 г. в обсерватории «Светлое» проводятся наблюдения радиоизлучений в спектральных линиях гидроксила и воды с использованием для регистрации сигналов макетных образцов различной аппаратуры, в том числе спектрометрических модулей, основанных на методе калибровки спектров, предложенном в ИПА РАН и описанном ранее (Гренков и др., 2008). Сначала использовался БПФ-спектрометр на базе NI-5620 (Гренков и др., 2006), с 2008 г. — введённые в эксплуатацию двуканальные спектрометрические системы на ПЛИС (Гренков, 2007, Гренков и др., 2016), а с 2023 г. — спектрометрическая система на МСПС. В настоящее время на радиотелескопе РТ-32 установлена многофункциональная цифровая система преобразования сигналов (МСПС), которая обеспечивает цифровую обработку сигналов промежуточных частот радиотелескопа в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) (Маршалов и др., 2021). Поэтому появилась возможность за счет загрузки предварительно подготовленной конфигурации ПЛИС использовать МСПС не только для РСДБ- и радиометрических наблюдений, но и для наблюдений в спектральных линиях. Использование МСПС в составе спектрально-селективного радиометра с полосой до 2 ГГц подробно рассмотрено в статье (Гренков, Федотов, 2022). Для спектрометрических наблюдений разработаны специальные прошивки ПЛИС с разными полосами регистрации для обеспечения наблюдений мазерных радиоизлучений гидроксила (18 см) и воды (1.35 см). В режиме спектрометрического модуля МСПС обеспечивает регистрацию радиоизлучения в спектральных линиях с разрешающей способностью от 61 Гц до 976 Гц при полосах анализа от 2 МГц до 32 МГц. Ориги-

нальный способ амплитудной калибровки спектра по импульсам генератора шума позволяет вдвое уменьшить необходимое время приёма радиоизлучения и повысить точность измерений амплитуд (Пат. Кольцов, 2008). В данной работе приводятся алгоритм и структура конфигурации ПЛИС для модуля регистрации сигналов в спектральных линиях на основе МСПС. Приведены основные параметры такого модуля и результаты тестовых наблюдений с его использованием в обсерватории «Светлое».

Структура и алгоритм прошивки ПЛИС для спектрометра

Спектры радиоизлучений в спектральных линиях достаточно узкие (не более нескольких мегагерц в диапазоне сантиметровых волн) и могут иметь сложный профиль, определяемый структурой и движением составных частей наблюдаемого космического объекта. Целями регистрации радиоизлучения в спектральных линиях являются высокоточные измерения частот F_i в характерных точках (в пиках) вычисленного спектра мощности $P(F_i)$. По амплитудам p_i компонент вычисленного спектра оцениваются интенсивности их излучения. Спектр мощности $P(F_i)$ пересчитывается в спектр шумовых температур $T_S(f_i)$ принимаемого радиосигнала с частотами f_i и в спектральную плотность мощности принимаемого антенной потока радиоизлучения $S(f_i)$. На радиотелескопах РТ-32 космическое радиоизлучение в спектральных линиях традиционно регистрируют в относительно узкой полосе частот ($\Delta F \leq 32$ МГц), которую выделяют из аналогового широкополосного сигнала промежуточной частоты видеоконверторами (Пат. Кольцов и др., 2007). Поскольку в МСПС оцифровывается сигнал во всей полосе промежуточных частот

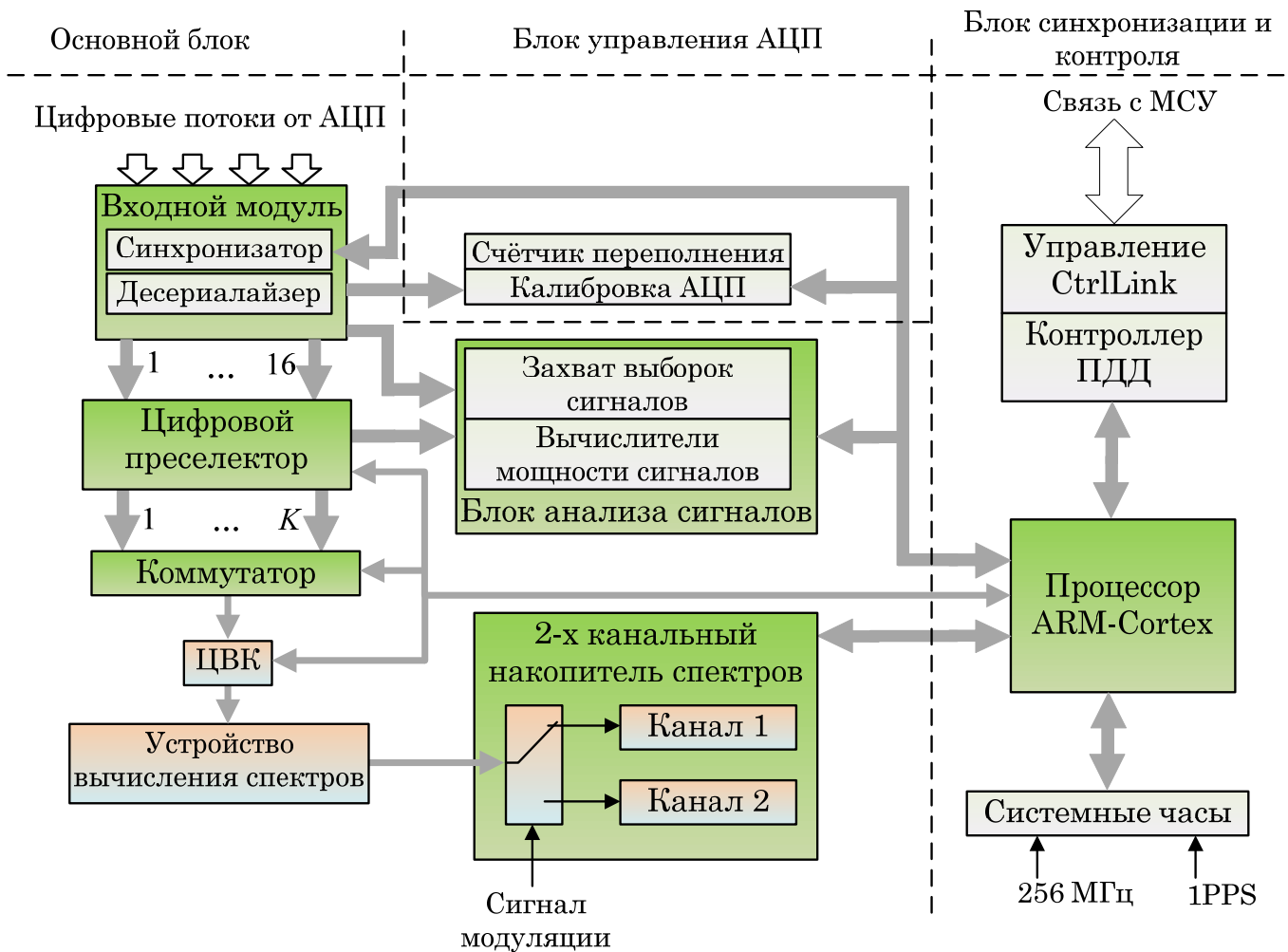


Рис. 1. Функциональная схема ЦПС МСПС в режиме спектрометрического модуля

радиоприемного устройства, для регистрации излучений в спектральных линиях были применены цифровой преселектор (банк цифровых фильтров), разделяющий сигнал с широкой полосой B_0 на несколько поддиапазонов, и цифровой видеоконвертор (Кольцов, Гренков, 2017) с полосой ΔF . Чтобы уменьшить вдвое (по сравнению с применявшейся ранее аппаратурой) время приёма сигнала без ущерба для точности измерений был применён способ амплитудной калибровки спектра по шумовым импульсам генератора шума калибровки (Пат. Кольцов, 2008).

Разработано 3 варианта прошивки ПЛИС модуля цифрового преобразования сигналов (ЦПС) МСПС для обеспечения регистрации космических узкополосных радиоизлучений: 32 МГц, 16 МГц и 2 МГц. Каждая из трёх прошивок обеспечивает работу любого из 8 каналов МСПС в режиме спектрометрического модуля при спектральных наблюдениях. Функционально прошивка включает в себя три блока: основной блок, блок управления АЦП, блок контроля и синхронизации (рис. 1).

В основном блоке входной демультиплексированный сигнал с полосой B_0 разделяется преселектором, представляющим из себя банк полифазных фильтров (ПФ), на $K = 16$ частично перекрывающихся частотных каналов с полосами $B_1 = B_0/K$ с понижением тактовой частоты до $F_T = F_d/K$. Из выбранного полосового сигнала цифровой видеоконвертор выделяет регистрируемый сигнал с полосой ΔF . Устройство вычисления спектров (УВС), работающее с тактовой частотой $F_{T1} = 2 \Delta F$, методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычисляет мгновенные спектры мощности выделенного сигнала с разрешающей способностью $\nu = \Delta F/M$, где M — число спектральных компонент в полосе ΔF . Полоса анализа ΔF устанавливается не менее чем в два раза шире спектра исследуемого сигнала, чтобы можно было вычислять мощности собственных шумов радиотелескопа в части полосы ΔF , свободной от принимаемого сигнала в соответствии с методом калибровки (Кольцов, 2008). Синхронно с циклами вычисления мгновенных спектров формируется меандр

модулирующей частоты $F_{\text{мод}}$, но здесь, в отличие от радиометрического режима работы (Гренков, Федотов, 2022), модулируется не генератор шума компенсации, а генератор шума калибровки, от которого на вход радиоприемного устройства поступают импульсы с небольшой шумовой температурой ($T_k \sim 1$ К) для амплитудной калибровки спектральных компонент. Мгновенные спектры, вычисленные на разных полупериодах модуляции генератора шума калибровки в течение времени накопления t_n , раздельно суммируются и затем передаются в компьютер радиотелескопа. В результате усреднения спектров слабые сигналы источника радиоизлучения на дискретных частотах выделяются в виде пиков на фоне гладкого спектра широкополосного шума.

Особенности спектрометра на основе МСПС и его параметры

Высокоскоростной БПФ-вычислитель спектров в модуле УВС обладает предельно высоким быстродействием, реализуя алгоритм и метод, представленный в (Гренков и др., 2008).

В УВС принято $M = 2^{15}$. Период вычисления мгновенных спектров в УВС $\theta = 2M/F_{\text{тс}} = M/\Delta F$. Разработанные прошивки предусматривают установку полос анализа $\Delta F = 32, 16$ или 2 МГц, которым соответствуют интервалы частотного разрешения $\nu = 976.56, 488.28$ и 61.04 Гц. Такое разрешение по частоте является избыточным для регистрации радиоизлучений космических мазеров и используется для чистки спектров от радиопомех (об этом в разделе ниже).

Частота модуляции генератора шума калибровки выбирается исходя из соотношения $F_{m_1} = 1/m_1 \theta_{\text{max}}$, где θ_{max} — период вычисления спектров (например, при полосе анализа $\Delta F = 2$ МГц $\theta_{\text{max}} = 16.384$ мс), m_1 — число спектров мощности, вычисляемых в течение одного периода модуляции. Для прошивок с полосами $32, 16$ и 2 МГц частоты модуляции F_{m_1} могут быть 488.28125 Гц, 244.140625 Гц и 30.517578125 Гц при $m_1 = 2$ соответственно.

Спектрометрический модуль на базе ЦПС МСПС обладает следующими основными параметрами, представленными в таблице.

Максимальное время накопления спектра ограничено интервалом времени 60 с в виду проявления нестационарных факторов, воздействующих на приемную систему радиотелескопа (влияние помех, атмосферно-климатические воздействия и др.), и отсутствием первичной компенсации эффекта Доплера (компенсация выполняется во время постобработки по усредненным спектрам в программе регистрации данных на компьютере).

Таблица

Основные параметры спектрометрического модуля на базе ЦПС

Параметр	Значение
Диапазон частот, МГц	$\sim 0.01^* - 2000$
Динамический диапазон (не менее), дБ	60
Полоса регистрации, МГц	2–32
Число дискретных частот N	32768
Интервал частотного разрешения, кГц	61.03515625–976.5625
Время накопления в ЦПС, с	0.5–60**

Примечания

* нижняя граница полосы регистрации определяется полосой пропускания видеоконвертора;

** время накопления в ЦПС определяет и время обновления данных в устройстве регистрации

Спектральные наблюдения в условиях воздействия радиопомех

Радиопомехи существенно искажают результаты радиоастрономических наблюдений. К настоящему времени большие участки спектра сигнала при наблюдениях в диапазоне L по отдельным направлениям поражены помехами, которые смешиваясь с сигналом на частотах регистрируемых спектральных линий, сильно усложняют измерение интенсивности радиоизлучения мазеров. Типовая ситуация при регистрации спектров в диапазоне L показана на рис. 2 для источника W3(OH) на частоте 1612.231 МГц. Несмотря на наличие помех точное измерение интенсивности отдельных компонентов возможно в большинстве случаев за счёт того, что интервал частотного разрешения в несколько раз меньше ширины спектра принимаемых компонентов сигнала источника космического мазерного радиоизлучения и радиопомехи можно исключить из рассмотрения, заменив пораженный участок спектра интерполированным значением (Fridman, Baan, 2001). Это возможно для тех случаев, когда помехи не сильно изменяются по частоте на интервале накопления, их не слишком много и они не достаточно интенсивны, чтобы перегрузить приемно-усилительные тракты радиотелескопа.

Такой способ эффективен в отношении помех от гетеродинов, комбинационных помех от радио и телевизионных станций. Чем меньше интервал частотного разрешения, тем проще будет выделить и исключить радиопомеху. С другой стороны, сильное улучшение частотного разрешения увеличивает время набора $2N$ отсчетов для вычисления мгновенного спектра, а также снижает чувствительность элементарных спектральных каналов,

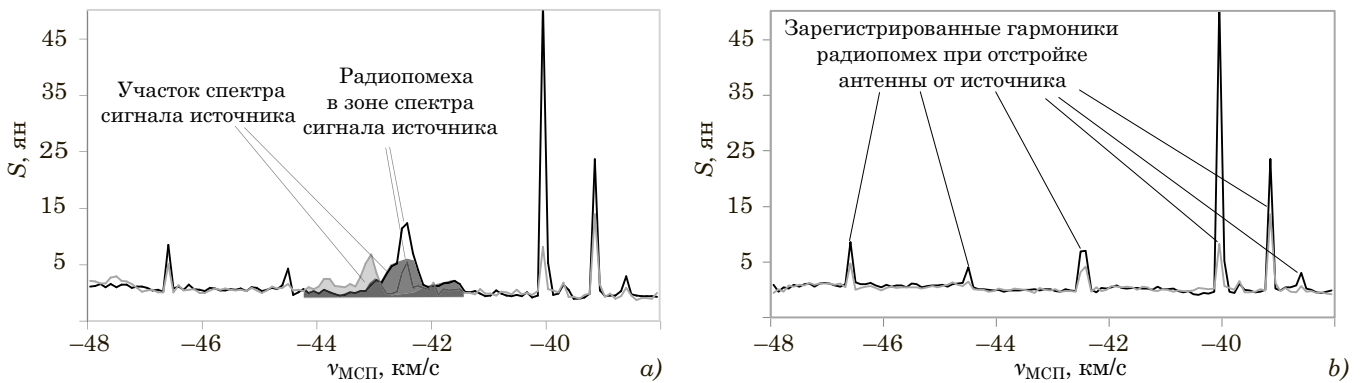


Рис. 2. Пример регистрация спектра W3(OH) на частоте 1612.231 МГц в условиях воздействия радиопомех. Черная сплошная линия — правая круговая поляризация (RCP), серая сплошная линия — левая круговая поляризация (LCP); *a*) регистрация в сопровождении источника; *b*) сопровождение в отстройке от источника

при этом не давая особых преимуществ в исключении помехи. Напротив, если частота помехи меняется и интервал частотного разрешения большой, то возникает эффект «размывания» спектра помехи, что затрудняет её обнаружение и идентификацию как помехи. Многолетний опыт регистрации спектров космического мазерного излучения в условиях воздействия помех позволил подобрать оптимальное увеличение числа точек спектра: в 8 раз. Таким образом, надежный способ «чистки» от относительно стабильных радиопомех (радиопомехи, частоты которых на интервале накопления внутри ЦПС не превышает 1–8 спектральных каналов) заключается в следующих шагах:

1. Накопление и регистрация спектров источника сигнала с улучшенным по отношению к требуемому для данного источника интервалом частотного разрешения.
2. Накопление и регистрация спектров при небольшой отстройке (не менее ширины диаграммы направленности антенны) от направления на источник сигнала.
3. Обнаружение радиопомех на спектрах, зарегистрированных при сопровождении источника, с использованием вспомогательной информации

из спектров при отстройке от направления на источник.

4. Замена участков спектра, искаженных радиопомехами, интерполированными значениями.

5. Суммирование элементарных участков спектра для получения требуемого (искомого) интервала частотного разрешения.

В качестве примера приведены иллюстрации обработки спектров источника W3(OH) на частоте 1612.231 МГц по алгоритму, приведенному выше. Шаги 1, 2, 3 — рис. 3. Шаги 4 и 5 — рис. 4.

При регистрации сигнала источника W3(OH) на частоте 1612.231 МГц на рис. 3 использовался интервал частотного разрешения в 8 раз больше (61.035 Гц или ~ 0.011 км/с), чем при регистрации на рис. 2 (488.28 Гц или ~ 0.09 км/с). Использование улучшенного интервала частотного разрешения, несмотря на увеличение СКО фонового шума, при достаточном накоплении позволяет легче определить радиопомехи и исключить их без сильного искажения более широкого спектра сигнала (рис. 4*a*). После интегрирования смежных частот получается искомый спектр сигнала с требуемым интервалом частотного разрешения и практически без потерь чувствительности (рис. 4*b*).

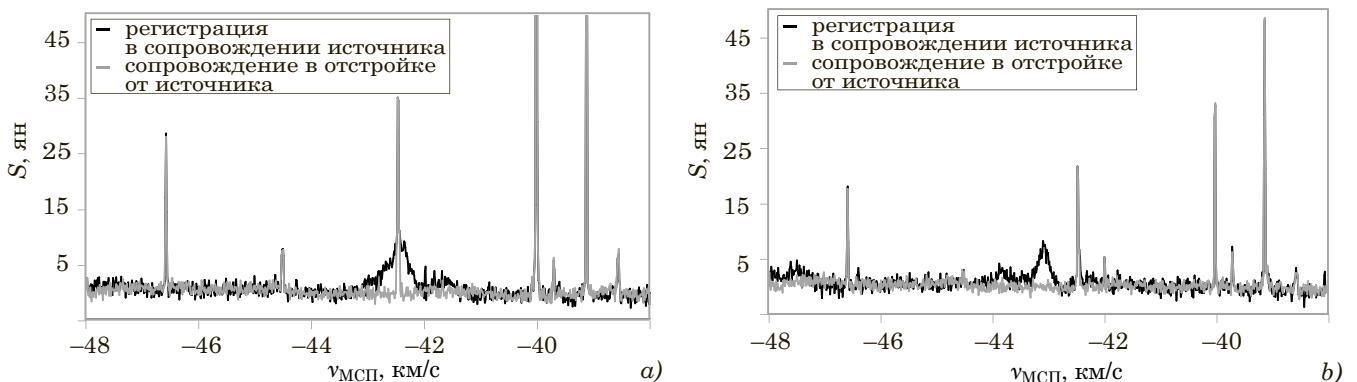


Рис. 3. Пример регистрация спектра W3(OH) на частоте 1612.231 МГц в условиях воздействия радиопомех с улучшенным в 8 раз интервалом частотного разрешения: *a*) RCP; *b*) LCP

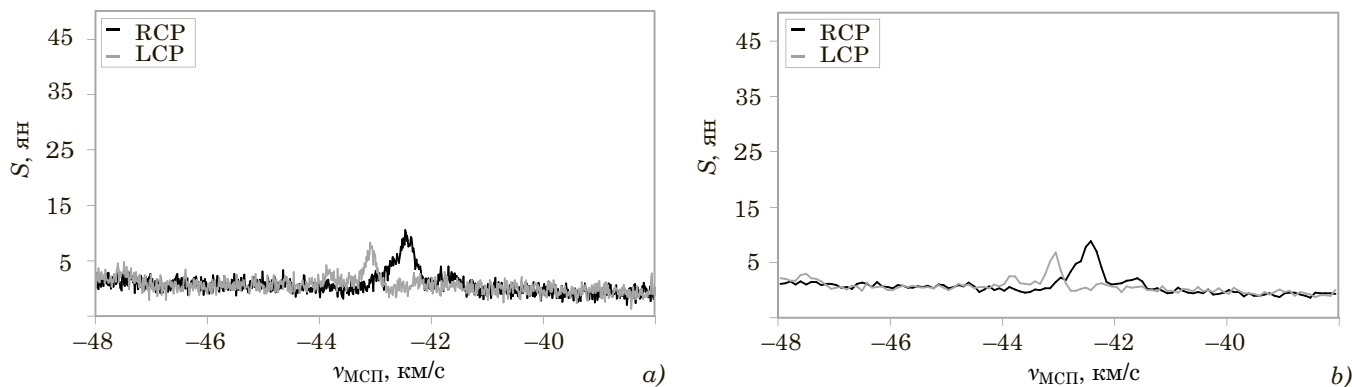


Рис. 4. Пример регистрация спектра W3(OH) на частоте 1612.231 МГц в условиях воздействия радиопомех с улучшенным в 8 раз интервалом частотного разрешения после очистки выявленных и обнаруженных помех — а) и пере-счёт к разрешению 488 Гц — б)

Использование спектрометра на базе МСПС при наблюдениях источников космического радиоизлучения в спектральных линиях

На радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» проводятся регулярные наблюдения источников космического радиоизлучения в спектральных линиях. Большая часть наблюдений проводятся в РАО «Светлое», некоторые из них — в РАО «Бадарь». В основном наблюдаются источники радиоизлучения в диапазоне волн 18 см и 1.35 см по программе Ru-OH. Наблюдения в рамках этой программы посвящены как изучению переменностей на длительном интервале времени (месяцы, годы), так и выявлению быстрых переменностей на интервалах порядка нескольких минут.

Для подтверждения функциональности разработанных прошивок МСПС в спектрометрическом режиме было проведено наблюдение ряда известных источников радиоизлучения в спектральных линиях, измерение потока электромагнитного излучения в пиках деталей профиля и сравнение полученных результатов с результатами, зарегистрированными с помощью использовавшейся ранее системы (Гренков и др., 2016). Профиль многократно наблюдавшегося источника W3(OH) с частотой излучения гидроксила $f_0 = 1665.402$ МГц хорошо подходит для проверки общей работоспособности прошивки для диапазона 18 см. У W3(OH) отмечена относительная стабильность формы профиля, в котором выделяются 9 хорошо различимых деталей (Sullivan et al., 1976), отличающихся лучевыми скоростями и интенсивностью потоков S . Правая и левая круговые поляризации мазерного излучения W3(OH) на частоте 1665.402 МГц сильно отличаются, отдельные компоненты его профиля поляризованы до 100 %. Относительная разность уровней наиболее стабильных деталей источника W3(OH), последовательно зарегистрированных с помощью МСПС и использовавшейся ранее системы, для худшего случая составила величину не более 5 %.

Заключение

Технические решения, принятые при разработке спектрометрических режимов работы МСПС, были проверены при испытаниях на радиотелескопах РТ-32 и подтвердили возможности проведения астрофизических исследований с их использованием. МСПС и её программное обеспечение позволяют получать результаты наблюдений мазерного излучения с высоким частотным разрешением с возможностью исключать пораженные помехами участки спектра. Спектрометрические режимы расширяют основной функционал цифровой многофункциональной системы преобразования сигналов, которая разработана с целью переоснащения радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 комплекса «Квазар-КВО», а также для использования на малогабаритных радиотелескопах (Маршалов и др., 2017).

Литература

- Госачинский И. В., Желенков С. Р. Цифровой автокорреляционный анализатор спектра // Предпринт САО РАН. 1993. № 96. 21 с.
- Гренков С. А. Спектрометр для регистрации узкополосного космического радиоизлучения на базе программируемых логических интегральных схем // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 17. С. 229–235.
- Гренков С. А., Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. Способ регистрации космического радиоизлучения в спектральных линиях // Известия ВУЗ'ов. Радиофизика. 2008. Том LI, № 9. С. 777–788.
- Гренков С. А., Федотов Л. В. Спектрально-селективная регистрация радиометрических сигналов с помощью многофункциональной системы // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 62. С. 3–9.
- Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Ильин Г. Н., Рахимов И. А., Федотов Л. В. Регистрация космических радиоизлучений в спектральных линиях с использованием цифрового анализатора спектра NI-5620 // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 14. С. 43–59.
- Гренков С. А., Федотов Л. В., Носов Е. В. Расширение функциональных возможностей системы преобразования сигналов P1002M для регистрации спектров кос-

мических радиоизлучений // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 39. С. 30–40.

Кольцов Н. Е., Гренков С. А. Цифровые видеоконвертеры для радиоастрономических систем преобразования сигналов // Известия ВУЗ'ов России. Радиоэлектроника. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2017. Вып. 5. С. 19–27.

Маршалов Д. А., Носов Е. В., Бердников А. С., Федотов Л. В. Технический облик многофункциональной системы преобразования сигналов для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 95–103.

Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В., Шейнман Ю. С. Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 39–47.

Пат. RU 64386 U1, МПК G01R 23/16, G01R 23/18. Система анализа спектров узкополосных космических радиоизлучений / Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Ипатов А. В. // Оpubл. 27.06.2007, бюл. № 18.

Пат. RU 2316775 U1, МПК G01R 23/16. Способ измерения энергетического спектра узкополосного космического радиоизлучения / Кольцов Н. Е. // Оpubл. 10.02.2008, бюл. № 4.

Fridman P. A., Baan W. A. RFI mitigation methods in radio astronomy // *Astronomy & Astrophysics*. 2001. № 378. P. 327–344.

Sullivan W. T., III, Kerstholt J. H. Time variations in 18-cm OH emission profiles over the period 1965–1972 // *Astron.&Astrophys. EDP Sciences*. 1976. Vol. 51. P. 427–450.