

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 520.8

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРОВ
КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. С. А. Гренков^{а,*}, Н. Е. Кольцов^а

^а Институт прикладной астрономии РАН
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10

*e-mail: skynet81@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.

После доработки 22.02.2019 г.

Принята к публикации 02.03.2019 г.

Цифровой анализатор спектров, основанный на быстром преобразовании Фурье шумовых сигналов с полосами до 1024 МГц, предназначен для оснащения радиотелескопов РТ-32 и РТ-13. Анализатор обеспечивает радиометрические измерения в континууме при воздействии радиопомех, а также регистрацию радиоизлучений в спектральных линиях с высокой (до 488 Гц) разрешающей способностью по частоте. Представлен анализатор с вычислителем спектров на пяти программируемых логических интегральных схемах (п.л.и.с.) серии Virtex-4. Приведены параметры и результаты испытаний анализатора. Даны сведения о разработке однокристалльного вычислителя спектров на п.л.и.с. Virtex-7 с повышенной в 8 раз разрешающей способностью.

DOI: 10.1134/S0032816219040244

ВВЕДЕНИЕ

В современных радиометрах, предназначенных для измерения энергетических параметров широкополосного космического радиоизлучения, применяются высокоскоростные цифровые анализаторы спектров спектрально-селективного типа [1], выполненные на программируемых логических интегральных схемах (п.л.и.с.), например, серии Virtex-5. При полосе анализа $B_{ан} = 1024$ МГц они обеспечивают высокоточные радиометрические измерения в континууме, даже при воздействии радиопомех [2].

Однако разрешающая способность по частоте ($\nu \approx 1$ МГц) широкополосных анализаторов спектров недостаточна для высококачественной регистрации узкополосных сигналов космического радиоизлучения в спектральных линиях и для достаточно точного определения доплеровских смещений частот, по которым вычисляются лучевые скорости радиосигналов, излучаемых движущимися относительно Земли источниками. Необходимо, по крайней мере, на два порядка улучшить разрешающую способность анализатора (уменьшить ν), увеличив число компонентов регистрируемого спектра мощности $N = B_{ан}/\nu$.

При регистрации радиоизлучений в спектральных линиях обычно применяются анализаторы спектров со сравнительно узкими полосами анализа ($B_{ан} \approx 0.5\text{--}16$ МГц), чтобы получить приемлемую разрешающую способность по частоте

[3]. Оригинальный метод амплитудной калибровки спектров [4], применяемый в таких анализаторах, позволяет уменьшить искажения (размывание) спектров принимаемых радиосигналов, связанные с вращением Земли.

К недостаткам узкополосного анализатора спектров можно отнести невозможность одновременной регистрации нескольких, различающихся по частотам излучения сигналов, которые могут генерироваться газовыми образованиями, содержащими различные по энергетическим уровням ионы или атомы. Кроме того, принимаемый узкополосный сигнал выделяется перестраиваемым в широкой полосе промежуточных частот видеоконвертором, что значительно усложняет аппаратуру и препятствует ее размещению на антенне радиотелескопа рядом с приемными устройствами, как принято в современных радиоастрономических системах с цифровой обработкой сигналов, например на радиотелескопах РТ-13 [5, 6].

При использовании разнотипной аппаратуры для радиометрических наблюдений и исследования радиоизлучений в спектральных линиях увеличиваются затраты на ее эксплуатацию и ремонт. Целесообразность разработки унифицированного анализатора спектров, который можно было бы применять при радиоастрономических наблюдениях разных видов, обоснована в [7]. Для этого необходимо было разработать высокоскоростной широкополосный ($B_{ан} \approx 1$ ГГц) анализа-

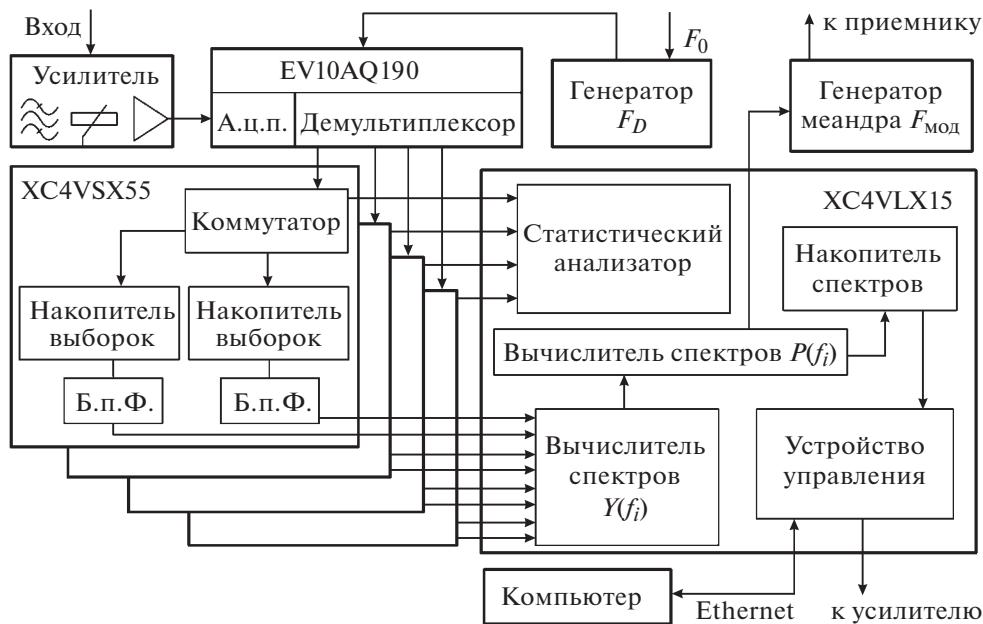


Рис. 1. Структурная схема широкополосного анализатора спектров на п.л.и.с. 4-го поколения.

тор спектров с высокой разрешающей способностью по частоте. Результаты разработки такого анализатора спектров для радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 представлены в данной статье.

АНАЛИЗАТОР СПЕКТРОВ НА П.Л.И.С. СЕРИИ VIRTEX-4

В состав анализатора спектров широкополосных (до 1 ГГц) сигналов входят аналого-цифровой преобразователь (а.ц.п.), работающий с тактовой частотой дискретизации сигнала $F_D \geq 2$ ГГц, демультимплексор, обеспечивающий введение кодов цифрового сигнала в высокоскоростной вычислитель спектров мощности на п.л.и.с., и управляющий компьютер [8].

В радиоастрономических системах частоту дискретизации F_D и тактовую частоту F_T вычислителя спектров обычно выбирают из ряда значений 2^ζ МГц, где ζ – целое число. При этом ширина полосы анализа $B_{ан} = 0.5F_D$. Исследуемый шумовой сигнал промежуточной частоты должен быть в пределах одной из полос Найквиста, ограниченных частотами $0.5(\gamma - 1)F_D$ и $0.5\gamma F_D$, где γ – целое положительное число (номер полосы).

В рассматриваемом анализаторе (рис. 1) полоса частот исследуемого сигнала ограничивается фильтром на входе микросхемы EV10AQ190, содержащей 10-разрядный многоядерный а.ц.п. и 4-канальное устройство синхронизации, выполняющее функции демультимплексора. Фильтр имеет четыре переключаемые полосы пропуска-

ния: 0.1–1 ГГц, 1–2 ГГц, 1280–1536 МГц и 1280–1312 МГц.

Первые две полосы, совпадающие с полосами пропускания приемных устройств радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 соответственно, необходимы для радиометрических измерений в континууме, когда а.ц.п. работает с частотой дискретизации $F_D = 2048$ МГц и вычисляются спектры в полосе анализа $B_{ан} = 1024$ МГц. Более узкие полосы пропускания удобно использовать на радиотелескопах РТ-13, где высокочастотные приемные каналы могут гетеродинами перестраиваться по частоте с шагом 0.2 МГц, обеспечивая выделение сигнала без видеоконвертора. При приеме сигналов в загруженных полосах частот ($B_{ан} = 128$ МГц или 32 МГц) тактовые частоты дискретизации сигнала F_D , равные 256 МГц или 64 МГц, получаются делением частоты 2048 МГц.

Микросхема EV10AQ190 преобразует широкополосный шумовой сигнал промежуточной частоты в цифровой сигнал с тактовой частотой $F_D = 2048$ МГц и разделяет его на 4 параллельных потока кодов. Эти потоки с тактовой частотой 512 МГц поступают в модуль вычисления спектра мощности, выполненный на четырех сравнительно недорогих и доступных п.л.и.с. XC4VSX55 и одной п.л.и.с. XC4VLX15.

В каждой п.л.и.с. XC4VSX55 сформированы входной коммутатор и два вычислительных канала (для приема и обработки выборок сигнала, приходящих по фронту и спаду импульса сопровождающей тактовой частоты), каждый из которых содержит накопитель выборок и вычисли-

тель комплексного спектра сигнала методом быстрого преобразования Фурье (б.п.Ф.). Цифровые выборки широкополосного шумового сигнала демультимплексором и коммутаторами на входах четырех п.л.и.с. распределяются по $M = 8$ вычислительным каналам.

Каналы работают с тактовой частотой $F_T = F_D/M$ (256, 32 или 4 МГц в зависимости от заданной полосы анализа). В канал с номером m поступают выборки сигнала с порядковыми номерами $l = m + M\eta$, где η – целые числа, отсчитываемые от 0. Во входном накопителе канала формируются пакеты цифровых выборок сигнала объемом $2N/M$, по которым методом б.п.Ф. с использованием алгоритма Кули–Тьюки [9] вычисляются мгновенные комплексные спектры сигнала.

Комплексные спектры, содержащие по $2N/M$ компонентов, транслируются в п.л.и.с. XC4VLX15, которая вычисляет мгновенный комплексный спектр $Y(f_i)$ исходного широкополосного сигнала, содержащий по $2N$ отсчетов амплитуд A_i и фаз φ_i на действительной и мнимой полуосях частот f_i (i – номер дискретной частоты). С периодом $\tau_0 = 2N/F_D$ вычисляются мгновенные спектры мощности сигнала на действительной оси частот $P(f_i) = A_i^2$.

Эти спектры при работе анализатора в составе модуляционного радиометра являются спектрами принимаемого сигнала $P_S(f_i)$ на входе а.ц.п., а при работе без модуляции приемного канала – спектрами полной мощности $P_X(f_i)$ шумового сигнала в приемном канале. Спектры мощности усредняются на заданном интервале времени τ_n , в результате чего в τ_n/τ_0 раз уменьшается дисперсия шумовых флуктуаций амплитуд компонентов спектра.

Через устройство управления, сформированное в п.л.и.с. XC4VLX15 на базе процессора Microblaze, усредненный спектр мощности передается в компьютер радиотелескопа для регистрации и анализа. В соответствии с заданной программой радиоастрономических наблюдений полученный спектр мощности используется либо при расчете энергетических параметров широкополосного излучения [2], либо при анализе спектров узкополосных радиосигналов [3].

Чтобы обеспечить работу анализатора спектров при наблюдениях по этим программам, в его состав введен генератор меандра с частотой $F_{\text{мод}}$, обеспечивающий управление используемых при наблюдениях узлов приемного устройства – модулятора коэффициента усиления и генераторов шумов. Фронты модулирующего меандра синхронизированы с начальными и конечными моментами циклов вычисления спектров.

В рассматриваемом анализаторе спектры вычисляются конвейерным способом (без пауз в ра-

боте а.ц.п. и аппаратных потерь времени приема радиосигнала), благодаря чему минимизируется время наблюдения источника излучения и уменьшаются искажения регистрируемого спектра.

Работа микросхемы EV10AQ190 и п.л.и.с. тактируется генератором сигналов тактовых частот, который синхронизирован сигналом опорной частоты $F_0 = 5$ МГц, получаемым от водородного стандарта частоты. Генератор, выполненный на микросхеме автогенератора UMX-153-D16 и микросхеме фазовой автоподстройки частоты ADF4106, работает на частоте $F_D = 2048$ МГц, а для получения меандров других тактовых частот (512, 256, 64 и 4 МГц) он дополнен делителями частот.

Вычислитель спектров и микросхема EV10AQ190 управляются компьютером радиотелескопа через устройство управления в п.л.и.с. XC4VLX15. Для контроля качества цифрового сигнала на выходе а.ц.п. в п.л.и.с. XC4VLX15 сформирован модуль статистического анализа цифровых выборок сигнала. В этом модуле вычисляется среднееквадратическое значение σ_u широкополосного сигнала на входе а.ц.п. Уровень этого сигнала устанавливается аттенуатором и поддерживается автоматически таким, чтобы значение σ_u было равно или немного меньше $U/6$, где U – диапазон измеряемых данным а.ц.п. напряжений. С этой целью определяются доли выбросов за пределы $\pm 3\sigma_u$, которые не должны превышать 3%. По соотношению количеств положительных и отрицательных значений выборок сигнала контролируется правильность установки нулевого уровня в а.ц.п. и вырабатывается сигнал для его подстройки. Команды на установку ослабления аттенуатора и на подстройку а.ц.п. поступают от устройства управления п.л.и.с. XC4VLX15.

Анализатор спектров собран на двух печатных платах: на 10-слойной плате установлены все п.л.и.с. и а.ц.п., на обычной двухсторонней плате – другие составные части анализатора. Анализатор размещен в блоке объемом 17.5 дм³ со встроенным источником электропитания от сети 220 В.

ПАРАМЕТРЫ АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРОВ

Наряду с рабочим диапазоном частот, шириной полосы анализа $B_{\text{ан}}$, разрешающей способностью по частоте и быстродействию (отсутствием потерь времени приема радиосигнала), к основным параметрам, характеризующим качество и функциональные возможности анализатора спектров, относятся чувствительность, точность определения амплитуд компонентов спектра мощности и максимальное время эффективного накопления сигнала.

При работе в режиме спектрально-селективного радиометра и отсутствии радиопомех чувствительность оценивается минимальной шумовой температурой регистрируемого сигнала [2]:

$$T_{S \min} = \rho \xi T_{\text{ш}} \sqrt{2/(B_{\text{ан}} \tau_{\text{н}})},$$

где ρ – пороговое значение отношения сигнал/шум (например, $\rho = 1$); ξ – коэффициент, определяемый режимом работы приемного устройства радиометра (для модуляционного радиометра на РТ-32 $\xi = 2.22$); $T_{\text{ш}}$ – температура собственных шумов радиотелескопа.

При $\rho = 1$ правая часть этой формулы равна среднеквадратической погрешности определения шумовой температуры принимаемого сигнала T_S . Если есть радиопомехи, занимающие полосу частот $B_{\text{пом}}$, то чувствительность радиометра со спектрально-селективным модулем снижается в $\sqrt{1 + B_{\text{пом}}/B_{\text{ан}}}$ раз из-за сужения полосы частот, свободной от помех.

При регистрации радиоизлучений в спектральных линиях измеряются частоты f_i и амплитуды p_i компонентов вычисленного спектра мощности $P(f_i)$, который пересчитывается в спектр шумовых температур $T_S(f_i)$ и в спектральную плотность мощности $S(f_i)$ принимаемого антенной радиосигнала. По измеренным частотам f_i определяются доплеровские смещения частот и лучевые скорости принимаемых сигналов. Точность определения лучевых скоростей прямо зависит от точности измерения частот f_i , которая определяется интервалом частотного разрешения ν (числом N спектральных компонентов в полосе анализа $B_{\text{ан}}$). Относительную среднеквадратическую погрешность измерения шумовой температуры сигнала T_{Si} на частоте f_i можно оценить по формуле [7]

$$\delta_{T_{Si}} = \frac{1}{q_i \sqrt{\nu \tau_{\text{н}}}},$$

где $q_i = T_{Si}/T_{\text{ш}}$ – отношение сигнал/шум на частоте f_i .

Время накопления сигнала, необходимое для определения шумовой температуры с допустимой погрешностью $\delta_{\text{доп}}$, должно соответствовать условию

$$\tau_{\text{н}} \geq \frac{1}{\nu \delta_{\text{доп}}^2 q_i^2}.$$

По зависимости дисперсии Алана от времени накопления сигнала, снятой для рассматриваемого анализатора спектров, установлено, что максимальное время эффективного накопления сигнала $\tau_{\text{н max}} = 620$ с. Этого вполне достаточно для любого из двух режимов работы анализатора спектров, так как при излишне большом времени

накопления из-за вращения Земли размывается регистрируемый спектр сигнала.

Динамический диапазон регистрируемых амплитуд спектра мощности равен 60 дБ.

Для точного определения наблюдаемых частот и лучевых скоростей радиосигналов необходимо повышать разрешающую способность по частоте (уменьшать ν), увеличивая число спектральных компонентов N в полосе $B_{\text{ан}}$. Максимальное число спектральных компонентов N_{max} определяется возможностью выполнения необходимого объема вычислений при ограниченных количествах аппаратных умножителей (C_y) и логических ячеек исполнения ($C_{\text{л}}$), а также емкости встроенных в п.л.и.с. блоков памяти (C_e).

Чтобы существенно уменьшить количество операций умножения и сложения при б.п.Ф., был применен алгоритм Кули–Тьюки, который используют в тех случаях, когда число компонентов вычисляемого спектра мощности можно представить произведением $N = Hh$ (таблицей из h строк и H столбцов) [9]. Если $N = 2^\alpha$ и α – четное число, то число операций умножения минимально в случае $h = H = 2^{0.5\alpha}$ (*). Если α – нечетное число, то следует принять $H = 2^{0.5(\alpha+1)}$ и $h = 2^{0.5(\alpha-1)}$. Коды столбцов и строк отдельно подвергаются преобразованию Фурье. При преобразовании Фурье по алгоритму Кули–Тьюки разбиение кодов на столбцы и строки применяется последовательно, пока их число не уменьшается до 2. При использовании разложения по основанию 2 потребуется минимальное количество операций: комплексных умножений – $Z_y = M \log_2(2N)$ и комплексных сложений – $Z_c = 2Z_y$ [10].

Число операций умножения Z_y сокращается в 4–23 раза при 3-кратном ($\Psi = 3$) последовательном рекурсивном применении алгоритма разбиения Кули–Тьюки с соблюдением условия (*) в зависимости от заданных значений N , а при $\Psi = 4$ – до 50 раз (рис. 2).

Чтобы определить максимальное число N_{max} компонентов спектра мощности сигнала в заданной полосе анализа $B_{\text{ан}}$, было проведено моделирование вычислителей спектров с использованием пакета программ ISEWebPack. Моделировались вычислители спектров на п.л.и.с. серий от Virtex-4 до Virtex-7 включительно. При увеличении числа компонентов спектра N от 2^{10} до 2^{18} необходимое число умножителей C_y увеличивается от 311 до 708, а емкость памяти C_e – от 2286 до 20520 Кбит (рис. 3).

Необходимое число логических ячеек $C_{\text{л}}$ изменяется при этом от 31947 до 55618, но в п.л.и.с. серии Virtex-4 число ячеек $C_{\text{л}}$ должно быть примерно в 1.5 раза больше, так как базовые ячейки таблиц истинности этих п.л.и.с. имеют четыре входа,

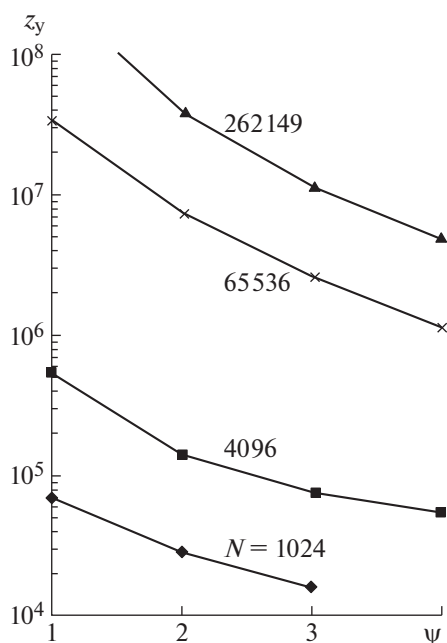


Рис. 2. Зависимости количеств операций умножения от числа этапов Ψ разбиения исходной последовательности при разных значениях N – числа компонентов вычисляемого спектра.

а не шесть, как в более новых поколениях. Дефицит логических ячеек исполнения ограничивает возможность получения в одном вычислительном канале п.л.и.с. Virtex-4 больше чем 2^{10} спектральных компонентов при полосе анализа 1024 МГц.

Вычислитель спектров с четырьмя п.л.и.с. XC4VSX55 дает спектр мощности широкополосного сигнала, содержащий $N = 2^{13}$ компонентов в полосе 1024 МГц. При более узких полосах анализа снижаются частота дискретизации сигнала и тактовая частота вычислителя F_T . Это позволяет уменьшить затраты блоков умножения за счет их неоднократного использования в течение периода тактовой частоты, но при этом приходится дополнительно выделять часть логических ячеек для организации регистровой памяти.

В вычислительном канале п.л.и.с. XC4VSX55 только при полосе анализа 32 МГц число компонентов спектра мощности увеличено до 2^{12} , а в анализаторе в целом – до 2^{18} компонентов. При полосах анализа 1024 и 128 МГц интервал частотного разрешения составляет $\nu = 125$ и 15.6 кГц соответственно, а при полосе анализа 32 МГц – 488 Гц.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В компьютере управления радиотелескопом установлены программы обработки вычисленных спектров мощности для трех видов радиоастрономических наблюдений: измерений энергетиче-

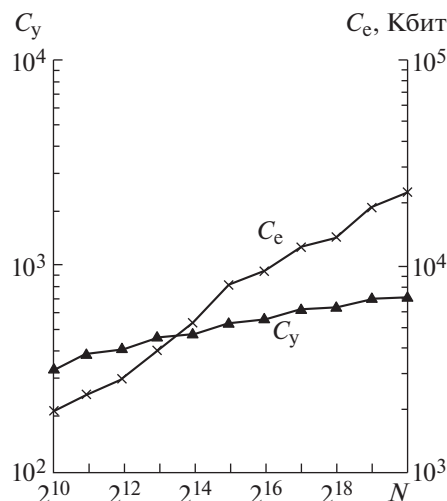


Рис. 3. Зависимости C_y и C_e от числа спектральных компонентов N .

ских параметров широкополосных сигналов в составе модуляционного радиометра, измерений полной мощности шумового сигнала в приемном канале (без его модуляции) и регистрации радиоизлучений в спектральных линиях. Последний режим работы удобно использовать и для анализа радиопомех, воздействующих на радиотелескоп. Исходные данные и результаты наблюдений, а также графики исследуемых параметров отображаются в интерфейсном окне на мониторе. Контроль и управление анализатором спектра обеспечивается через интерфейс Ethernet по UDP/IP протоколу.

При спектрометрических наблюдениях с помощью интерфейсного окна вводят необходимые данные о радиотелескопе (название и координаты, эффективную площадь антенны, поляризацию), сведения о наблюдаемом источнике радиоизлучения и параметры настройки приемной системы радиотелескопа, такие как полоса частот принимаемого радиосигнала, режим работы (с модуляцией приемного устройства или без), шумовая температура генератора сигнала амплитудной калибровки. Пользователь выбирает полосу пропускания входного фильтра анализатора спектров, устанавливая тем самым полосу анализа $B_{ан}$ (1024, 256 или 32 МГц), частоту дискретизации сигнала $F_D = 2B_{ан}$ и тактовые частоты F_T каналов вычисления спектров, и задает время накопления сигнала τ_n в пределах от 0.5 с до 10 мин.

При радиометрических наблюдениях в графическое поле интерфейсного окна в зависимости от режима работы приемного устройства выводится или усредненный на интервале τ_n спектр мощности принимаемого радиосигнала $P_S(f_i)$, или спектр полной мощности шумового сигнала

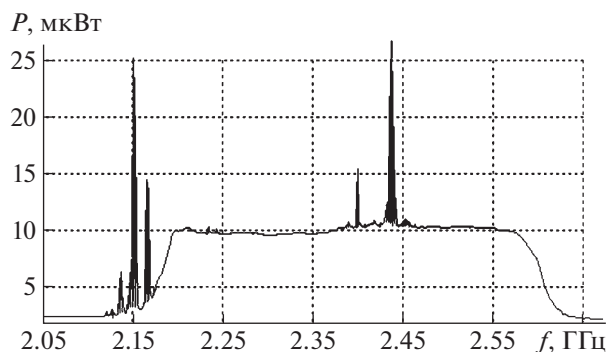


Рис. 4. Спектр широкополосного сигнала, принятого в диапазоне частот 2.2–2.6 ГГц, и радиопомех в нескольких участках полосы частот.

$P_X(f_i)$. Спектр сигнала $P_S(f_i)$ пересчитывается в спектр шумовых температур $T_S(f_i)$ и в спектральную плотность мощности радиосигнала $S(f_i)$. Эти спектры также можно отображать в графическом поле интерфейсного окна. При сканировании источников радиоизлучения можно отображать графики изменения спектральной плотности мощности S или среднего значения шумовой температуры сигнала T_S в текущем Всемирном координированном времени UTC.

Спектры принимаемых антенной радиопомех от систем связи четко просматриваются в виде выбросов на гладком спектре широкополосного сигнала (рис. 4). Хотя число и мощность радиопомех меняются во времени и при поворотах антенны радиотелескопа, это не имеет большого значения, так как в рассматриваемом радиометре исключаются помехи, действующие непосредственно во время проведения наблюдений. Чтобы исключить влияние помех на результаты радиометрических измерений, достаточно маркером установить границы исключаемых полос (подкрашенные участки полосы частот на экране монитора). Все дальнейшие процедуры: исключение спектральных компонентов на частотах радиопомех, вычисление мощности и шумовой температуры принимаемого сигнала — выполняются компьютером. Программное обеспечение предусматривает возможность исключения до 16 полос, занятых помехами.

При регистрации радиоизлучений в спектральных линиях приемное устройство не модулируется, но модулируется генератор шумового сигнала амплитудной калибровки, что необходимо для вычисления шумовых температур принимаемого сигнала T_{Si} на частотах f_i [4]. Пиковые значения и другие точки спектра, в которых нужно определять и регистрировать эти параметры, пользователь выбирает маркером. Используя полученные значения частот f_i , компьютер по пакету программ DOP [11] вычисляет доплеровские частоты, а затем отображает спектр $S(V)$ в шкале

лучевых скоростей относительно местного стандарта покоя V или шкале частот относительно местного стандарта покоя μ .

Программное обеспечение позволяет как отображать графики отдельных поляризаций, так и вычислять поляризационные характеристики излучения (параметры Стокса I и V, процент круговой поляризации). Отдельные детали спектра можно легко рассмотреть с помощью группы инструментов масштабирования графика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальный образец широкополосного анализатора спектров был испытан на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории “Светлое”. Радиометрические наблюдения проводились в диапазонах волн L и S, где имели место радиопомехи от систем мобильной радиосвязи, и в диапазоне волн X, свободном от радиопомех. Результаты измерений шумовых температур принимаемых широкополосных радиосигналов сравнивались с результатами, полученными штатным радиометрическим модулем ПРМ-2 радиотелескопа [12]. Модули были подключены параллельно к выходу радиоприемного устройства радиотелескопа РТ-32.

При наблюдениях в диапазоне частот 8.2–9.1 ГГц, где не было радиопомех, результаты измерений с помощью анализатора спектра и ПРМ-2 совпадали с расхождением не более 3%, что подтверждало одинаковую чувствительность и точность сравниваемых радиометрических модулей.

При наблюдениях в диапазонах волн L и S, где были радиопомехи, радиометр с рассматриваемым спектрально-селективным анализатором давал стабильные, хорошо совпадающие с расчетом результаты, в то время как недопустимо большой разброс имели результаты, получаемые от штатного модуля ПРМ-2, основанного на квадратичном детектировании аналогового шумового сигнала. Это иллюстрируют, например, результаты сканирования источника радиоизлучения NGC7027 в диапазоне волн 13 см, где присутствуют радиопомехи от систем мобильной связи. Разброс результатов, получаемых штатным модулем, был настолько большим, что невозможно было контролировать наведение антенны на источник и калибровать амплитуду принимаемого сигнала, тогда как спектрально-селективный модуль давал четкие, устойчиво повторяющиеся отклики на радиоизлучение источника и на импульсы амплитудной калибровки (рис. 5). При этом потери чувствительности радиометра со спектрально-селективным модулем, связанные с исключением полос частот, занятых радиопомехами, не превышали 8%.

Рассматриваемый анализатор спектра использовался при наблюдениях источника W49, генерирующего существенные потоки радиоизлучения в

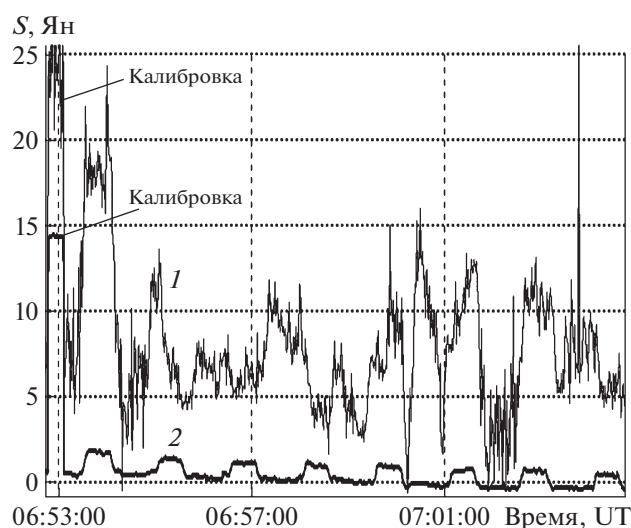


Рис. 5. Результаты сканирования источника NGC7027 в диапазоне длин волн 13 см при использовании рассматриваемого анализатора спектров (кривая 2) и радиометрического модуля ПРМ-2 (кривая 1).

диапазоне 18 см на частотах $f_{\text{изл1}} = 1665.402$ МГц и $f_{\text{изл2}} = 1667.359$ МГц. Спектр $S(\nu)$ W49 имеет 13 четко выраженных деталей для $f_{\text{изл1}} = 1665.402$ МГц и 14 деталей для $f_{\text{изл2}} = 1667.359$ МГц, что отражает весьма сложную структуру этого источника. В полосу анализа 32 МГц попадают и одновременно регистрируются радиоизлучения обеих частот. Одновременная регистрация деталей для разных частот $f_{\text{изл}}$ имеет преимущества по сравнению с последовательной регистрацией радиоизлучений узкополосным анализатором, так как позволяет выявить коррелированно изменяющиеся детали профиля, относящиеся к разным частотам излучения $f_{\text{изл}}$. Спектры принимаемых радиосигналов регистрировались с накоплением в течение 180 с и пересчитывались в шкалу частот относительно местного стандарта покоя $S(\mu)$ (рис. 6).

Сравнение стабильных деталей профиля, зарегистрированных рассматриваемым анализатором спектра, с деталями, полученными штатным анализатором спектров РТ-32, показало их совпадение с точностью не хуже 95% (относительная ошибка разности измерений в пределах 5%, что находится в пределах погрешностей измерений и калибровки).

АНАЛИЗАТОР СПЕКТРОВ НА П.Л.И.С. 7-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Алгоритмы вычисления спектров, проверенные в представленном выше анализаторе спектров на п.л.и.с. 4-го поколения, положены в основу разработки однокристалльного вычислителя спектров на п.л.и.с. 7-го поколения. Вычислитель спектров на п.л.и.с. XC7VX485T разрабатывается

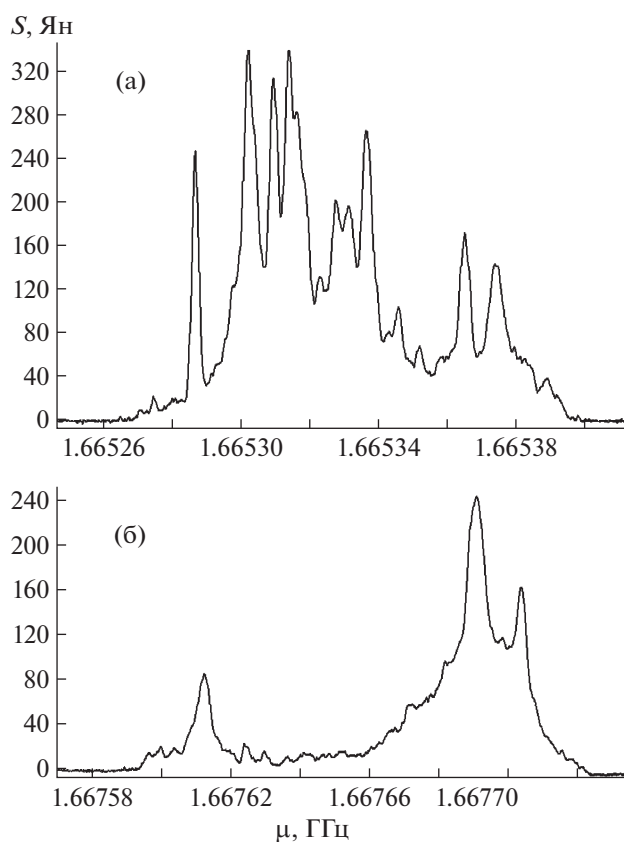


Рис. 6. Общий поток радиоизлучения (параметр Стокса I) в шкале частот относительно местного стандарта покоя, полученный для источника W49. а – $f_{\text{изл1}} = 1665.402$ МГц, б – $f_{\text{изл2}} = 1667.359$ МГц.

с целью повышения разрешающей способности по частоте и снижения стоимости изготовления анализатора. При использовании этой п.л.и.с. число компонентов спектра мощности можно увеличить до $N = 2^{16}$ при полосе анализа 1024 МГц и до $N = 2^{18}$ при полосах 256 и 32 МГц. При указанных полосах анализа интервалы частотного разрешения ν уменьшаются до 15.625 кГц, 3.906 кГц и 122 Гц соответственно.

Макет анализатора спектров собран на отладочной плате VC707 с п.л.и.с. XC7VX485T, в слот НРС FMC которой установлена мезонинная плата FMC126, содержащая генератор тактовой частоты 2048 МГц и а.ц.п. EV10AQ190. Предварительное лабораторное тестирование макета подтвердило расчетные параметры анализатора спектров. В настоящее время ведется разработка и отладка программного обеспечения макета на базе п.л.и.с. XC7VX485T.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образец широкополосного анализатора спектров, собранный на п.л.и.с. 4-го поколения, обес-

печивает радиометрические измерения в условиях воздействия радиопомех и регистрацию радиоизлучений в спектральных линиях с достаточно высокой разрешающей способностью по частоте. Образец используется на радиотелескопе РТ-32 при наблюдениях по астрофизическим программам.

Разработан экспериментальный образец однокристального анализатора спектров на п.л.и.с. ХС7VX485Т, разрешающая способность которого повышена в 8 раз при широких полосах анализа и в 4 раза (до 122 Гц) при полосе 32 МГц. Разработанные алгоритмы и программы вычислений в дальнейшем будут использоваться в многофункциональном модуле преобразования сигналов [13], который разрабатывается с целью модернизации приемно-регистрирующих комплексов радиотелескопов РТ-32.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кольцов Н.Е.* Патент РФ на изобретение № 2431852 С2. Класс МПК G01R 23/16. // БИ. 2009. № 25.
2. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е.* // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. LVIII. № 7. С. 577. doi 10.1007/s11141-015-9625-y
3. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е.* // ПТЭ. 2009. № 3. С. 160.
4. *Кольцов Н.Е.* Патент РФ на изобретение № 2316775 С1. Класс МПК G01R 23/16. // БИ. 2008. № 4.
5. *Ипатов А.В.* // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 7. С. 769. doi 10.3367/UFNr.0183.201307i.0769
6. *Иванов Д.В., Мардышкин В.В., Лавров А.С., Евстигнеев А.А.* // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 197.
7. *Кольцов Н.Е.* // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 2. С. 59.
8. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е., Федотов Л.В.* Патент РФ на полезную модель № 101842 U1. Класс МПК G01R 21/133 // БИ. 2012. № 34.
9. *Blahut R.E.* Fast algorithms for digital signal processing. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1985.
10. *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения М.: Мир, 1990.
11. *Gordon M.A.* // Methods in Experimental Physics. 1976. V. 12. Part C. P. 277.
12. *Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Крохалев А.В.* // ПТЭ. 2005. № 4. С. 66.
13. *Маршалов Д.А., Носов Е.В., Бердников А.С., Федотов Л.В.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 95.