

Усовершенствованная система регистрации радиоизлучения в спектральных линиях

© С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Проблема. В системе регистрации спектров космического радиоизлучения в спектральных линиях амплитуды компонентов вычисляемого спектра мощности калибруются по шумовой температуре импульсного пилот-сигнала, который генерируется модулируемым широкополосным генератором шума калибровки и вводится на вход приёмно-усилительного канала радиотелескопа. Для калибровки используется среднее значение шумовой температуры импульсов калибровки в широкой полосе промежуточных частот, которое измеряется предварительно радиометрическим устройством и считается постоянным во всей полосе промежуточных частот. Но реальная шумовая температура импульсов калибровки на частоте исследуемого сигнала может отклоняться от среднего значения из-за неравномерности мощности генератора шума калибровки в широкой полосе частот и неравномерности коэффициента его связи с приёмным каналом в этой полосе. Эти отклонения могут быть причиной значительных (до 30–40 %) ошибок при определении амплитуд компонентов спектра мощности и шумовых температур сигнала, так как шумовая температура импульсов калибровки является масштабирующим коэффициентом.

Цель. Целью статьи является разработка способа устранения ошибок определения амплитуд компонентов спектра исследуемого узкополосного сигнала, которые связаны с неравномерностью мощности импульсов калибровки в полосе промежуточных частот, а также разработка и испытания спектрометрического модуля, реализующего этот способ.

Метод. Для устранения ошибок амплитудной калибровки спектров узкополосного космического радиоизлучения, связанных с неравномерностью спектра мощности генератора шума калибровки, введён дополнительный канал вычисления широкополосного спектра мощности шумовых импульсов, работающий параллельно с узкополосным вычислителем спектра мощности принимаемого сигнала. По спектру мощности шумовых импульсов определяется истинное значение шумовой температуры импульсов калибровки на частоте принимаемого сигнала, которое затем используется при вычислении спектра узкополосного радиоизлучения.

Результат. Введение в систему регистрации узкополосного радиоизлучения дополнительного канала вычисления широкополосного спектра мощности шумовых импульсов калибровки позволило устранить влияние неравномерности и нестабильности мощности шумовых импульсов пилот-сигнала, значительно повысить точность амплитудной калибровки спектра исследуемого сигнала и повысить качество регистрации слабых нестационарностей радиоизлучения.

Ключевые слова: радиотелескоп, цифровое преобразование сигналов, регистрация спектров.

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

Статья поступила в редакцию 10.08.2020, принята к публикации 18.09.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Усовершенствованная система регистрации радиоизлучения в спектральных линиях // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 23–29.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.23-29>

Improvement of the Digital Registering System for the Radio Emission in Spectral Lines

S. A. Grenkov, N. E. Kol'tsov

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

Abstract

Problem. In the system for recording cosmic radio emission spectra in spectral lines the amplitudes of calculated power spectra components are calibrated with the noise temperature of the pilot signals. The pilot signals are generated by a modulated broadband noise generator (NG) and applied to the input of the receiving-amplifying channel of the radio telescope. For calibration the average noise temperature of calibration NG over a wide intermediate frequency (IF) range is used. The noise temperature of the calibration pulses is preliminarily measured by a radiometric device and is considered constant in a wide band of intermediate frequencies within which the tunable downconverter extracts the signal for investigation. But the actual noise temperatures spectrum of pilot signals experiences deviations from the nominal value due to the noise generator power fluctuations in a wide band and the irregularity of the generator coupling to the receiv-

ing channel in this band. These deviations can cause significant errors (up to 30–40 %) in determination of the amplitudes of signal power spectrum since the noise temperature of calibration pulse is used as a scaling factor.

Aim. The aim of this work is to develop a method for eliminating errors in determination the amplitudes of spectral components of the narrowband signal, which are caused by calibration pulses power fluctuations in the IF band. Also the purpose of the work is to develop and test a spectrometric module for implementation of this method.

Method. To eliminate errors in the amplitude calibration of the narrowband space radio emission spectra associated with the instability of the NGs power spectrum an additional channel for calculating the broadband spectrum is used. This channel is operating in parallel with the narrowband spectrum estimator. This makes it possible to measure the local variations of the NGs spectrum and take it into account when calculating the spectra of narrowband sources of cosmic radio emission.

Result. The introduction of an additional channel for calculating the broadband power spectrum of noise pulses entering the narrowband radio emission registration system makes it possible to eliminate the influence of the fluctuations of pilot-signal pulses and significantly improve the accuracy of amplitude calibration of the signal spectrum under study and the quality of registration for weak irregularities of source emission.

Keywords: radio telescope, digital signals transformation, spectrum registration.

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

Received August 10, 2020, accepted September 18, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Grenkov S. A., Kol'tsov N. E. Improvement of the digital registering system for the radio emission in spectral lines // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 23–29.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.23-29>

Введение

Большой объём информации о структурах и движениях газовых скоплениях (облаков) в космосе и о процессах формирования звёзд дают исследования радиоизлучения в спектральных линиях [1–2]. На наземных радиотелескопах дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн спектры мощности космического радиоизлучения в спектральных линиях сначала регистрировались многоканальными фильтровыми системами [3], а позднее — системами автокорреляционного типа [4], которые проще по конструкции, надёжнее и имеют более высокую разрешающую способность по частоте. Другие известные спектрометры, например, акусто-оптические [5], имеют недостаточные для дециметровых и сантиметровых длин волн разрешающую способность и динамический диапазон. Выпускаемые промышленностью цифровые спектрометры, использующие быстрое преобразование Фурье (БПФ), ещё не нашли широкого применения в системах регистрации излучения в линиях из-за их ограниченного быстродействия. В автокорреляционных системах, чаще всего применяемых на российских радиотелескопах, для амплитудной калибровки измеренных спектров применяются дополнительные радиометрические каналы измерения полной мощности шумового сигнала в полосе анализа ΔF . Это вдвое увеличивает время наблюдения источника, необходимое для накопления слабого узкополосного сигнала и измерения его спектра. При этом увеличиваются искажения профиля регистрируемого спектра, связанные с изменением доплеровской частоты вследствие вращения Земли, снижается точность измерения лучевых скоростей принимаемых сигналов.

Для радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» необходима быстродействующая система регистрации, которая должна измерять спектры мощности с высоким частотным разрешением в большом динамическом диапазоне и уменьшить до теоретического минимума необходимое время наблюдения. Это было достигнуто за счёт разработки высокоскоростных специализированных БПФ-вычислителей спектров на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [6–7] и применения способа амплитудной калибровки спектров по импульсным шумовым пилот-сигналам (без дополнительного радиометрического канала измерения мощности) [8]. Время, необходимое для приёма и накопления слабых принимаемых узкополосных сигналов, было уменьшено более чем в 2 раза по сравнению с применявшейся ранее аппаратурой. Это позволило уменьшить искажения (размывание) спектра исследуемого сигнала.

При калибровке спектра по шумовым импульсным пилот-сигналам необходимо знать значение их шумовой температуры T_x на частоте f_{si} исследуемого сигнала. Для генерации шумовых пилот-сигналов в современных радиоприёмных устройствах используются генераторы шума (ГШ) с небольшой шумовой температурой ($T_{\text{кал}} \sim 1$ К), которые выполнены на лавинно-пролётных диодах (ЛПД) и имеют недостаточно равномерный спектр мощности в широкой (до 1 ГГц) полосе промежуточных частот. Поскольку реальная шумовая температура пилот-сигнала на частоте f_{si} исследуемого радиосигнала может существенно отклоняться от номинального среднего значения $T_{x \text{ ср}}$, которое предварительно измеряется радиометрическим устройством, возникают ошибки в оценках амплитуд спектральных компонентов. В данной статье рассматриваются способы устранения этих ошибок.

Принцип действия системы регистрации с калибровкой спектра по шумовым пилот-сигналам

В диапазонах дециметровых и сантиметровых волн радиосигналы, принимаемые от источников космического излучения, в линиях имеют сравнительно узкие (не более нескольких МГц) спектры мощности, но важно исследовать их профили, которые могут быть достаточно сложными. Частоты F_i и амплитуды p_i в характерных точках (в пиках) вычисленного спектра мощности $P(F_i)$ несут информацию о лучевых скоростях принимаемых сигналов, о структуре и движениях составных частей наблюдаемого космического объекта.

Узкополосные сигналы, подлежащие регистрации, на радиотелескопах РТ-32 выделяются из широкополосного (до 1 ГГц) сигнала промежуточной частоты аналоговыми видеоконверторами радиоинтерферометрической системы преобразования сигналов (СПС) Р1002М. На новых радиотелескопах (например, РТ-13), где оцифровываются широкополосные сигналы с полосами $B_0 = 512$ или 1024 МГц, регистрируемые сигналы необходимо выделять и преобразовывать к полосе видеочастот цифровым способом. Известная система цифрового разделения широкополосного сигнала на сигналы с относительно узкими (например, 32 или 16 МГц) полосами с помощью полифазных фильтров (ПФФ) [9] не могла в полной мере обеспечить астрофизические наблюдения источников радиоизлучения в спектральных линиях, когда для получения высокой разрешающей способности приходится менять полосы анализа ΔF , сужая их примерно до 0.2 МГц. Чтобы проводить астрофизические наблюдения, была разработана цифровая система выделения сигналов [10], содержащая многоканальный комплексный ПФФ с фазовыми селекторами полосовых сигналов [11] на выходах и перестраиваемые по частоте цифровые видеоконверторы (ЦВК) на ПЛИС. Гетеродины ЦВК, в отличие от известных генераторов прямого синтеза частот [12], выполнены по оригинальной схеме, что обеспечивает не только спектрометрические наблюдения одиночного радиотелескопа, но и возможность работы радиотелескопа РТ-13 в составе РСДБ сети «Квазар-КВО» [13].

ЦВК выделяет и преобразует к низким частотам цифровой сигнал с полосой $\Delta F \leq 16$ МГц, в которой работает высокоскоростной БПФ-вычислитель спектров мощностей узкополосных сигналов (ВСМУ). Полоса анализа ΔF должна быть несколько шире спектра сигнала, чтобы при калибровке амплитуд спектра учитывать мощность собственных шумов радиотелескопа. ВСМУ конвейерным способом (при непрерывном считывании цифровых выборок сигнала) вычисляет мгновенные спектры мощности в полосе ΔF и накапливает их

на заданном интервале времени $t_{\text{нак}}$. Циклы вычисления мгновенных спектров синхронизированы с формированием меандра частоты $F_{\text{мод}}$, которым модулируется ГШ. Спектры, вычисленные на разных полупериодах модуляции ГШ, отдельно накапливаются в переключаемом двухканальном сумматоре спектров (рис. 1).

Чтобы исследования источника радиоизлучения в спектральных линиях были качественными, ВСМУ должен обеспечивать получение достаточно большого числа M спектральных компонентов в полосе анализа ΔF и высокой разрешающей способности по частоте, т. е. малого разброса частот $\nu = \Delta F/M$. Интервал частотного разрешения ν , определяющий точности измерения доплеровских смещений частот и лучевых скоростей принимаемого космического излучения, целесообразно уменьшать до десятых долей килогерца. Дальнейшее повышение разрешающей способности ($\nu < 0.1$ кГц) не даёт значительного эффекта, так как во время приёма и накопления сигнала его спектр размывается из-за вращения Земли [14].

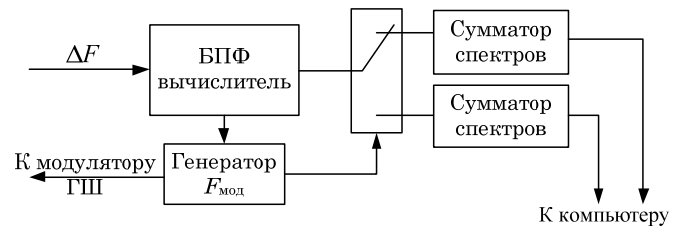


Рис. 1. Структура ВСМУ

Шумовые температуры принятого антенной сигнала на частотах f_{si} определяются по формуле [8]:

$$T_{Si} = 0.5 T_{\text{кал}} \left[\frac{(p_{2i} + p_{1i}) - (p_{2ш} + p_{1ш})}{p_{2ш} - p_{1ш}} \right], \quad (1)$$

где $p_{1ш}$ и $p_{2ш}$ — средние значения мощностей спектральных компонентов в участках полосы частот без исследуемого сигнала (шум радиотелескопа), которые получены при отсутствии импульсов калибровки и при их наличии; p_{1i} и p_{2i} — средние значения мощностей спектральных компонентов на частоте сигнала f_{si} при отсутствии и наличии импульсов калибровки. Вычисленный спектр мощности сигнала на входе ВСМУ пересчитывается в спектр шумовых температур $T_S(f_i)$ и в спектральную плотность мощности принимаемого антенной потока радиоизлучения $S(f_i)$ на частотах f_{si} .

Если спектр мощности импульсов калибровки равномерный в полосе B_0 и $T_{\text{кал}} = T_{\text{к ср}}$, то относительная среднеквадратическая погрешность измерения шумовой температуры сигнала

$$\delta_{Ti} = \frac{1}{q_i \sqrt{t_{\text{нак}} \nu}}, \quad (2)$$

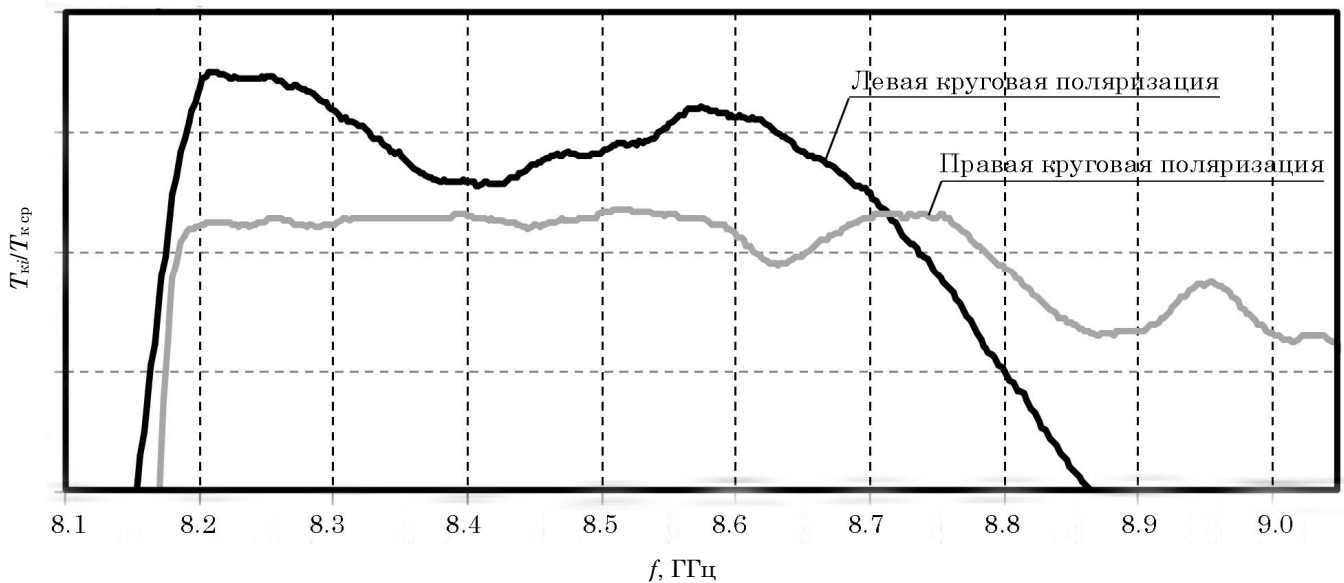


Рис. 2. Примеры спектров мощностей ГШ диапазона волн X

где $q_i = T_{si}/T_{ш}$ — отношение сигнал/шум на частоте f_{si} принимаемого радиосигнала. При этом шумовые температуры спектральных компонентов определяются с допустимой погрешностью $\delta_{доп}$ за время

$$t_{нак} \geq 1/v (q_i \delta_{доп})^2.$$

Поскольку неравномерность спектров мощностей ГШ в полосе частот приёма достигает 30–40 % (рис. 2), расчёты амплитуд спектральных компонентов сигнала могут сопровождаться значительными ошибками, зависящими от частот сигналов. Эти ошибки устраняются в рассматриваемой ниже системе регистрации спектров.

Структура системы регистрации спектров с повышенной точностью

Способ устранения ошибок амплитудной калибровки спектров, связанных с неравномерностью спектра мощности ГШ, основан на введении дополнительного вычислителя спектров мощности шумовых импульсов (ВСМШ) и замене в формуле (1) значения $T_{кал} = T_{к ср}$ на истинное значение шумовой температуры импульсов T_{ki} на частоте f_{si} .

Повышенную точность регистрации спектров космического радиоизлучения в линиях обеспечивает система, структура которой показана на (рис. 3). Система содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который оцифровывает широкополосный сигнал промежуточной частоты с тактовой частотой дискретизации F_d ($F_d = 2048$ или 1024 МГц), демультимплексор, понижающий тактовую частоту до значения $F_T < 550$ МГц, ПЛИС 6 или 7 поколения (например, XC7Z045) и управляющий компьютер, соединённый с центральным компьютером радиотелескопа. В ПЛИС сформиро-

ваны устройство выделения сигнала с полосой $\Delta F \leq 16$ МГц, ВСМУ, ВСМШ, устройство статистического контроля выборок входных сигналов, используемое для контроля режимов работы АЦП, и устройство управления с выходом на компьютер. Устройство выделения сигнала содержит 8-канальный распределитель выборок с квадратурными преобразователями сигналов на выходах, 8-канальный комплексный ПФФ с выходным коммутатором, фазовый селектор для преобразования комплексного полосового сигнала в пару действительных сигналов и ЦВК.

ПФФ и фазовый селектор в устройстве выделения сигнала обеспечивают согласование входного широкополосного канала с ЦВК, который перестраивается в ограниченной полосе частот (например, 128 или 64 МГц) [10]. Из входного демультимплексированного сигнала с полосой $B_0 = 0.5 F_d$ 8-канальный ПФФ с фазовым селектором выделяет сигнал с заууженной полосой $B_1 = B_0/8$ и пониженной тактовой частотой $F_T = F_d/8$. При полосе приёма $B_0 = 1024$ МГц ($F_d = 2048$ МГц) выделяется сигнал с полосой $B_1 = 128$ МГц при тактовой частоте $F_T = 256$ МГц, а в случае $B_0 = 512$ МГц ($F_d = 1024$ МГц) полоса $B_1 = 64$ МГц при $F_T = 128$ МГц. Из выбранного полосового сигнала ЦВК выделяет регистрируемый сигнал с полосой ΔF . ВСМУ, работающий с тактовой частотой $F_{T1} = 2\Delta F$, методом БПФ вычисляет мгновенные спектры мощности выделенного сигнала с заданной разрешающей способностью $v = \Delta F/M$.

При полифазной фильтрации сильно искажаются сигналы в узких участках спектра вблизи частот, кратных $0.5 F_T$. Возможность выделения узкополосных сигналов с любыми частотами

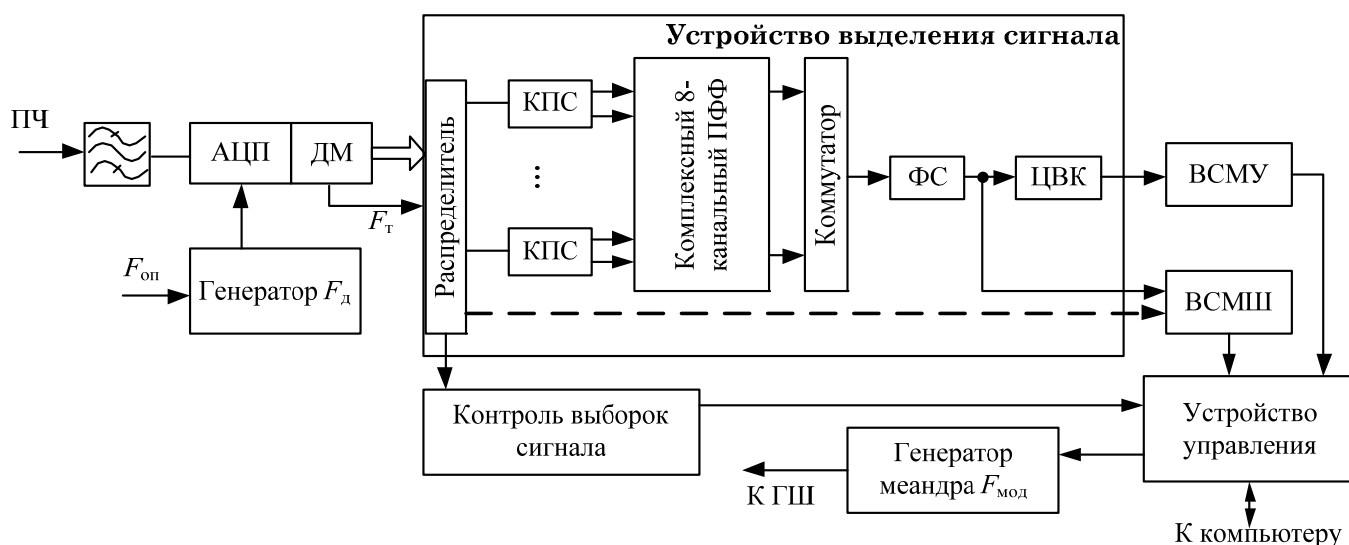


Рис. 3. Система регистрации радиоизлучения в спектральных линиях

(в пределах полосы B_0) обеспечивается с помощью квадратурных преобразователей сигналов на входах каналов ПФФ, которыми при необходимости можно сместить по частоте полосы сигналов на выходах каналов ПФФ.

ВСМШ, подключённый параллельно входу ЦВК, вычисляет спектры мощности шумовых пилот-сигналов в используемой полосе частот B_1 . При таком включении ВСМШ повышается разрешающая способность по частоте, уменьшаются затраты ресурсов ПЛИС и отпадает необходимость коррекции шкалы частот вычисленного спектра при изменении частоты гетеродина квадратурного преобразователя сигналов. Другой вариант — подключение ВСМШ к распределителю входного широкополосного сигнала (пунктирная линия связи на схеме). В этом варианте требуется больше ресурсов ПЛИС, снижается разрешающая способность по частоте и требуется уточнение частот f_{si} при изменении частоты гетеродина квадратурного преобразователя сигналов, но обеспечивается возможность радиометрических измерений во всей полосе B_0 . С помощью ВСМШ можно измерять также коэффициент усиления $K_{пр}$ приёмно-усилительного канала от входа малошумящего усилителя до АЦП и температуру собственных шумов радиотелескопа $T_{ш}$.

ВСМШ (рис. 4) содержит 8-канальный БПФ-вычислитель мгновенных спектров мощности и переключаемый двухканальный накопитель спектров, соединённый через управляющее устройство ПЛИС с компьютером. Каналы накопителя переключаются меандром частоты $F_{мод}$ синхронно с модуляцией ГШ. Поэтому отдельно накапливаются спектры смеси шумов радиотелескопа с принимаемым сигналом и той же смеси с добавленными импульсами калибровки. Разность

накопленных спектров даёт спектры мощности и шумовой температуры импульсов амплитудной калибровки. Из полученного спектра выбирается значение шумовой температуры T_{ki} для амплитудной калибровки спектра исследуемого сигнала.

Рассматриваемый способ амплитудной калибровки спектра исключает потери времени приёма сигнала, так как учитываются результаты накопления сигнала и при воздействии импульсов калиброванного шума, и в паузах между ними. Амплитуды компонентов спектра сигнала калибруются автоматически, без применения дополнительных радиометрических измерителей мощности, что позволяет уменьшить время приёма и накопления сигнала примерно в 2 раза по сравнению с широко распространёнными спектрометрами корреляционного типа [4]. Разработанный ВСМУ с предельно высоким быстродействием в части точности измерений и необходимого времени приёма сигнала имеет преимущества и перед системами, использующими промышленные БПФ-спектрометры с радиометрическими каналами калибровки спектров.

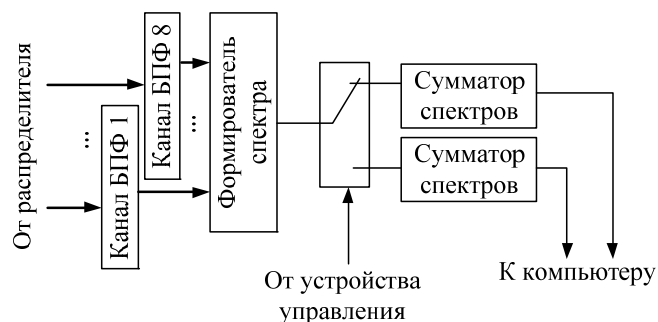


Рис. 4. Структура ВСМШ

Параметры системы регистрации спектров

С целью обоснования оптимальных параметров системы регистрации спектров были проведены расчёты необходимых ресурсов ПЛИС и определены минимальные значения ν_{\min} интервалов частотного разрешения в заданных полосах анализа B_0 для ПЛИС разных серий (рис. 5).

Если в ПЛИС семейства XC7 размещать только ВСМУ, то можно получить разрешающую способность около 100 Гц в полосе анализа 8 МГц (число спектральных компонент $M = 2^{16}$). Чтобы разместить в ПЛИС XC7Z045 все функциональные узлы схемы (рис. 3), для ВСМУ было принято $M = 2^{13}$. Для ВСМШ, где не требуется высокая разрешающая способность по частоте, установлено число спектральных компонент $N = 2^8$, что вполне допустимо, так как зависимость мощностей шумовых импульсов калибровки от частоты плавная без резких выбросов. В этом случае интервал частотного разрешения в спектре импульсов калибровки $w = B_1/N$. При $B_1 = 256$ МГц интервал частотного разрешения $w = 1$ МГц, а при $B_1 = 128$ МГц $w = 0.5$ МГц.

Программное обеспечение системы предусматривает установку полос анализа $\Delta F = 16, 8, 4$ и 1 МГц, которым соответствуют интервалы частотного разрешения $\nu = 1952, 976, 488$ и 122 Гц. Такой набор параметров позволяет проводить астрофизические наблюдения на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО», регистрируя с высоким качеством радиоизлучение в спектральных линиях в любом рабочем диапазоне частот.

Период вычисления мгновенных спектров в ВСМУ $\theta = 2M/F_{T1} = M/\Delta F$. При этом частота модуляции ГШ $F_{\text{мод}} = 1/\theta_{\text{max}}$, где m — число спектров мощности, вычисляемых в течение одного периода модуляции; $\theta_{\text{max}} = 8.192$ мс — наибольший период вычисления спектров (при полосе анализа $\Delta F = 1$ МГц). В данном случае принята частота модуляции $F_{\text{м1}} = 976.5625$ Гц и $m = 128$ при регистрации сигнала в полосе 1 МГц. При регистрации сигналов в более широких полосах число m

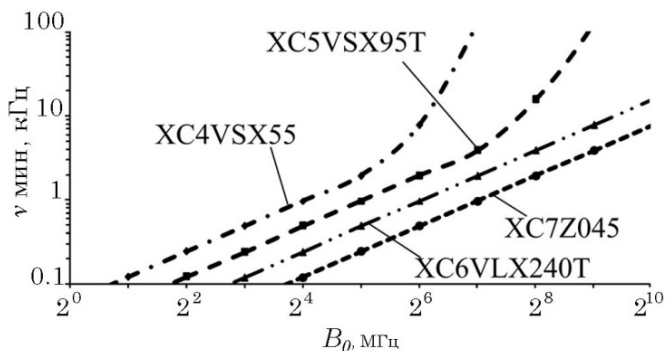


Рис. 5. Зависимости предельной разрешающей способности (ν_{\min}) от полосы анализа B_0 для ПЛИС разных серий

соответственно увеличивается (до $m = 2048$ при $\Delta F = 16$ МГц). В любом случае здесь гарантируется синхронизация процессов вычисления и суммирования спектров в ВСМШ и в ВСМУ, каналы сумматоров спектров обоих вычислителей переключаются одним и тем же меандром, причём при любых полосах анализа отношения полос $B_1/\Delta F$ и соответствующих тактовых частот — чётные числа (целочисленные степени 2).

В результате замены в формуле (1) средней шумовой температуры $T_{\text{ксп}}$ измеренным значением $T_{\text{ки}}$ исключаются большие (до 40 %) ошибки, связанные с неравномерностью спектра мощности импульсов калибровки в рабочей полосе частот приёмного канала. Но остаётся небольшая погрешность, обусловленная влиянием шумов радиотелескопа на результаты измерения температуры шумовых импульсов калибровки. ВСМШ по структуре и принципу действия подобен модуляционному спектрометрическому радиометру, причём $T_{\text{ксп}} \ll T_{\text{ш}}$. Следовательно, среднеквадратическую погрешность измерения шумовой температуры пилот-сигналов можно представить известной формулой:

$$\sigma_{T_{\text{к}}} \approx 2(T_{\text{ш}}/T_{\text{ксп}})\sqrt{2/B_1\tau},$$

где τ — время накопления шумовых сигналов в ВСМШ. Если, например, $T_{\text{ксп}} \approx 0.01 T_{\text{ш}}$ и $B_1 = 256$ МГц, то при $\tau = 8$ с амплитуды спектра принятого радиоизлучения калибруются с точностью $\delta_{T_{\text{к}}} = \sigma_{T_{\text{к}}}/T_{\text{ксп}} \approx 0.6\%$. Это значительно меньше ошибок калибровки, которые могли вносить ГШ с неравномерным спектром мощности при регистрации спектров применявшейся ранее системой [6] без встроенного ВСМШ.

Точность регистрации спектров рассматриваемой системой близка к потенциальной точности, которая определяется формулой (2).

Заключение

Испытания и моделирование лабораторного образца системы подтвердили возможность реализации всех расчётных параметров. В результате ведётся разработка образцов, которые заменят проработавшую много лет систему [6] и расширят возможности астрофизических исследований на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». Кроме того, рассмотренные здесь новые технические решения используются в разработке цифровой многофункциональной системы преобразования сигналов [15], предназначенной для модернизации радиотелескопов РТ-32 и оснащения новых радиотелескопов с небольшими антеннами.

В настоящее время (конец 2020 г.) оформляется заявка на получение патента на полезную модель, реализующую описанный в статье способ устранения ошибок калибровки спектра.

Благодарности

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

Литература

1. Кисляков А. Г., Разин В. А., Цейтлин Н. М. Введение в радиоастрономию. В 2 ч. Ч. I. М.: Физматлит, 1995. 212 с.
2. Рыжков Н. Ф. Аппаратурные методы радиоспектроскопии межзвездной среды // Известия САО АН СССР. Т. 6. 1974. С. 96–143.
3. Богод В. М., Гельфрейх Г. Б., Петров З. Е. и др. Автоматизированный солнечный спектрально-поляризационный комплекс ИКАР-16 на радиотелескопе РАТАН-600 // Астрофизические исследования. Известия САО АН СССР. 1985. Т. 20. С. 102–116.
4. Госачинский И. В., Желенков С. Р. Цифровой автокорреляционный анализатор спектра. СПб.: САО РАН, 1993. 21 с. (Препринт САО РАН № 96).
5. Есепкина Н. А., Прусс-Жуковский С. В., Аксенов Е. Т. и др. Возможности использования акустооптических спектрографов в радиоастрономии // Астрофизические исследования. Известия САО АН СССР. 1981. Т. 14. С. 145–153.
6. Система анализа спектров узкополосных космических радиоизлучений: пат. на полезную модель 64386 Российская Федерация, МПК G01R 23/16, G01R 23/18. / Гренков С. А., Ипатов А. В., Кольцов Н. Е.; патентообладатель ИПА РАН и ЗАО «РЭЛТА». № 2007103854/22; заявл. 31.01.2007; опубл. 27.06.2007, бюл. № 18.
7. Stanko S., Klein B., Kerp J. A field programmable gate array spectrometer for radio astronomy // *Astronomy & Astrophysics*. 2005. Vol. 436. P. 391–395.
8. Способ измерения энергетического спектра узкополосного космического радиоизлучения: пат. 2316775 Российская Федерация, МПК G01R 23/16 / Кольцов Н. Е.; патентообладатель ЗАО «РЭЛТА». № 2006115184/28; заявл. 02.05.2006; опубл. 10.02.2008, бюл. № 4.
9. Chen L., Unbehauen R., Luo J., et al. VLBI wide-band digital SSB converter based on poly-phase filter banks // *Electr. Eng. Verlag*. 2010. no. 92. P. 49–56.
10. Система преобразования и форматирования сигналов для радиоинтерферометра: пат. 175721 Российская Федерация, МПК H03D 7/00 / Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Федотов Л. В.; патентообладатель ИПА РАН. № 2017132248; заявл. 14.09.2017; опубл. 15.12.2017, бюл. № 35.
11. Носов Е. В. Видеоковертор с цифровой обработкой сигналов на видеочастотах для системы преобразования сигналов РСДБ-радиотелескопа // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 99–105.
12. Gentile K., Cushing R. A. A technical tutorial on digital signal synthesis. Norwood: Analog Devices, Inc. 1999. 123 p.
13. Цифровой гетеродин для видеоковертора: пат. 174149 Российская Федерация, МПК H03D 7/00, H03L 7/16 / Гренков С. А., Кольцов Н. Е.; патентообладатель ИПА РАН. № 2017115688; заявл. 03.05.2017; опубл. 04.10.2017, бюл. № 28.
14. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / пер. с англ. под ред. Л. И. Матвеевко. 2-е изд. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
15. 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.