

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 520.27

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-6-18>

Сравнение радиоинтерферометров с аналоговыми и цифровыми системами выделения регистрируемых сигналов

Н. Е. Кольцов^{1,2}, С. А. Гренков^{2✉}, Л. В. Федотов²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), Санкт-Петербург, Россия

✉ skynet81@yandex.ru

Аннотация

Введение. Радиотелескопами комплексов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) обычно регистрируются несколько сигналов с относительно узкими (до 32 МГц) полосами, которые выделяются видеоконвертерами из аналогового шумового сигнала промежуточной частоты (ПЧ) с полосами до 1 ГГц. При обработке данных применяется синтез полосы частот. На новых небольших радиотелескопах (например, РТ-13) оцифровываются широкополосные сигналы ПЧ. Возможность подключения радиотелескопа РТ-13 к РСДБ-комплексу "Квазар-КВО" и к международным РСДБ-сетям обеспечивает модуль цифрового выделения узкополосных сигналов, разработанный в 2019 г.

Цель работы. Определение точности измерения интерферометрической групповой задержки сигнала радиоинтерферометром с цифровым модулем выделения регистрируемых сигналов и сравнение чувствительностей интерферометров с аналоговыми и цифровыми системами выделения сигналов.

Материалы и методы. Рассчитываются потери чувствительности интерферометров с разными системами выделения регистрируемых сигналов. Сравняются точности многоканального интерферометра с синтезом полосы частот и интерферометра, регистрирующего цифровые широкополосные сигналы ПЧ без синтеза полосы. Результаты подтверждаются РСДБ-наблюдениями в обсерваториях комплекса "Квазар-КВО".

Результаты. При замене аналоговой системы выделения сигналов на цифровую потери чувствительности интерферометра немного снижаются. Точность измерения интерферометрической групповой задержки не меняется. Точность повышается при синтезе полосы частот, значительно превышающей ширину полосы ПЧ, и при цифровой регистрации широкополосных сигналов ПЧ. Определены условия и минимальные синтезируемые полосы, при которых точность интерферометра с регистрацией узкополосных сигналов может быть выше точности интерферометра с регистрацией широкополосных сигналов ПЧ.

Заключение. Решена задача совмещения радиотелескопов РТ-13 с РСДБ-сетями, где регистрируются сигналы видеочастот. Показана эффективность установки на радиотелескопах цифровых систем преобразования сигналов.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, системы преобразования сигналов, цифровые видеоконвертеры, точность интерферометра, синтез полосы частот

Для цитирования: Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Федотов Л. В. Сравнение радиоинтерферометров с аналоговыми и цифровыми системами выделения регистрируемых сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-6-18

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: Институт прикладной астрономии Российской академии наук.

Статья поступила в редакцию 26.11.2019; принята к публикации после рецензирования 28.02.2020; опубликована онлайн 29.04.2020

© Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Федотов Л. В., 2020



Comparison of Radio Interferometers with Analog and Digital Extraction of Recorded Signal

Nikolai E. Kol'tsov^{1,2}, Sergei A. Grenkov^{2✉}, Leonid V. Fedotov²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

✉skynet81@yandex.ru

Abstract

Introduction. Radio telescopes of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) networks usually record several signals with relatively narrow (up to 32 MHz) bands, which are extracted by means of base band converters (BBC) from an analog noise signal of an intermediate frequency (IF) with bands up to 1 GHz. When processing data, frequency band synthesis is used. At new small radio telescopes (for example, RT-13), directly wideband IF signals are digitized. An ability to connect the RT-13 radio telescope to the "Quasar" VLBI complex and to international VLBI networks provides by a digital narrow-band signal extraction module developed in 2019.

Aim. Determining the measuring accuracy of an interferometric group delay of a signal by a radio interferometer with a digital narrow-band signal extraction module and comparing the sensitivity of interferometers with analog and digital signal extraction systems.

Materials and methods. Sensitivity losses of interferometers with different systems for detecting recorded signals were calculated. The accuracy of a multi-channel interferometer with the synthesis of a frequency band and of an interferometer with recording of digital broadband IF signals without band synthesis was compared. The results were confirmed by VLBI observations in the observatories of the "Quasar" complex.

Results. When replacing the analog system of signal extraction with digital system the sensitivity losses of the interferometer were slightly reduced. The measurement accuracy of the interferometric group delay had not changed. Accuracy increased when digitally recording broadband IF signals and when synthesizing a frequency band significantly larger than the IF bandwidth. Conditions and minimum synthesized bands were determined under which the accuracy of the interferometer with the registration of narrowband signals can be higher than the accuracy of the interferometer with the registration of wideband IF signals.

Conclusion. The problem of combining RT-13 radio telescopes with VLBI networks with recording of video frequency signals was solved. The efficiency of the installation of digital signal conversion systems at radio telescopes was shown.

Keywords: very long baseline interferometry, data acquisition systems, digital base band converters, accuracy of the interferometer, frequency band synthesis

For citation: Kol'tsov N. E., Grenkov S. A., Fedotov L. V. Comparison of Radio Interferometers with Analog and Digital Extraction of Recorded Signal. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-6-18

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences.

Submitted 26.11.2019; accepted 28.02.2020; published online 29.04.2020

Введение. На радиотелескопах в сетях радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) широко используются многоканальные системы преобразования сигналов (СПС), которые из широкой (до 1 ГГц) полосы промежуточных частот (ПЧ) выделяют, преобразуют к видеочастотам и регистрируют в цифровой форме сигналы с относительно узкими (до 32 МГц) полосами ΔF [1, 2].

К этому классу относятся и 16-канальные СПС Р1002М [3], которыми оснащены радиотелескопы РТ-32 РСДБ-комплекса "Квазар-КВО" [4]. Из шумового сигнала ПЧ с полосой 0.1...1 ГГц сигналы с заданными полосами ΔF выделяются с помощью аналоговых квадратурных преобразователей частот (КПЧ) и цифровых селекторов сигналов боковых полос. Выделенные сигналы квантуются по

Сравнение радиоинтерферометров с аналоговыми и цифровыми системами выделения регистрируемых сигналов

Comparison of Radio Interferometers with Analog and Digital Extraction of Recorded Signal

амплитудам и форматируются по международному стандарту VDIF [5] или по формату VSI-H [6], после чего полученный поток данных наблюдений передается для обработки РСДБ-корреляторами [7, 8]. При РСДБ-наблюдениях по астрометрическим и геодезическим программам в полосе ПЧ обычно выделяют и регистрируют сигналы 5–8 частотных каналов с полосами ΔF 8 или 16 МГц, а при обработке данных применяется метод синтеза широкой полосы частот [9].

В последние годы основным направлением развития РСДБ становится переход к небольшим радиотелескопам с цифровыми системами регистрации широкополосных сигналов (от 0.5 до 1 ГГц) [10, 11]. Такие системы необходимы как для создания РСДБ-комплексов нового поколения [12, 13], так и для развития радиометрии [14]. Например, на 13-метровых РСДБ-радиотелескопах РТ-13 используется цифровая система преобразования широкополосных сигналов, восемь каналов которой регистрируют сигналы ПЧ с полосами $B_0 = 512$ МГц при частоте дискретизации $F_d = 1024$ МГц [11]. Обработка полученных каналами системы высокоскоростных потоков данных (2048 Мбит/с на канал) ведется специализированными программными РСДБ-корреляторами [15].

Чтобы интегрировать радиотелескопы с широкополосными каналами в действующие РСДБ-сети, где регистрируются и обрабатываются узкополосные сигналы видеочастот, необходимо из высокоскоростного цифрового сигнала ПЧ выделять на заданных частотах сигналы с относительно узкими полосами и преобразовывать их к видеочастотам ($0 \dots \Delta F$). Эту операцию могут выполнять цифровые модули на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), содержащие полифазные фильтры (ПФФ) и цифровые видеоконвертеры (ЦВК) [16].

Поток данных, формируемый таким модулем, по структуре и тактовой частоте не отличается от потока, получаемого в СПС Р1002М. В результате становится возможной работа радиотелескопа РТ-13, регистрирующего широкополосные сигналы, в РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" и международных РСДБ-сетях, где регистрируются узкополосные сигналы. В связи с этим необходимо выяснить, в какой мере замена аналоговой СПС модулем цифрового выделения сигналов может повлиять на чувствительность радиоинтерферометра

и точность измерений интерференционных групповых задержек принимаемого радиоизлучения т. Эта информация нужна для рационального планирования РСДБ-наблюдений с использованием разнотипных систем преобразования сигналов и для выбора опорных источников радиоизлучения. Она же полезна и для разработки многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов с полосами $B_0 = 512$ МГц ($F_d = 2048$ МГц), которая проводится с целью модернизации радиотелескопов РТ-32 и оснащения новых малогабаритных радиотелескопов.

В настоящей статье рассмотрено влияние инструментальных потерь чувствительности радиоинтерферометров с разными системами выделения регистрируемых узкополосных сигналов из широкой полосы ПЧ. Сравниваются чувствительность и точность измерения интерференционных групповых задержек сигналов для интерферометров с цифровым выделением регистрируемых узкополосных сигналов и с выделением сигналов каналами СПС Р1002М.

В связи с разработкой РСДБ-радиотелескопов со сверхширокополосными радиоастрономическими приемными устройствами (РПУ) [17, 18] и системами регистрации широкополосных сигналов [10, 11] вызывает интерес возможность синтеза полосы частот, превышающей полосу пропускания приемного канала (до 1 ГГц). Приемные устройства радиотелескопов РТ-13 [19] имеют по три приемных канала на каждый диапазон частот и на любую из двух круговых поляризааций волн, что позволяет синтезировать полосы частот шириной до 2.5 ГГц в диапазоне Х (7...9.5 ГГц) и до 6 ГГц в диапазоне К (28...34 ГГц). Поскольку эффективность такого синтеза еще не выяснена, интересно сравнить параметры многоканального интерферометра, в котором цифровым способом выделяются сигналы с узкими (до 16 МГц) полосами, из которых синтезируется широкополосный сигнал, с параметрами интерферометра, регистрирующего параллельно (без применения синтеза) до трех широкополосных (0.5 или 1 ГГц) сигналов.

Определение чувствительности интерферометров с разными системами выделения регистрируемых сигналов. Чувствительность радиоинтерферометра характеризуется отношением пика корреляционного отклика к среднеквадратическому отклонению (СКО) остаточного шума на выходе коррелятора. Для одноканального интерферо-

метра с полосой регистрации сигнала ΔF отношение сигнал/шум в пике корреляционного отклика определяется как

$$R_1 = \chi \sqrt{2q_1 q_2 \Delta F t_H},$$

где $\chi \leq 1$ – коэффициент, учитывающий потери чувствительности в приемно-регистрирующих каналах радиотелескопов и корреляторе интерферометра; $q = T_s / T_{ш}$ – отношение шумовой температуры (T_s) принимаемого сигнала к температуре собственных шумов ($T_{ш}$) радиотелескопа на входе РПУ; t_H – время наблюдения (сканирования) источника [8]. Подстрочными индексами 1 и 2 обозначены порядковые номера радиотелескопов интерферометра. РСДБ-измерения обычно проводятся при $R_1 > 7$.

Коэффициент аппаратурных потерь чувствительности представим произведением $\chi = \chi_B \chi_0$, где первый множитель показывает потери в широкополосных приемно-усилительных каналах и устройстве выделения регистрируемых сигналов видеочастот, а второй – потери в устройствах цифровой обработки и корреляции выделенных сигналов видеочастот.

Значение коэффициента χ_0 определяется в основном потерями амплитудного квантования цифровых выборок шумового сигнала (12 % при четырехуровневом квантовании или 36.3 % при двухуровневом квантовании), а также потерями при корреляционной обработке сигналов видеочастот, которые в совокупности составляют около 13 % [9]. Для радиointерферометров с узкополосными каналами, в том числе для комплекса "Квазар-КВО" с системами Р1002М, в первом приближе-

нии можно принять $\chi_0 \approx 0.76$ при четырехуровневом квантовании или $\chi_0 \approx 0.55$ при двухуровневом квантовании. Эти значения χ_0 остаются справедливыми и для интерферометра с цифровыми системами выделения сигналов, так как способы амплитудного квантования, форматирования и корреляционной обработки узкополосных сигналов остаются прежними.

Для оценки качества каналов выделения сигналов достаточно сравнить коэффициенты потерь χ_B для интерферометров с цифровыми системами выделения сигналов ($\chi_{Ц}$) и аналоговыми СПС Р1002М ($\chi_{ан}$).

На радиотелескопе РТ-32 РПУ соединено с СПС, размещенной в лабораторном корпусе, коаксиальной линией передачи, содержащей усилители мощности с корректорами неравномерности затухания в полосе ПЧ 0.1...1 ГГц (рис. 1). В СПС сигнал ПЧ распределяется по видеоконвертерам, каждый из которых содержит КПЧ с диодными смесителями и аналоговыми фильтрами нижних частот (ФНЧ) с полосами ΔF , пару аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифровой фазовый селектор сигналов (ФСС), разделяющий сигналы верхней и нижней боковых полос. Цифровые сигналы с полосами ΔF после четырехуровневого квантования амплитуд поступают в форматер данных регистрирующего терминала Mark 5B+ [20], откуда данные наблюдений транслируются в центр корреляционной обработки.

При расчете коэффициента $\chi_{ан}$ в интерферометре с СПС Р1002М учитываются потери, связанные с искажениями сигналов в приемно-усилительном канале от входа РПУ до АЦП в видеоконвертере СПС. В общем случае

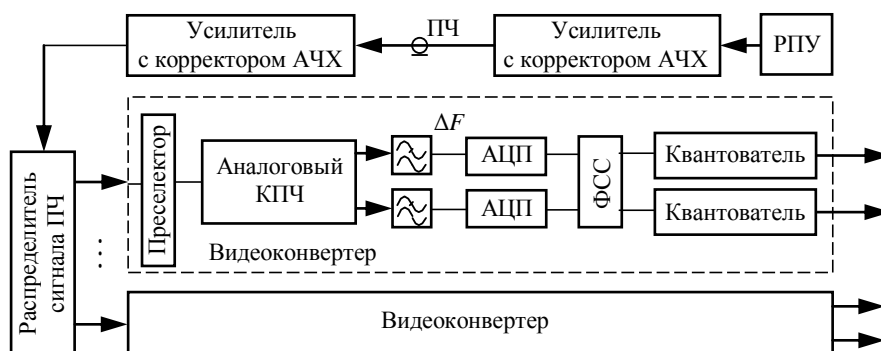


Рис. 1. Аналоговая система выделения регистрируемых сигналов на радиотелескопе РТ-32

Fig. 1. A system for extracting recorded signals at the RT-32 radio telescope

$$\chi_{\text{ан}} = \chi_0 \prod_i (1 - 0.01\eta_i),$$

где η_i – потери, относящиеся к i -му фактору, %. Потери около 3 % имеют место из-за искажений сигнала фазовыми шумами сверхвысокочастотных гетеродинов РПУ. Искажениями узкополосного сигнала в РПУ с широкой полосой пропускания можно пренебречь, так как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ) приемного канала формируются узкополосным ФНЧ видеоконвертера. В линии передачи сигналов ПЧ вследствие неравномерности АЧХ усилителей мощности и остаточного наклона АЧХ коаксиального кабеля (нескомпенсированной неравномерности затухания) сигналы с полосами ΔF в отдельных частотных каналах могут искажаться. Искажения АЧХ канала из-за наклона спектра приводят к потерям чувствительности интерферометра до 2 %.

Существенные потери чувствительности интерферометра могут появиться вследствие неидентичности АЧХ аналоговых фильтров в видеоконвертерах пары радиотелескопов интерферометра. Технологический разброс параметров фильтров, изменение температуры и старение элементов схемы также могут быть причинами колебательности и наклона АЧХ в полосе пропускания канала. В видеоконвертерах СПС Р1002М идентичность АЧХ и линейность ФЧХ каналов существенно повышены за счет цифровых фильтров, формирующих полосу ΔF , и цифровых ФСС, разделяющих сигналы боковых полос с развязкой более 42 дБ. Шумы зеркального канала практически исключены, а комбинационные помехи подавлены с помощью преселектора (переключаемых фильтров) на входе видеоконвертера. Нелинейные искажения сигналов в канале с цифровыми фильтрами также практически отсутствуют. Можно пренебречь и

шумами квантования аналогового сигнала при количестве разрядов АЦП не менее 8. Потери по указанным причинам составляют около 2 %. Небольшие (около 1 %) потери чувствительности могут возникать из-за шумов сигналов гетеродинов, СКО которых снижено до 2° [3]. Потери чувствительности интерферометра из-за искажений сигналов в СПС Р1002М составляют в совокупности примерно 3 %.

В целом для интерферометра с каналами аналогового выделения сигналов видеочастот можно принять коэффициент аппаратных потерь чувствительности $\chi_{\text{ан}} \approx 0.92\chi_0$.

В интерферометрах с системами цифрового преобразования широкополосных сигналов АЦП работают с частотой дискретизации (F_d) 2048 МГц (при полосе регистрации $B_0 = 1024$ МГц) или 1024 МГц (при $B_0 = 512$ МГц). Из полученного высокоскоростного (широкополосного) цифрового сигнала узкополосные сигналы выделяются с помощью сформированного в ПЛИС модуля ПФФ и ЦВК (рис. 2). Входной цифровой сигнал с F_d распределяется демультиплексором (ДМ) по N каналам ПФФ с понижением частоты до допустимого для ПЛИС значения тактовой частоты $F_T \leq 550$ МГц. Комплексные сигналы на выходах ПФФ разделяется на N вещественных сигналов с полосами $B_c = B_0/N$ селекторами (ФСС) на фазосдвигающих фильтрах. Из полученных полосовых сигналов ЦВК выделяют сигналы с заданными полосами ΔF . Выделенные сигналы квантуются по амплитуде и форматируются так же, как в каналах СПС Р1002М.

В радиоастрономической аппаратуре, выполненной на ПЛИС, удобно применять ЦВК, работающие с тактовыми частотами 128 или 256 МГц [11]. Они перестраиваются цифровыми гетеродинами [21] в полосах частот до 64 или 128 МГц соответственно.

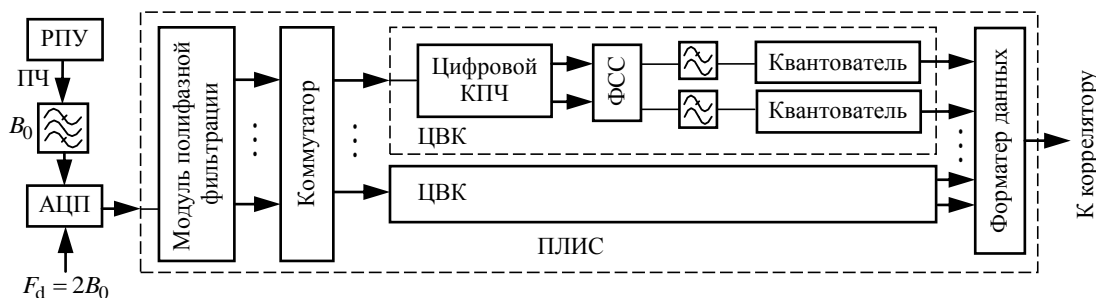


Рис. 2. Система выделения узкополосных сигналов из цифрового широкополосного сигнала

Fig. 2. System for extracting narrowband signals from a digital IF signal

При использовании гетеродинов с тактовой частотой 512 МГц [22] диапазон перестройки ЦВК расширяется до 256 МГц, но и в этом случае необходима предварительная фильтрация входного широкополосного сигнала.

При полифазной фильтрации вблизи нулевой частоты и частот, кратных F_T , сигналы искажаются. Искажения бывают и вблизи частот, кратных $0.5F_T$, где частично перекрываются спектры сигналов на краях соседних полос B_C . Чтобы модуль мог выделять без искажений сигналы с любыми частотами, в нем предусмотрены два N -канальных ПФФ – основной и дополнительный (рис. 3) [23]. В каналы дополнительного ПФФ входные широкополосные сигналы поступают через КПЧ. Гетеродинные квадратурные сигналы U_{\sin} и U_{\cos} имеют частоту $F_T/4$. При этом сигналы на выходах фазовых селекторов в каналах дополнительного ПФФ сдвигаются относительно выходных сигналов в каналах основного ПФФ на половину полосы.

На выходах основного N -канального ПФФ формируются комплексные сигналы

$$y_n(r) = \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \sum_{l=0}^{L-1} x[L(r-l) - (L-1)n] h_n(l) \right\} \times \exp(j2\pi ni/N), \quad (1)$$

где n – порядковый номер кода выходного сигнала; L – порядок фильтров весовых функций $h_n(l)$; j – мнимая единица. Весовая функция, влияющая на

распределение энергии между главным и боковыми лепестками спектральной функции выходного сигнала, имеет вид

$$h_n(r) = 0.5 \{ 1 - \cos[2\pi r/(LN)] \text{sinc}[r/(L - 0.5N)] \},$$

где $\text{sinc}(\zeta) = \text{sinc}(\zeta)/\zeta$.

На радиотелескопе РТ-13 цифровой преобразователь широкополосных сигналов ПЧ располагается рядом с РПУ и соединяется с ним неподвижно закрепленным коротким (менее 1.5 м) коаксиалом. Спектр сигнала на входе АЦП формируется широкополосным фильтром ПЧ. Здесь исключены потери чувствительности, связанные с искажениями сигналов в линиях передачи сигналов ПЧ, но остались потери (до 3 %) из-за искажений сигналов в преобразователях частот фазовыми шумами гетеродинов. Все фильтры в канале выделения сигналов цифровые, чем обеспечена высокая стабильность параметров приемно-регистрирующих каналов при движении антенны и изменениях внешних климатических условий. Поэтому гарантирована линейность ФЧХ и сведены к минимуму искажения формы АЧХ приемно-регистрирующего канала (перекося и колебательность АЧХ, отклонения по полосам пропускания, смещения частот настройки). Потери чувствительности из-за неидентичности АЧХ каналов интерферометра меньше 0.3 %. Боковые лепестки АЧХ канала ПФФ ослаблены на 30 дБ. За счет внеполосных шумов, проникающих по боковым лепесткам, отношение сигнал/шум в 8-канальном ПФФ снижается примерно на 0.7 %.

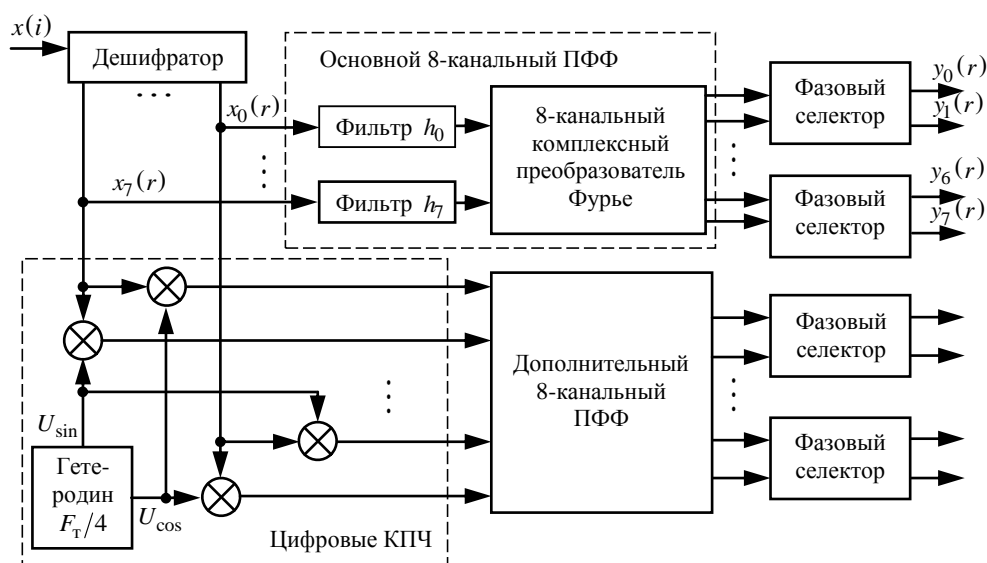


Рис. 3. Модуль предварительной фильтрации цифрового сигнала ПЧ

Fig. 3. IF digital signal pre-filtering module

В цифровой системе выделения сигналов имеют место незначительные потери из-за ограничений разрядностей (усечений) кодов в ПФФ, ФСС и ЦВК. При вычислениях по (1) перемножаются 8-разрядные коды входного сигнала $x(i)$ и 16-разрядные коды весовой функции $h_n(l)$, а $L=16$ произведений суммируются. Полученные на этом этапе вычислений коды усекаются до 9 разрядов. На этапе умножения этих кодов на 16-разрядные коды экспоненциальной функции и сложения $N=8$ полученных результатов коды выходного сигнала усекаются до 12 разрядов. В результате усечений кодов отношение сигнал/шум в канале ППФ снижается на 0.16 %. Уменьшение разрядности кодов до 14 в фазовом селекторе полосовых сигналов не вносит ощутимых потерь чувствительности. В гетеродине ЦВК разрядность кодов текущих фаз уменьшается до 10, что соответствует среднеквадратическому фазовому шуму гетеродинного сигнала 0.1° . Потери от такого фазового шума пренебрежимо малы. Амплитудные флуктуации гетеродинных сигналов, представленных 10-разрядными кодами, практически не влияют на отношение сигнал/шум в преобразователе частоты. Почти не меняется отношение сигнал/шум и в сигналах видеочастот на выходах КПЧ при ограничении их разрядности до 15. Суммарные потери чувствительности, вносимые цифровым модулем выделения узкополосных сигналов, не превышают 0.5 %.

Суммарное снижение отношения сигнал/шум в цифровом модуле существенно меньше потерь от искажений сигнала фазовыми шумами гетеродинов РПУ. С учетом всех потерь для интерферометра с цифровыми системами выделения узкополосных сигналов можно принять коэффициент потерь $\chi_{ц} = 0.96\chi_0$. Для интерферометра с одинаковыми антеннами и РПУ, но с разнотипными системами выделения узкополосных сигналов $\chi_p = 0.94\chi_0$.

Если заменить на радиотелескопах РТ-32 штатные СПС Р1002М рассматриваемыми модулями цифрового выделения узкополосных сигналов, то чувствительность интерферометра можно немного (до 4 %) повысить. Небольшое улучшение чувствительности слабо влияет на точность определения групповой интерференционной задержки τ принимаемого радиосигнала. При $R_1 > 7$

на точность больше влияют факторы, не связанные с системой регистрации сигналов, в том числе погрешности систем сопровождения по доплеровским частотам и эфемеридам, ошибки измерения групповых задержек сигналов в приемно-регистрирующих каналах радиотелескопов, расхождения шкал времени форматеров данных на радиотелескопах. Кроме того, при угловых и координатно-временных измерениях методами РСДБ необходимо вносить поправки, учитывающие состояние атмосферы, но точность этих поправок может оказаться недостаточной.

Радиотелескоп с цифровым модулем выделения сигналов может работать как в режиме многоканального интерферометра с регистрацией узкополосных сигналов, так и в режиме интерферометра, регистрирующего широкополосные сигналы ПЧ. При РСДБ-наблюдениях, проведенных на базе Зеленчукская–Бадары, сравнивались параметры штатного радиоинтерферометра комплекса "Квазар-КВО" (два радиотелескопа РТ-32 с СПС Р1002М) и интерферометра с разнотипными радиотелескопами (РТ-32 с СПС и РТ-13 с цифровым модулем выделения сигналов). Испытания подтвердили возможность совмещения в РСДБ-сети радиотелескопов с разнотипными системами преобразования сигналов и возможность работы радиотелескопа РТ-13 в РСДБ-сети "Квазар-КВО".

Оценка точности многоканального интерферометра с цифровой системой выделения сигналов. Для M -канального радиоинтерферометра с синтезом широкой полосы частот СКО вычисляемой коррелятором интерференционной задержки определяется как [8]

$$\sigma_{\tau}(M) = \frac{1}{2\pi\chi q B_3 \sqrt{2M\Delta F t_H}}, \quad (2)$$

где $q = \sqrt{q_1 q_2}$; B_3 – эффективная полоса частот; ΔF – полоса регистрируемых сигналов. В данном случае

$$B_3 = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (f_{0r} + f_{cp})^2},$$

где f_{0r} – среднее значение частоты узкополосного сигнала, выделяемого каналом с номером r ; $f_{cp} = 0.5(f_{01} + f_{0M})$. Формула (2), определяющая потенциальную точность интерферометра, выведена

для идеального интерферометра, у которого групповые задержки сигналов в приемно-регистрирующих каналах радиотелескопов одинаковы, шкалы времени точно совмещены и коррелятор абсолютно точен.

Частоты выделяемых сигналов в синтезируемой полосе частот ($B_{\text{синт}}$) при РСДБ-наблюдениях выбираются так, чтобы можно было экстраполировать фазы сигналов от одной частоты к следующей без неопределенности 2π и обеспечить построение линейной зависимости фаз регистрируемых сигналов от частоты с наибольшей точностью. В одном из рекомендуемых вариантов разнос частот между соседними каналами удваивается по мере увеличения номеров каналов r [8]. Минимальный частотный интервал $w = f_{02} - f_{01}$ выбирается так, чтобы в функции разрешения, вычисляемой коррелятором, не было дополнительных выбросов большой амплитуды, которые можно было бы спутать с основным пиком. При слабом сигнале ($q < 1$) можно принять $w \approx 4\Delta F$ и $B_3 \approx 0.4B_{\text{синт}}$ [9]. В этом случае в полосе пропускания РПУ $B_{\text{пр}} \approx 1$ ГГц достаточно разместить 5 каналов с полосами ΔF , чтобы синтезировать цифровой сигнал в полосе частот $B_{\text{синт}} = 15w + \Delta F \approx 61\Delta F$ ($B_{\text{синт}} = 976$ МГц при $\Delta F = 16$ МГц или 488 МГц при $\Delta F = 8$ МГц). На радиотелескопе РТ-13 первый вариант можно реализовать, используя один канал РПУ и два канала штатной цифровой системы регистрации сигналов с полосами $B_0 = 512$ МГц. Для второго варианта достаточно одного канала с полосой 512 МГц.

При синтезе полосы частот, не превышающей полосу ПЧ ($B_{\text{синт}} \leq B_0$), среднеквадратическая погрешность M -канального интерферометра $\sigma_\tau(M)$ всегда больше, чем погрешность одноканального интерферометра с полосой регистрации B_0 , определяемая в [9] как $\sqrt{12}/[2\pi\chi q B_0 \sqrt{2B_0 t_H}]$.

Если интерферометр содержит m параллельных каналов, регистрирующих широкополосные сигналы ПЧ, то после усреднения m результатов СКО вычисленной интерференционной групповой задержки будет

$$\sigma_{\tau B}(m) = \frac{\sqrt{3}}{\pi\chi q B_0 \sqrt{2mB_0 t_H}}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что при синтезе полосы частот в пределах полосы пропускания приемного канала ($B_{\text{синт}} \approx B_{\text{пр}}$) имеет место соотношение

$$\frac{\sigma_\tau(M)}{\sigma_{\tau B}(M)} = \frac{B_0}{B_3} \sqrt{mB_0/(12M\Delta F)} \approx \frac{B_0}{0.4B_{\text{пр}}} \sqrt{mB_0/(12M\Delta F)}. \quad (4)$$

По этой формуле можно определить минимальное значение синтезируемой полосы частот, при котором точность определения интерференционной задержки становится выше точности, получаемой интерферометром с широкополосными каналами без синтеза полосы.

Результаты исследований. Использование цифрового способа выделения узкополосных сигналов на радиотелескопах позволяет немного (примерно на 4 %) уменьшить потери чувствительности радиоинтерферометра, но это практически не влияет на точность измерения интерференционной групповой задержки сигнала. При замене аналоговых систем выделения узкополосных сигналов цифровыми точность многоканального радиоинтерферометра с синтезом полосы частот остается на прежнем уровне.

Как следует из (4), точность определения интерференционной задержки сигнала пятиканальным интерферометром с полосами $\Delta F = 8$ МГц при синтезе полосы частот $B_{\text{синт}} = B_0 = 512$ МГц будет в 2.5 раза ниже точности одноканального интерферометра с полосой 512 МГц. Точность пятиканального интерферометра с полосами $\Delta F = 16$ МГц при синтезе полосы частот $B_{\text{синт}} \approx B_{\text{пр}} \approx 1$ ГГц будет на 30 % ниже точности интерферометра с двумя широкополосными каналами, которые перекрывают полосу пропускания РПУ ($2B_0 \approx B_{\text{пр}}$).

Одним из направлений развития РСДБ (в рамках исследований по международным проектам VLBI 2010 и VGOS) является синтез полосы частот, значительно превышающей 1 ГГц. Облучатель антенны и трехканальные РПУ радиотелескопа РТ-13 с полосами пропускания $B_{\text{пр}} \approx 1$ ГГц [19] дают возможность синтезировать полосу частот до 2.5 ГГц в диапазоне волн X и до 6 ГГц в диапазоне K. Для этого достаточно трех каналов РПУ, четырех АЦП штатной системы регистрации сигналов с полосами 512 МГц и модуля цифрового выделения узкополосных сигналов (рис. 4).

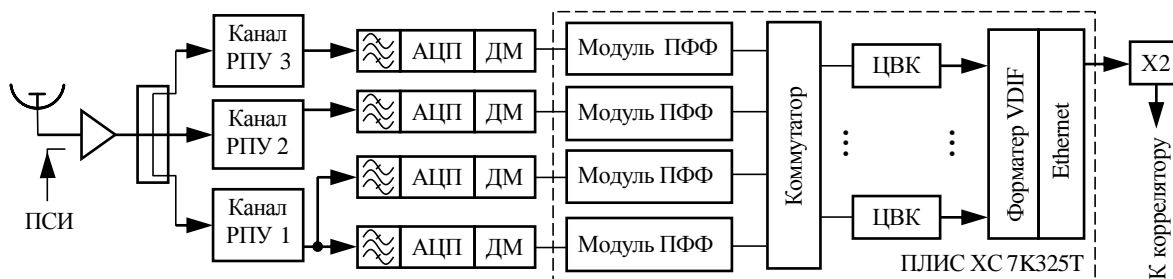


Рис. 4. Система цифрового выделения узкополосных сигналов из выходных широкополосных сигналов трех канального приемного устройства

Fig. 4. System for digitally extracting narrowband signals from output broadband signals of a three channel receiver

Устройство выделения сигналов выполнено в ПЛИС типа XC7K325T. После форматирования выделенных сигналов с полосами ΔF по стандарту VDIIF формируется поток данных Ethernet 10G, который через электронно-оптический трансивер X2 передается в сервер радиотелескопа и далее в центр корреляционной обработки данных.

Для синтеза полосы частот $B_{\text{синт}}$, превышающей полосу пропускания приемного канала 1 ГГц при работе с трехканальным РПУ радиотелескопа РТ-13, в ПЛИС сформированы 4 модуля ПФФ, 8 ЦВК с четырехуровневыми квантователями выборок и форматер VDIIF с выходом на волоконно-оптический канал передачи данных. Канал РПУ 1, выделяющий широкополосный сигнал в нижней части рабочего диапазона частот, соединен с двумя АЦП через фильтры с примыкающими полосами пропускания (1024...1536 и 1536...2048 МГц). К двум другим каналам РПУ достаточно подключить по одному АЦП с фильтром 1024...1536 МГц.

В частотном диапазоне X при синтезе полосы частот до 2.5 ГГц можно использовать 2 канала

РПУ с полосами пропускания 1 ГГц и 3 АЦП, оцифровывающих сигналы с полосами $B_0 = 512$ МГц, 3 модуля ПФФ и 7 АЦП (рис. 5, а). При $\Delta F = 8$ МГц и $w = f_{02} - f_{01} = 32$ МГц в диапазоне X выделяются и регистрируются до семи сигналов с полосами f_{01}, \dots, f_{07} . В этом случае шкала частот $f_x = f - f_{\text{min}}$ отсчитывается от нижней границы полосы приема $f_{\text{min}} = f_{01} - 0.5\Delta F$. При указанном ранее удвоении частотного интервала по мере увеличения номеров каналов регистрируемых сигналов для их выделения в пределах полосы пропускания одного канала РПУ ($B_{\text{синт}} \leq 1$ ГГц) достаточно пяти ЦВК (рис. 5, а).

В частотном диапазоне К можно синтезировать полосу частот до 6 ГГц при использовании трех каналов РПУ, четырех модулей ПФФ и семи ЦВК с полосами $\Delta F = 16$ МГц (рис. 5, б). При $w = 45$ МГц и аналогичной расстановке сигналов по частоте можно было бы увеличить число выделяемых сигналов до восьми, но из-за отсутствия четвер-

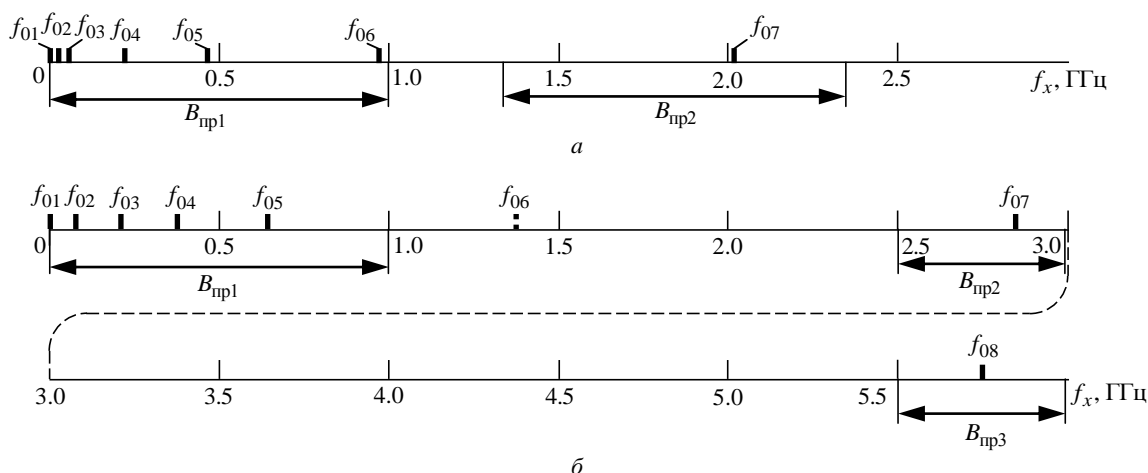


Рис. 5. Варианты распределения частот регистрируемых сигналов в частотных диапазонах X (а) и К (б)

Fig. 5. Variants of the frequency distribution of the recorded signals in the frequency bands X (а) and K (б)

того канала РПУ приходится ограничиться регистрацией семи сигналов (исключив сигнал на частоте f_{06}), что допустимо при синтезе полосы частот.

Положительный эффект от синтеза полосы частот может быть получен при условии $\sigma_{\tau 0}(M) < \sigma_{\tau B}(m)$, когда

$$B_{\text{синт}} > 0.72B_0 \sqrt{\frac{mB_0}{M\Delta F}}. \quad (5)$$

При использовании трех приемных каналов РПУ и четырех модулей ПФФ синтез полосы частот в восьмиканальном интерферометре с полосами $\Delta F = 8$ МГц теоретически может улучшить точность определения интерференционных задержек (по сравнению с тремя автономными широкополосными каналами) при синтезе полосы частот $B_{\text{синт}} > 5.1$ ГГц. Это возможно в частотном диапазоне К (28...34 ГГц). В случае использования двух каналов РПУ и трех модулей ПФФ условие (5) для восьмиканального интерферометра с полосами $\Delta F = 8$ МГц выполняется при $B_{\text{синт}} > 1.8$ ГГц. Этот режим можно реализовать в любом из рассматриваемых диапазонов (Х или К).

При синтезе очень широкой полосы частот ($B_{\text{синт}} > B_{\text{пр}}$) выравнивать задержки сигналов в приемных каналах радиотелескопа и обеспечивать высокую точность линеаризации функции фаз от частоты в процессе корреляционной обработки данных труднее. Поэтому ожидать значительного улучшения точности РСДБ-измерений многоканальным интерферометром с узкополосными каналами и синтезом полосы частот по сравнению с интерферометром, регистрирующим широкополосные сигналы ПЧ, по-видимому, не следует.

В случае выделения узкополосных сигналов только из полосы пропускания РПУ ($B_{\text{синт}} \leq B_{\text{пр}}$) чувствительность интерферометра и точность определения интерференционной задержки снижаются по сравнению с интерферометром, работающим в режиме регистрации широкополосных сигналов ПЧ. В режиме регистрации нескольких сигналов с узкими полосами ΔF в несколько раз снижается суммарная скорость информационного потока данных, передаваемых в центр корреляционной обработки данных, и появляется возможность подключения радиотелескопа к РСДБ-сетям, использующим корреляторы узкополосных сигналов [8]. Например, в интерферометре, регистриру-

ющем 8 сигналов с полосами 16 МГц (рис. 5, б), суммарная скорость информационного потока данных при четырехуровневом квантовании равна 512 Мбит/с. Интерферометр, регистрирующий 4 сигнала с полосами 512 МГц, дает поток с суммарной скоростью 8192 Мбит/с. При увеличении скорости потока данных повышаются требования к серверам радиотелескопов, линиям волоконно-оптической связи между радиотелескопами и центром обработки данных и РСДБ-корреляторам.

Обсуждение результатов. Результаты исследования позволяют сделать однозначный вывод о целесообразности установки на радиотелескопах РТ-32 и РТ-70 (Уссурийск) цифровых систем преобразования сигналов вместо штатных СПС Р1002М с аналоговым выделением узкополосных сигналов. При такой замене точность измерения интерференционных групповых задержек принимаемых сигналов практически не меняется, а чувствительность интерферометра даже немного (примерно на 4%) улучшается. Достаточно сложные каналы усиления и передачи широкополосных аналоговых сигналов ПЧ заменяются волоконно-оптическими линиями передачи цифровых сигналов. По эксплуатационным характеристикам и надежности цифровая система имеет несомненные преимущества.

Кроме того, при использовании разработанной цифровой системы появляется возможность работы радиотелескопов в режиме регистрации широкополосных сигналов ПЧ, что позволяет значительно повысить чувствительность интерферометра и расширить список доступных опорных источников, используемых при РСДБ-наблюдениях.

После завершения проводимой в настоящее время разработки антенных облучателей и сверхширокополосных приемных устройств для радиотелескопов РТ-32 появится возможность синтеза полосы частот шире 1 ГГц и повышения точности РСДБ-измерений.

Разработанный способ цифрового выделения узкополосных сигналов из полосы ПЧ используется в новой многофункциональной системе преобразования и регистрации сигналов, разрабатываемой с целью модернизации действующих радиотелескопов комплекса "Квазар-КВО" и оснащения новых малогабаритных радиотелескопов [24]. В этой системе предусмотрена возможность оперативной смены режимов радиоастрономических наблюдений.

Список литературы

1. Petrachenko W. T. VLBI Data Acquisition and Recorder Systems: a Summary and Comparison // IVS 2000 General Meeting Proc. Greenbelt, USA: Goddard space flight center, 2000. P. 76–85. NASA/CP-2000-209893. URL: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2000/petrachenko2.pdf> (дата обращения 07.03.2020)
2. Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S. The Network "Quasar": 2008–2011 // Measuring the Future: Proc. of the Fifth IVS General Meeting. SPb, 3–6 March 2008. M.: Nauka, 2008. P. 39–46.
3. Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов / С. А. Гренков, Е. В. Носов, Н. Е. Кольцов, Л. В. Федотов // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 60–66.
4. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook / N. Shuygina, D. Ivanov, A. Ipatov, I. Gayazov, D. Marshalov, A. Melnikov, S. Kurdubov, M. Vasilyev, G. Ilin, E. Skurikhina, I. Surkis, V. Mardyshkin, A. Mikhailov, A. Salnikov, A. Vytnov, I. Rakhimov, A. Dyakov, V. Olifirov // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, iss. 2. P. 150–156. doi: 10.1016/j.geog.2018.09.008
5. VLBI Data Interchange Format (VDIF) / A. Whitney, M. Kettenis, C. Phillips, M. Sekido // IVS 2010 General Meeting Proc. "VLBI2010: From Vision to Reality". Hobart, Australia, Febr. 7–14 2010. Greenbelt, USA: Goddard space flight center, 2010. P. 192–196. NASA/CP-2010-215864.
6. Whitney A. R. The VLBI Standard Interface Hardware (VSI-H) Interface Specification. URL: https://vlbi.org/wp-content/uploads/2019/03/VSI_H_paper_for_IVS_TOW.pdf (дата обращения 11.03.2020)
7. Жаров А. Е. Основы радиоастрометрии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 280 с.
8. Радиоинтерферометрический коррелятор для комплекса "Квazar-КВО" / И. Ф. Суркис, В. Ф. Зимовский, В. А. Шантырь, А. Е. Мельников // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 91–99.
9. Thompson A. R., Moran J., Swenson Jr. G. W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. 3rd Ed. Springer Open, 2017. 872 p. doi: 10.1007/978-3-319-44431-4
10. New Observing Modes for the DBBC3 / G. Tuccari, W. Alef, S. Dornbusch, R. Haas, K.-A. Johansson, H. Rottmann, A. Roy, M. Wunderlich // IVS 2018 General Meeting Proc. "Global Geodesy and the Role of VGOS – Fundamental to Sustainable Development". Longyearbyen, Norway, 3–8 July 2018. Greenbelt, USA: Goddard space flight center, 2018. P. 47–49. NASA/CP-2019-219039.
11. Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Федотов Д. В. Цифровые радиоастрономические системы регистрации сигналов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019. 155 с.
12. Ипатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 769–777. doi: 10.3367/UFNr.0183.201307i.0769
13. Многофункциональный цифровой преобразователь радиоастрономических сигналов с полосой до 512 МГц / Е. В. Носов, Н. Е. Кольцов, Л. В. Федотов, С. А. Гренков // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 2. С. 49–56. doi: 10.7868/S0032816217010256
14. Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Спектрально-селективный модуль радиометра с защитой от радиопомех // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 7. С. 769–777.
15. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах / И. Ф. Суркис, В. Ф. Зимовский, В. О. Кең, Я. Л. Курдубова, В. Ю. Мишин, Н. А. Миштина, В. А. Шантырь // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 8–16. doi: 10.1134/S0032816218060150
16. Пат. RU 176177 U1. МПК H03D 7/00 (2006.01). Система преобразования и регистрации широкополосных сигналов для радиоастрономического интерферометра / Л. В. Федотов, Н. Е. Кольцов; опубл. 11.01.2018. Бюл. № 2.
17. BRAND: a Very Wide-Band Receiver for the EVN / G. Tuccari, W. Alef, M. Pantaleev, J. Flygare, J. A. Lopez Perez, J. A. Lopez Fernandez, G. W. Schoonderbeek, V. Bezrukovs // Proc. of the 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Gothenburg, Sweden, May 2017. Molndal, Sweden: Billes Tryckeri AB, 2017. P. 81–83.
18. An Overview of the Japanese GALA-V Wideband VLBI System / S. Mamoru, T. Kazuhiro, U. Hideki, K. Tetsuro, T. Masanori, M. Yuka, K. Eiji, T. Hiroshi, H. Shingo, I. Ryuichi, K. Yasuhiro, H. Yuko, W. Kenichi, S. Tomonari, K. Junichi, T. Kenjiro, N. Kunitaka, T. Rumi, O. Yoshihiro, A. Tetsuro, I. Takatoshi // IVS 2016 General Meeting Proc. "New Horizons with VGOS". Johannesburg, South Africa, March 13–17, 2016. Greenbelt, USA: Goddard space flight center, 2016. P. 25–33. NASA/CP-2016-219016.
19. Трехдиапазонная приемная система для радиотелескопов с малыми антеннами / Д. В. Иванов, В. В. Мardyshkin, А. С. Лавров, А. А. Евстигнеев // Тр. ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 197–203.
20. Whitney A. The Mark 5B VLBI Data System // Proc. of the 7th Symp. of the European VLBI Network on New Developments in VLBI Science and Technology. Toledo, October, 12–15, 2004. Madrid: Observatorio Astronómico Nacional de España, 2004. P. 251–252.
21. Кольцов Н. Е., Гренков С. А. Цифровые видеоконверторы для радиоастрономических систем преобразования сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Вып. 5. С. 19–27.
22. Пат. RU 181253 U1. МПК H03D 7/00, H04B 1/16 (2006.01). Цифровой гетеродин на программируемой логической интегральной схеме / С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов; опубл. 06.07.2018. Бюл. № 19.
23. Пат. RU 188320 U1. МПК H04J 14/00, H04B 1/00, H04B 17/00, H04Q 1/20 (2006.01). Цифровое устройство выделения узкополосных сигналов из широкополосного / С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов, Л. В. Федотов; опубл. 08.04.2019. Бюл. № 10.

24. Extending "Quasar" VLBI-Network: VGOS-compatible Radio Telescope in Svetloe / E. Nosov, D. Ivanov, A. Ipatov, V. Mardyshkin, D. Marshalov, A. Mikhailov, I. Rakhimov, A. Salnikov, A. Vytnov // IVS 2018 General

Meeting Proc. "Global Geodesy and the Role of VGOS – Fundamental to Sustainable Development". Longyearbyen, Norway, 3–8 July 2018. Greenbelt, USA: Goddard space flight center, 2018. P. 12–16. NASA/CP-2019-219039.

Информация об авторах

Кольцов Николай Ефимович – доктор технических наук (1982), профессор (1985) кафедры радиоастрономии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), заслуженный деятель науки РФ (2003), главный научный сотрудник Института прикладной астрономии РАН. Автор более 140 научных работ. Сфера научных интересов – радиоастрономия; приборостроение; радиоинтерферометрия и радиометрия.

Адрес: Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), наб. Кутузова, д.10, Санкт-Петербург, 191187, Россия

E-mail: reltaspb@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9961-1965>

Гренков Сергей Александрович – кандидат технических наук (2009), научный сотрудник Института прикладной астрономии РАН. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – цифровые системы обработки радиоастрономических сигналов; системы компьютерного управления.

Адрес: Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), наб. Кутузова, д.10, Санкт-Петербург, 191187, Россия

E-mail: skynet81@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1577-9638>

Федотов Леонид Васильевич – доктор технических наук (2016), ведущий научный сотрудник Института прикладной астрономии РАН. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, системы преобразования сигналов, проектирование радиоастрономической аппаратуры.

Адрес: Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН), наб. Кутузова, д.10, Санкт-Петербург, 191187, Россия

E-mail: lprsfv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9872-4215>

References

1. Petrachenko W. T. VLBI Data Acquisition and Recorder Systems: a Summary and Comparison. IVS 2000 General Meeting Proc. Greenbelt, USA, Goddard space flight center, 2000, pp. 76–85. NASA/CP-2000-209893. Available at: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2000/petrachenko2.pdf> (accessed 07.03.2020)

2. Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S. The Network "Quasar": 2008–2011. Measuring the Future: Proc. of the Fifth IVS General Meeting. SPb, 3–6 March 2008. Moscow, *Nauka*, 2008, pp. 39–46.

3. Grenkov S. A., Nosov E. V., Fedotov L. V., Koltsov N. E. A Digital Radio Interferometric Data Acquisition System. Instruments and Experimental Techniques. 2010, vol. 53, no. 5, pp. 675–681. doi: 10.1134/S002044121005009X

4. Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshkin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V. Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook. Geodesy and Geodynamics. 2019, vol. 10, iss. 2, pp. 150–156. doi: 10.1016/j.geog.2018.09.008

5. Whitney A., Kettenis M., Phillips C., Sekido M. VLBI Data Interchange Format (VDIF). IVS 2010 General Meeting Proc. "VLBI2010: From Vision to Reality". Hobart, Australia, Febr. 7–14 2010. Greenbelt, USA, Goddard space flight center, 2010, pp. 192–196. NASA/CP-2010-215864.

6. Whitney A. R. The VLBI Standard Interface Hardware (VSI-H) Interface Specification. Available at: https://vlbi.org/wp-content/uploads/2019/03/VSI_H_paper_for_IVS_TOW.pdf (accessed 11.03.2020)

7. Zharov A. E. *Osnovy radioastrometrii* [Basics of Radio Astrometry]. Moscow, *Izd-vo Moskovskogo universiteta*, 2011, 280 p. (In Russ.)

8. Surkis I. F., Zimovsky V. F., Shantyr V. A., Melnikov A. E. A Correlator for the Quasar VLBI Network. Instruments and Experimental Techniques. 2011, vol. 54, no. 1, pp. 84–91. doi: 10.1134/S0020441211010106

9. Thompson A. R., Moran J., Swenson Jr. G. W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. 3rd Ed. Springer Open, 2017, 872 p. doi: 10.1007/978-3-319-44431-4

10. Tuccari G., Alef W., Dornbusch S., Haas R., Johansson K.-A., Rottmann H., Roy A., Wunderlich M. New Observing Modes for the DBBC3. IVS 2018 General Meeting Proc. "Global Geodesy and the Role of VGOS – Fundamental to Sustainable Development". Longyearbyen, Norway, 3–8 July 2018. Greenbelt, USA, Goddard space flight center, 2018, pp. 47–49. NASA/CP-2019-219039.

11. Koltsov N. E., Grenkov S. A., Fedotov D. V. *Cifrovye radioastronomicheskie sistemy registracii signalov* [Digital Radio Astronomy Signal Recording Systems]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2019, 155 p. (In Russ.)

Сравнение радиоинтерферометров с аналоговыми и цифровыми системами

выделения регистрируемых сигналов

Comparison of Radio Interferometers with Analog and Digital Extraction of Recorded Signal

12. Ipatov A. V. A New-Generation Interferometer for Fundamental and Applied Research. *Physics-Uspekh*. 2013, vol. 56, no. 7, pp. 729–737. doi: 10.3367/ufne.0183.201307i.0769
13. Nosov E. V., Kol'tsov N. E., Fedotov L. V., Grenkov S. A. A Multifunctional Digital Converter for Radio-Astronomy Signals with a Bandwidth of Up to 512 MHz. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 202–209. doi: 10.1134/S0020441217010250
14. Grenkov S. A., Kol'tsov N. E. Spectral-Selective Radiometer Unit with Radio-Interference Protection. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015, vol. 58, no. 7, pp. 520–528. doi: 10.1007/s11141-015-9625-y
15. Surkis I. F., Zimovsky V. F., Ken V. O., Kurdubova Y. L., Mishin V. Y., Mishina N. A., Shantyr V. A. A Radio Interferometric Correlator Based on Graphics-Processing Units. *Instruments and Experimental Techniques*. 2018, vol. 61, no. 6, pp. 772–779. doi: 10.1134/S0020441218060131
16. Fedotov L. V., Kol'tsov N. E. Pat. RF 176177 U1. МПК H03D 7/00 (2006.01). Broadband Signal Conversion and Recording System for Radio Astronomy Interferometer. Publ. 11.01.2018. (In Russ.)
17. Tuccari G., Alef W., Pantaleev M., Flygare J., Lopez Perez J. A., Lopez Fernandez J. A., Schoonderbeek G. W., Bezrukovs V. BRAND: a Very Wide-Band Receiver for the EVN. Proc. of the 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Gothenburg, Sweden, May 2017. Molndal, Sweden, Billes Tryckeri AB, 2017, pp. 81–83.
18. Mamoru S., Kazuhiro T., Hideki U., Tetsuro K., Masanori T., Yuka M., Eiji K., Hiroshi T., Shingo H., Ryuichi I., Yasuhiro K., Yuko H., Kenichi W., Tomonari S., Junichi K., Kenjiro T., Kunitaka N., Rumi T., Yoshihiro O., Tetsuro A., Takatoshi I. An Overview of the Japanese GALA-V Wideband VLBI System. IVS 2016 General Meeting Proc. "New Horizons with VGOS". Johannesburg, South Africa, March 13–17, 2016. Greenbelt, USA, Goddard space flight center, 2016, pp. 25–33. NASA/CP-2016-219016.
19. Ivanov D. V., Mardyshev V. V., Lavrov A. S., Evstigneev A. A. *Trjohdiapazonnaja prijemnaja sistema dlja radioteleskopov s malymi antennami* [Three-Band Receiving System for Radio Telescopes with Small Antennas]. *Trudy IPAN SPb.*, 2013, vol. 27, pp. 197–203. (In Russ.)
20. Whitney A. The Mark 5B VLBI Data System. Proc. of the 7th Symp. of the European VLBI Network on New Developments in VLBI Science and Technology. Toledo, October, 12–15 2004. Madrid, Observatorio Astronómico Nacional de España, 2004, pp. 251–252.
21. Kol'tsov N. E., Grenkov S. A. The Digital Down Converters for a Radio Astronomy Data Acquisition Systems. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2017, no. 5, pp. 19–27. (In Russ.)
22. Grenkov S. A., Kol'tsov N. E. Pat. RF 181253 U1. МПК H03D 7/00, H04B 1/16 (2006.01). Digital Local Oscillator on a Programmable Logic Integrated Circuit. Publ. 06.07.2018. (In Russ.)
23. Grenkov S. A., Kol'tsov N. E., Fedotov L. V. Pat. RF 188320 U1. МПК H04J 14/00, H04B 1/00, H04B 17/00, H04Q 1/20 (2006.01). Digital Broadband Signal Extraction Device. Publ. 08.04.2019.
24. Nosov E., Ivanov D., Ipatov A., Mardyshev V., Marshalov D., Mikhailov A., Rakhimov I., Salnikov A., Vytnov A. Extending "Quasar" VLBI-Network: VGOS-compatible Radio Telescope in Svetloe. IVS 2018 General Meeting Proc. "Global Geodesy and the Role of VGOS – Fundamental to Sustainable Development". Longyearbyen, Norway, 3–8 July 2018. Greenbelt, USA, Goddard space flight center, 2018, pp. 12–16. NASA/CP-2019-219039.

Information about the authors

Nikolai E. Kol'tsov, Dr. Sci. (Eng.) (1982), Professor (1985), Honored Scientist of RF (2001), the chief researcher of the Institute of Applied Astronomy of the RAS, Professor of the Department of Radio Astronomy of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 140 scientific publications. Area of expertise: radio astronomy, instrumentation, radio interferometry and radiometry.

Address: Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 10 Kutuzova Embankment, St Petersburg 191187, Russia

E-mail: reltaspb@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9961-1965>

Sergei A. Grenkov, Cand. Sci. (Eng.) (2009), Researcher of the Institute of Applied Astronomy of the RAS. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: processing techniques of radio astronomy signal; computer control systems.

Address: Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 10 Kutuzova Embankment, St Petersburg 191187, Russia

E-mail: skynet81@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1577-9638>

Leonid V. Fedotov, Dr. Sci. (Eng.) (2016), Leading Scientist of the Institute of Applied Astronomy of RAS. Author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: very long base interferometry, data acquisition systems, design of radio astronomy instrumentation.

Address: Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 10 Kutuzova Embankment, St Petersburg 191187, Russia

E-mail: lprsfv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9872-4215>