

## Спектрально-селективная регистрация радиометрических сигналов с помощью многофункциональной системы

© С. А. Гренков, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

В настоящее время все радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» оснащаются новыми многофункциональными цифровыми системами преобразования сигналов. Работа каждого из каналов такой системы основана на цифровой обработке сигналов в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). При этом в системе предусмотрено удаленное перепрограммирование таких микросхем, что дает возможность заменить любую аппаратуру, предназначенную для преобразования сигналов на радиотелескопе, и обеспечить регистрацию сигналов не только при РСДБ-, но также при радиометрических и спектральных наблюдениях. С этой целью была разработана специальная прошивка ПЛИС для реализации спектрально-селективного метода регистрации радиометрических сигналов, который обеспечивает высокую точность измерений даже при наличии помех. Она загружается в ПЛИС любого канала многофункциональной системы, в результате чего этот канал без изменения аппаратной части преобразуется в модуль радиометрической регистрации сигналов.

В статье дано описание принципа действия спектрально-селективных радиометрических 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 разработанной прошивки ПЛИС выделять 32768 спектральных компонент с частотным разрешением до 15.625 кГц. В программном обеспечении и прошивке модуля реализованы не только цифровая регистрация и измерение мощности радиометрических сигналов с временем когерентного накопления до 600 с, но и анализ спектров сигналов, контроль характеристик сигнального тракта, а также обнаружение, анализ и исключение помех в сигнале. Многофункциональная система с разработанной прошивкой ПЛИС была испытана в обсерватории «Светлое» на радиотелескопе РТ-32. Для этого были проведены специальные радиометрические наблюдения, основные результаты которых приводятся в статье. Испытания показали возможность применения новой многофункциональной системы преобразования сигналов для радиометрической регистрации радиоастрономических сигналов и эффективность использования при этом спектральной селекции радиопомех.

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

**Ключевые слова:** радиотелескоп, система преобразования сигналов, цифровая обработка сигналов, радиометрическая спектрально-селективная регистрация сигналов.

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

**Для цитирования:** Гренков С. А., Федотов Л. В. Спектрально-селективная регистрация радиометрических сигналов с помощью многофункциональной цифровой системы // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 62. С. 3–9.  
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.62.3-9>

## Spectral-Selective Radiometric Recording by Means of Multifunctional Digital Backend System

S. A. Grenkov, L. V. Fedotov

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

### Abstract

Currently, all radio telescopes of the Quasar VLBI network are equipped with new Multifunctional Digital Backend systems. The operation of each of the channels of such a system is based on digital signal processing in a programmable logic integrated circuit (FPGA). The possibility of remote reprogramming of such FPGA is built into the system of such FPGA, which makes it capable of replacing all the backend equipment of the radio telescope and ensuring the recording of signals not only in the VLBI, but also during radiometric and spectral observations. For these purposes, a special FPGA firmware has been developed that implements a spectral-selective method for recording radiometric signals, which ensures high measurement accuracy even in the presence of radio interference. When each channel of a multifunctional system of such firmware is loaded into the FPGA, this channel is turned to a radiometric signal converter unit without changing the hardware.

The article describes the operation principle of spectral-selective radiometric modules based on 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 the receiving band up to 2 GHz and allows using the developed FPGA firmware to allocate 32768 spectral components with a frequency resolution of up to 15.625 kHz. The developed software and firmware provides not only digital registration and measurement of radiometric signal power with a coherent accumulation time of up to 600 seconds, but also analysis of signal spectra, monitoring of signal path characteristics, as well as detection, analysis and elimination of radio interference in the signal. The multifunctional system with the developed FPGA firmware was tested at the “Svetloe” Observatory on the RT-32 radio telescope. For this purpose special radiometric observations were carried out. The main results of these observations are reflected in the article. The tests showed the possibility of using a new Multifunctional Digital Backend system for radiometric recording of radio astronomical signals and the effectiveness of using spectral selection of radio interference.

The developed FPGA firmware for the channels of the multifunctional system will be used in the prototypes being put into operation on the radio telescopes of the Quasar VLBI network.

**Keywords:** radio telescope, data acquisition system, digital signal processing, radiometric spectral-selective signal recording.

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

**For citation:** Grenkov S. A., Fedotov L. V. Spectral-selective radiometric recording by means of Multifunctional Digital Backend system // *Transactions of IAA RAS.* 2022. Vol. 62. P. 3–9.  
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.62.3-9>

## Введение

В настоящее время все радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» оснащаются новыми многофункциональными цифровыми системами преобразования сигналов (МСПС) (Маршалов и др., 2021). Работа каждого из 8 каналов МСПС — модулей цифрового преобразования сигналов (ЦПС) — основана на цифровой обработке сигналов в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). МСПС может заменить любую систему, отвечающую за преобразование сигналов на радиотелескопе, и путем перепрограммирования ПЛИС может обеспечить регистрацию сигналов не только при РСДБ-, но также при радиометрических и спектральных наблюдениях. Специальная прошивка ПЛИС разработана для реализации спектрально-селективного метода, который обеспечивает высокую точность измерений даже при наличии помех (Гренков и др., 2015). Основным результатом этой разработки и посвящена данная статья. В ней представлены описание разработанного алгоритма и структура конфигурации ПЛИС для спектрально-селективной регистрации радиометрических сигналов с помощью МСПС. Приведены основные параметры спектрально-селективного радиометрического модуля на основе МСПС и результаты тестовых наблюдений с его использованием в обсерватории «Светлое».

## Структура и алгоритм прошивки ПЛИС для регистрации радиометрических сигналов

Для работы МСПС в режиме регистрации радиометрических сигналов были разработаны 3 варианта прошивки ПЛИС ЦПС для трёх вариантов полосы пропускания радиоастрономического приемного устройства (РПУ) радиотелескопа. Каждая из трех прошивок обеспечивает работу любого из 8 каналов МСПС при радиометрических наблюде-

ниях на радиотелескопе и производит вычисление спектров широкополосного сигнала конвейерным способом без потерь времени наблюдения источника сигнала (Патент РФ, 2012). Предусмотрена работа как в режиме модуляционного радиометра, так и без модуляции. Функционально прошивка включает в себя три блока: основной блок, блок управления аналого-цифровым преобразователем (АЦП), блок контроля и синхронизации (рис. 1).

Принцип действия спектрально-селективного модуля на базе ЦПС МСПС основан на вычислении спектра мощности сигнала методом быстрого преобразования Фурье (БПФ), исключения частотных каналов, занятых радиопомехами, и определения мощности принимаемого сигнала в полосе частот, свободной от помех. В ПЛИС коды демultipлексированного сигнала с АЦП проходят предварительную цифровую фильтрацию в блоке преселекции и усиления сигнала. Затем коды распределяются по  $N$  параллельно работающим с тактовой частотой 256 МГц БПФ вычислителям спектров мощностей (в зависимости от полосы пропускания приёмного канала таких вычислителей может быть 16, 8 или 4 для соответствующих полос  $B_0 = 2048, 1024$  или  $512$  МГц). Из полученных спектров по алгоритму Кули — Тьюки (Blahut, 1985) (алгоритм вычисления одномерного преобразования Фурье путём перехода к двумерному преобразованию Фурье более коротких последовательностей) формируются мгновенные спектры мощности шумового сигнала с полосой  $B_0 = 0.5F_d$ :

$$Y_{n''k'+k''} = \sum_{i'=0}^{N-1} w^{n''i'k'} \left[ w^{i'k''} \sum_{i''=0}^{n''-1} w^{i''k''N} x_{i'+Ni''} \right], \quad (1)$$

где  $F_d$  — частота дискретизации сигнала,  $Y$  — одномерный массив отсчетов спектра,  $x$  — одномерный массив отсчетов сигнала,  $n'' = 2n/N$  — число

отчетов спектра в каждом из каналов вычисления БПФ,  $n$  — число дискретных компонент в спектре  $k' = 0 \dots N - 1$ ,  $k'' = 0 \dots n'' - 1$ ,  $i' = 0 \dots N - 1$ ,  $i'' = 0 \dots n'' - 1$ ,  $w = e^{j2\pi/2n}$ ,  $j$  — мнимая единица.

Вычисленные по формуле (1) мгновенные спектры преобразуются в спектры мощности, которые затем усредняются на заданном интервале времени  $t_n$ . Мгновенные спектры вычисляются циклически с периодом  $t_{сп} = 1/\nu$ , где  $\nu = B_0/n$  — интервал частотного разрешения,  $n = 32768$  — число компонент дискретного спектра мощности на положительной полуоси частот ( $\nu = 62.5$ ;  $31.25$  и

$15.625$  кГц для полос регистрации  $B_0 = 2048$ ;  $1024$  и  $512$  МГц соответственно). Циклы вычисления спектров синхронизированы с фронтами импульсов меандра с частотой  $F_{\text{мод}}$ , которым модулируется генератор шума в приемной системе радиотелескопа и переключается затухание аттенюатора при работе в режиме модуляционного радиометра. За период модуляции  $t_{\text{мод}} = 1/F_{\text{мод}}$  накапливается  $m_1$  мгновенных спектров мощности, а число накопленных в течение заданного интервала времени  $t_n$  спектров равно  $m = t_n/t_{\text{сп}} = m_2/m_1$ , где  $m_2 = t_n/t_{\text{мод}}$  — целое число периодов модуляции.

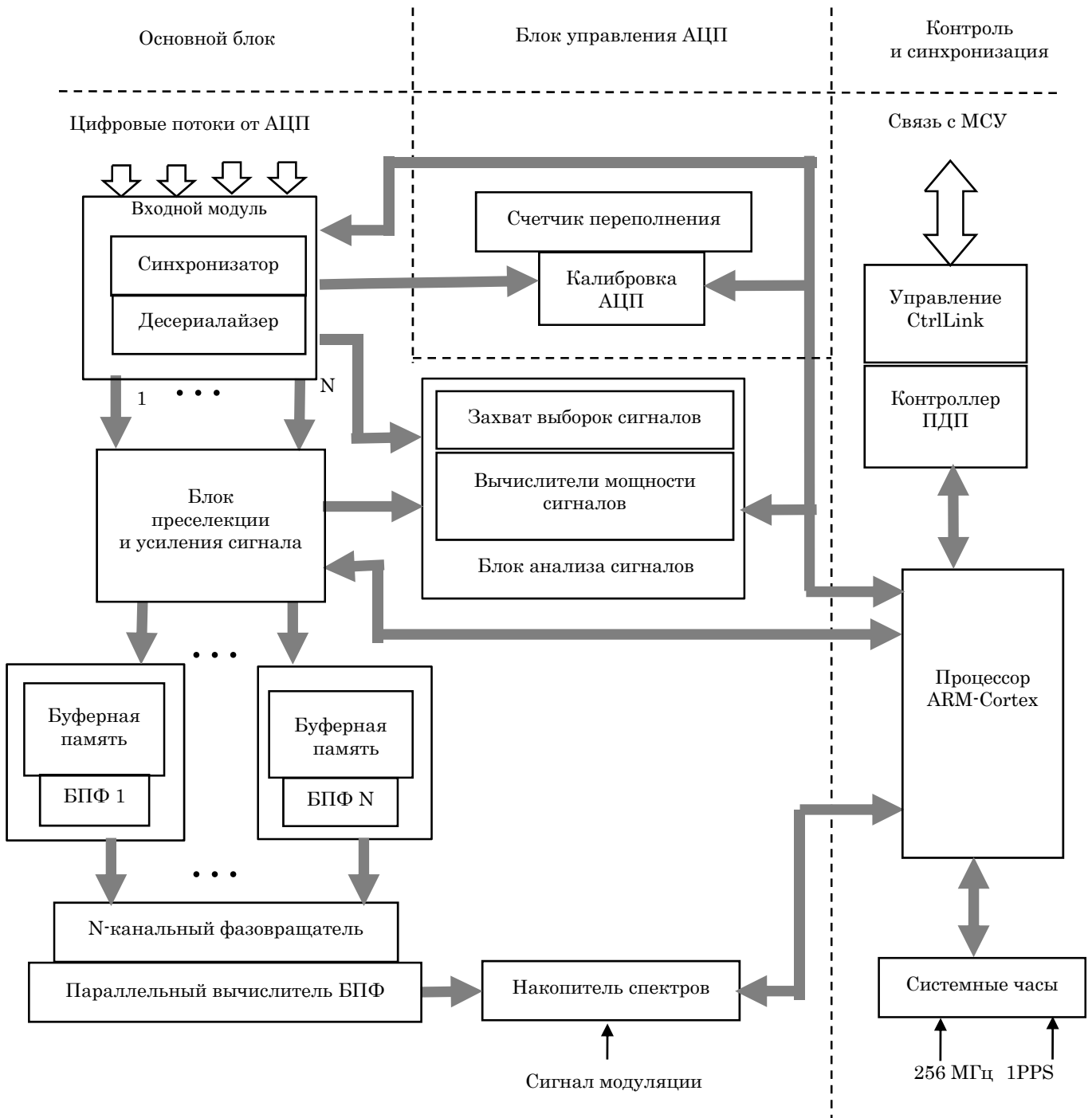


Рис. 1. Функциональная структура ЦПС МСПС в режиме спектрально-селективного модуля

Для прошивки, работающей с полосой  $B_0 = 2048$  МГц, блок преселекции сигнала не нужен и все 16 отсчетов сигнала из входного модуля поступают на 16-входовый преобразователь сигнала в спектр БПФ1 — БПФ $N$  ( $N = 16$ ). Для прошивки с полосой  $B_0 = 1024$  МГц в блоке преселекции выполняется цифровая фильтрация сигнала в полосе 0–1024 МГц или 1024–2048 МГц с последующей децимацией (прореживанием) в 2 раза ( $N = 8$ ), а также усиление сигнала при необходимости. В прошивке с полосой  $B_0 = 512$  МГц блок преселекции обеспечивает кратный 128 МГц сдвиг частоты сигнала с помощью цифрового гетеродина с последующей цифровой фильтрацией сигнала в полосе 0–512 МГц и децимацией на 4 ( $N = 4$ ), а также усиление сигнала при необходимости. При этом доступны следующие области частот:  $128 \cdot i \dots 128 \cdot i + 512$  МГц, где  $i$  может находиться в пределах 0...12 (максимальная частота сдвига — 1536 МГц).

Накопитель спектров суммирует как спектры мощности, так и их квадраты, отдельно на чётных и нечётных полупериодах модуляции радиометра. Затем полученные отсчеты спектров и квадратов спектров с помощью модуля синхронизации и управления МСПС (МСУ) по интерфейсу Ethernet передаются в компьютер радиотелескопа. Накопленные отсчеты квадратов спектров используются для вычисления коэффициента эксцесса спектральной функции, то есть меры остроты ее пика или куртозиса (Nita et al., 2007), удобного для автоматического выявления помехи в спектральном канале. В модуляционном режиме разность накопленных и усреднённых на интервалах  $0.5t_n$  спектров позволяет разделить спектр мощности принятого широкополосного радиосигнала и спектр воздействующих на радиотелескоп помех. Компоненты узкополосных спектров помех выделяются на фоне усреднённого гладкого спектра собственных шумов радиотелескопа и могут быть автоматически определены с использованием спектрального куртозиса и амплитудно-фильтрационных алгоритмов. После исключения компонент спектра, содержащих помехи, вычисляются мощность и другие энергетические параметры исследуемого радиоизлучения. Предусмотрена также возможность работы в режиме измерения полной мощности (без модуляции генератора шума и аттенюатора РПУ).

### Основные параметры и дополнительные функции спектрально-селективного модуля на основе ЦПС

Чувствительность спектрально-селективного радиометра оценивается минимальной шумовой температурой регистрируемого сигнала (Гренков и др., 2015):

$$T_{Smin} = \rho \zeta T_{ш} \sqrt{2 / (B_0 - B_{пом})} t_n,$$

где  $\rho$  — пороговое значение отношения сигнал/шум на выходе радиометра (например,  $\rho = 1$ );  $\zeta$  — коэффициент, определяемый режимом работы РПУ (для модуляционного радиометра на РТ-32  $\zeta = 2.22$ );  $T_{ш}$  — температура собственных шумов радиотелескопа;  $B_{пом}$  — суммарная полоса исключаемых частотных каналов с радиопомехами. Среднеквадратическая погрешность определения шумовой температуры принимаемого сигнала  $T_s$  при отсутствии радиопомех задается формулой

$$\sigma_{T_s} = \zeta T_{ш} \sqrt{2 / B_0} t_n.$$

В диапазонах волн  $C$ ,  $X$  и  $K$ , где на радиотелескопах РТ-32 практически отсутствуют радиопомехи и чувствительность спектрально-селективного радиометра такая же, как у штатного радиометра с аналоговым квадратичным детектором. При измерениях в диапазонах волн  $S$  и  $L$ , где есть радиопомехи, чувствительность спектрально-селективного радиометра снижается в  $\sqrt{1 + B_{пом}/B_0}$  раз, но обычно снижение чувствительности не велико (меньше 5 % при  $B_{пом} \leq 0.1B_0$ ).

Каждый спектрально-селективный радиометрический модуль на основе ЦПС, кроме своей основной функции, обеспечивает ряд дополнительных функций, в том числе:

- самодиагностика состояния системы (получение информации о текущих настройках модулей, телеметрия, контроль внутренней и внешней синхронизации);
- контроль частотных характеристик РПУ и генератора шума (ГШ);
- измерение мощности сигнала на входе системы и на стадиях промежуточных преобразований;
- захват и анализ входного шумового сигнала с последующим представлением во временной или частотной области.

Таким образом, заложенные в спектрально-селективные модули средства анализа сигналов обеспечивают оператора всей необходимой информацией для дистанционного контроля настроек и состояния системы. Использование спектрально-селективных модулей позволяет контролировать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) каналов радиотелескопа, неравномерность и нестабильность генераторов шума компенсации и калибровки, фиксировать помехи прямо во время сеансов наблюдений. Контроль вышеуказанных параметров позволяет выявить нуждающиеся в ремонте или настройке модули приемно-усилительного тракта, или, в случае радиометрических и спектральных наблюдений, учесть их в процессе

Таблица

Основные параметры радиометрического модуля на базе ЦПС

| Параметр  | Значение (для трех вариантов прошивки) |
|---|--|
| Частота дискретизации, МГц                                  | 4096; 2048; 1024                       |
| Полоса приема, МГц  | 2048; 1024; 512                        |
| Число дискретных компонентов в спектре                      | 32768                                  |
| Разрешение $\nu$ , кГц                                      | 62.5; 31.25; 15.625                    |
| Время вычисления спектра $t_{сп}$ , мкс                     | 16; 32; 64                             |
| Минимальное время накопления сигнала $t_{н\ min}$ , с       | 0.25                                   |
| Максимальное время когерентного накопления $t_{н\ max}$ , с | ~600                                   |
| Минимальная ширина спектра исключаемой помехи, кГц          | 62.5; 31.25; 15.62                     |
| Анализ спектров быстро изменяющихся процессов               | Обеспечивает                           |
| Контроль параметров АЧХ РПУ и ГШ                            | Обеспечивает                           |
| Обнаружение и анализ помех                                  | Обеспечивает                           |
| Возможность вычисления спектрального куртозиса              | Обеспечивает                           |

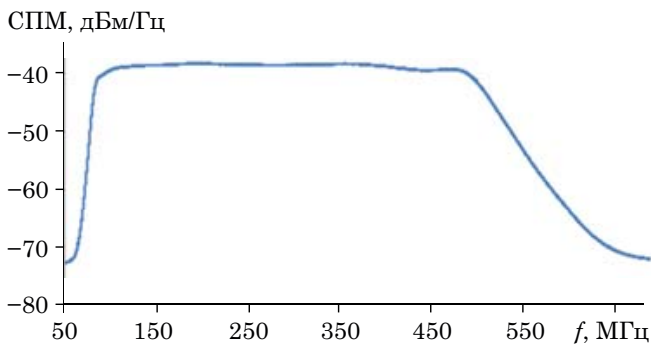


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика канала, полученная с помощью спектрально-селективного модуля на базе ЦПС МСПС при подаче на вход широкополосного шумового сигнала; СПМ — спектральная плотность мощности (здесь и далее)

калибровки и тем самым повысить точность измерений.

На рис. 2 представлен пример снятой с помощью спектрально-селективного модуля АЧХ одного из каналов МСПС для радиотелескопа РТ-32 в режиме регистрации сигналов с полосой 512 МГц (на входе канала был шумовой сигнал, ограниченный полосой не превышающей 512 МГц, полоса регистрации спектрально-селективного модуля — 1024 МГц).

Радиометрический модуль на базе ЦПС МСПС обладает следующими основными параметрами (см. таблицу).

### Радиометрические наблюдения с использованием МСПС

Для экспериментальной проверки работы МСПС в режиме радиометрических наблюдений система была установлена в аппаратном помеще-

нии операторской РТ-32 обсерватории «Светлое» и 5 мая 2022 г. с ее помощью был проведен тестовый сеанс радиометрических наблюдений в диапазонах  $L$ ,  $S$ ,  $C$  и  $X$  для нескольких источников на «теплых» приемниках.

Выбор участков спектра для работы, по которым осуществлялось измерение мощности, в этих диапазонах показан на рис. 3а–д. С помощью программного обеспечения для МСПС были выбраны участки свободные от помех.

Наблюдения источников в диапазонах  $L$ ,  $S$ ,  $C$  проводились в формате: выход на источник-сопровождение — отвод с источника — запись нескольких сканов по азимуту; а в диапазоне  $X$ : выход на источник-сопровождение — отвод с источника. На рис. 4 и 5 в качестве примера показаны откалиброванные по генератору шума калибровки (ГШК) результаты измерения мощности регистрируемого сигнала радиоисточника (шумовая температура,  $K$ ) в разных диапазонах волн для правой круговой поляризации от времени.

Как видно из графиков, в диапазонах  $L$  и  $S$  в некоторых случаях без селекции радиопомех не представляется возможным обнаружить отклики ни на сигнал при прохождении антенны через источник, ни на включение калибровочного ГШК (верхние графики на рис. 4 и 5). На нижних графиках, полученных при использовании режима частотной селекции помех, отчетливо видны как калибровочный сигнал ГШК, так и интенсивность сигнала при сопровождении и при сканировании источника по азимуту. Это наглядно демонстрирует эффективность использования селекции радиопомех при регистрации радиометрических сигналов с помощью МСПС.

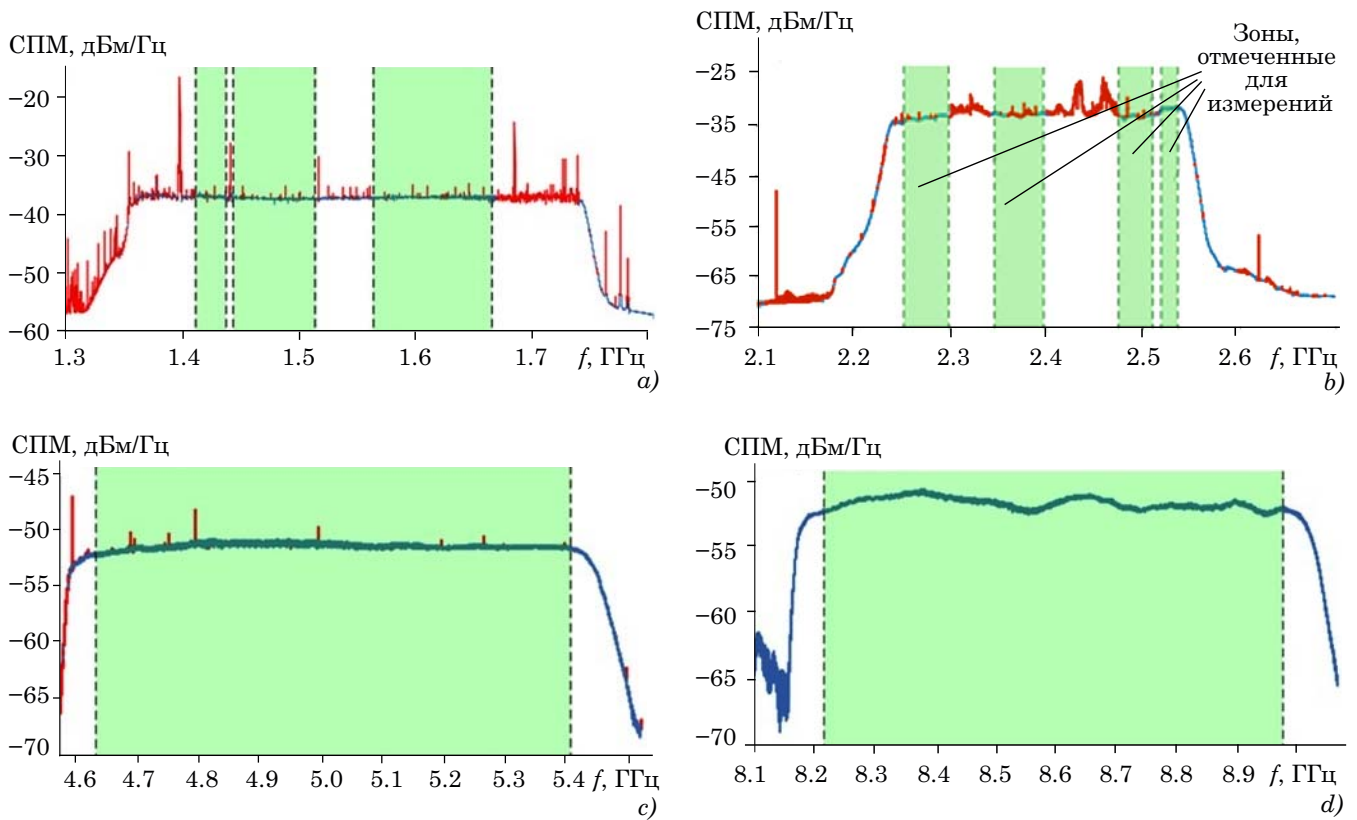


Рис. 3. Спектры сигналов, накопленных на интервале 1 с, с интервалом частотного разрешения  $\nu = 31.25$  кГц в диапазонах  $L(a)$ ,  $S(b)$ ,  $C(c)$  и  $X(d)$  в правой круговой поляризации и выбранные рабочие зоны (выделены зелёным). Красным цветом отмечены автоматически обнаруженные частотные каналы, занятые помехами; синим показаны частотные каналы, в которых автоматический алгоритм не выявил помех

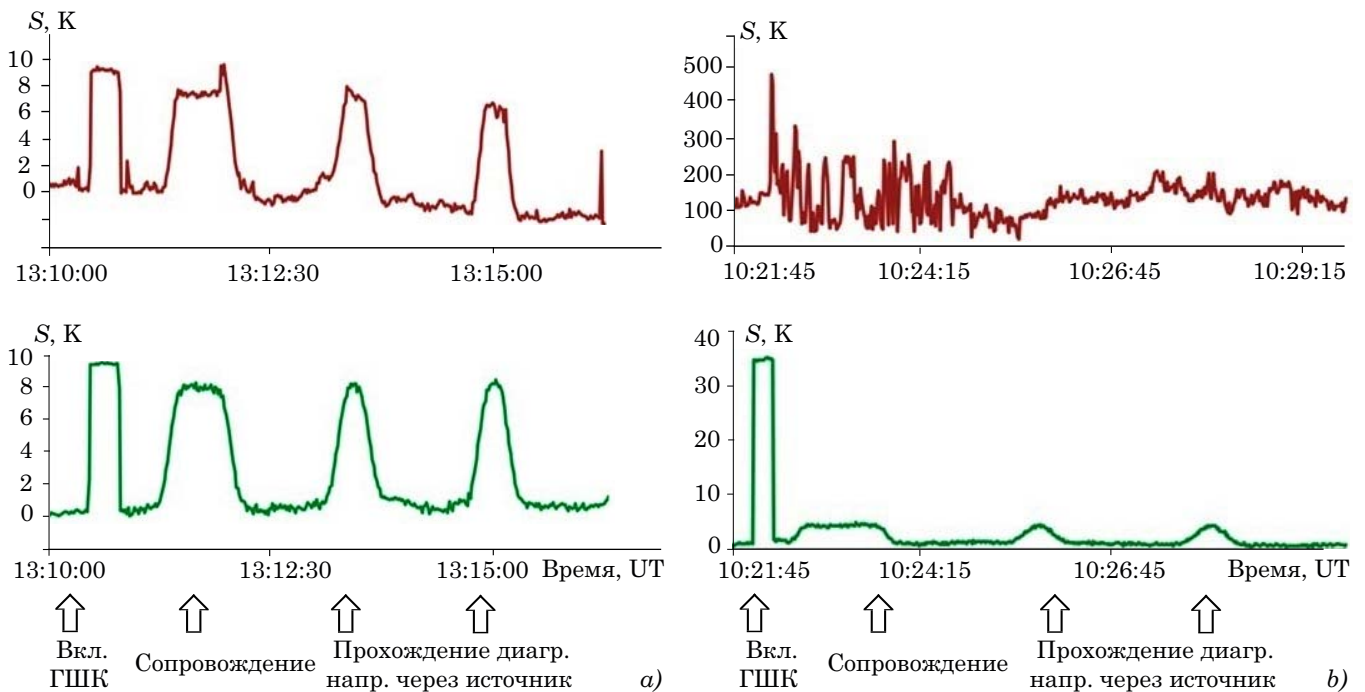


Рис. 4. Временные диаграммы наблюдений источника ЗС123 в диапазонах  $L$  (a) и  $S$  (b): без селекции помех (верхние рисунки) и с включенным режимом селекции помех (нижние рисунки)

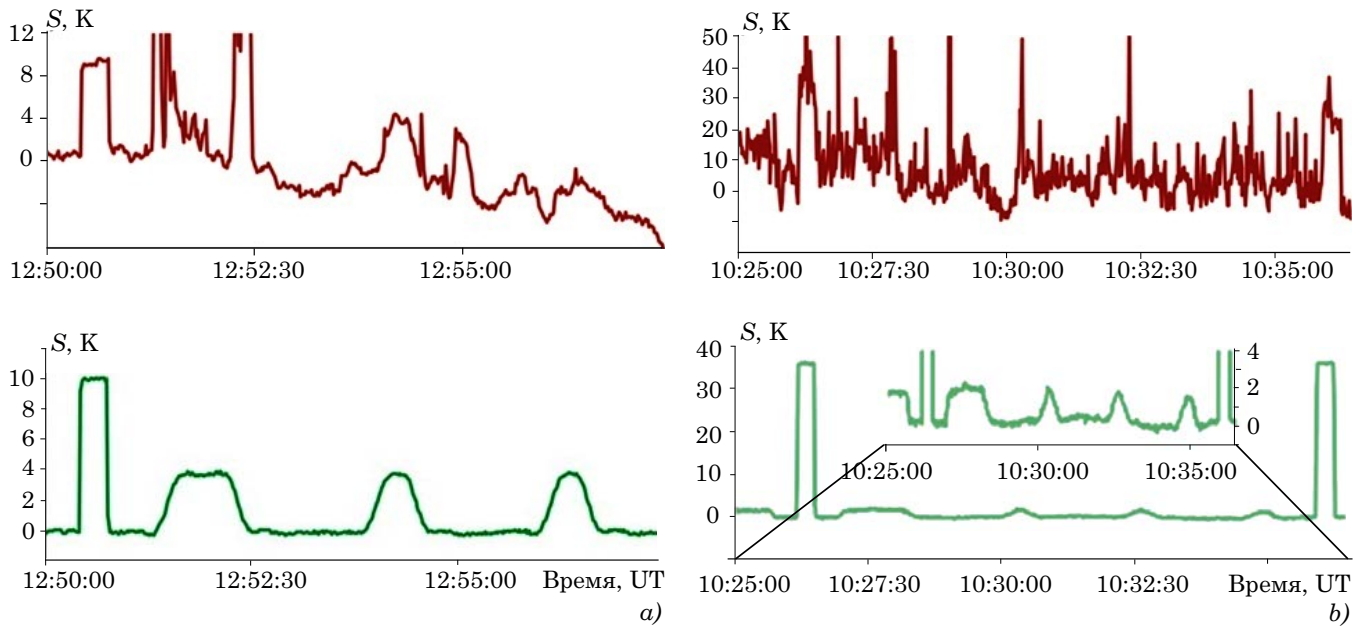


Рис. 5. Временные диаграммы наблюдений источника 3C295 в диапазонах  $L$  (a) и  $S$  (b): без селекции помех (верхние рисунки) и с включенным режимом селекции помех (нижние рисунки)

## Заключение

Разработанные прошивки ПЛИС для каналов МСПС будут использованы в опытных образцах МСПС, вводимых в эксплуатацию на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». Экспериментальные радиометрические наблюдения на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» показали, что они обеспечивают радиометрическую регистрацию сигналов в полосе до 2048 МГц, селекцию радиопомех и позволяют повысить эффективность проводимых радиометрических наблюдений, а также достоверность получаемых результатов.

Работа выполнена в соответствии с Планом научно-исследовательских работ ИПА РАН. В статье использованы материалы доклада, сделанного авторами на Всероссийской радиоастрономической конференции «Радиотелескопы, аппаратура и методы в радиоастрономии» (ВРК–2022).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

## Литература

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.

Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Спектрально-селективный модуль радиометра с защитой от радиопомех // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. LVIII, № 7. С. 577–586.

Широкополосный радиометр с селекцией радиопомех: пат. RU 101842 U1, МПК G01R 21/133 / Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Федотов Л. В.; патентообладатель ИПА РАН № 2010134031; заявл. 13.08.2010; опубл. 27.01.2011, бюл. № 3.

Blahut R. E. Fast algorithms for digital signal processing. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1985. 455 p.

Nita G. M., Gary D. E., Liu Z., et al. Radio frequency interference excision using spectral-domain statistics // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2007. № 119. P. 805–827.