

Синхронизация и стабильность задержки сигналов в многофункциональной цифровой системе радиотелескопа

© С. А. Гренков, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

При проведении радиоинтерферометрических наблюдений в сигнальном тракте радиотелескопа необходимо учитывать аппаратную задержку. Стабильность этой задержки и возможные ошибки синхронизации сигналов играют существенную роль в обеспечении точности РСДБ-измерений. Одним из основных элементов сигнального тракта радиотелескопа является система преобразования сигналов. В настоящее время все радиотелескопы комплекса «Квazar-КВО» оснащаются новыми цифровыми многофункциональными системами преобразования сигналов, которые имеют расширенную (до 2 ГГц) рабочую полосу частот входных сигналов и соответственно — высокую скорость аналого-цифрового преобразования (4 Гбит/с). Задержка и синхронизация сигналов в такой системе требуют специального исследования.

В работе изучено влияние стабильности аппаратной задержки сигнала на точность радиоинтерферометрических измерений, обоснованы требования к указанной стабильности. Подробно рассмотрена синхронизация сигналов в многофункциональной цифровой системе, приведены соответствующие временные диаграммы, показаны особенности и преимущества технических решений по синхронизации сигналов. Описана методика и приведены результаты экспериментальных исследований задержки и фазовой стабильности сигналов в многофункциональной цифровой системе преобразования. При этом использованы как предусмотренные в системе возможности анализа сигналов, так и внешние стандартные измерительные приборы.

Исследования показали, что в отличие от использовавшихся ранее систем преобразования сигналов в новой многофункциональной системе процесс аналого-цифрового преобразования синхронизован с метками времени. Это позволяет исключить ошибки при синхронизации отсчетов входного сигнала внутри каждой секунды. Вносимая сигнальным трактом многофункциональной системы фазовая нестабильность на порядок меньше расчетной погрешности определения задержки сигнала при РСДБ-наблюдениях с использованием широкополосных каналов и практически не может влиять на результаты наблюдений. Величина задержки сигнала при его обработке в канале многофункциональной системы варьируется в широких пределах в зависимости от режима наблюдений и решаемых системой задач. Однако она остается вполне определенной и неизменной в течение сеанса наблюдений.

Ключевые слова: радиотелескоп, цифровая система преобразования сигналов, синхронизация, аппаратная задержка сигналов, измерения.

Контакты для связи: Федотов Леонид Васильевич (fedotov@iaaras.ru).

Для цитирования: Гренков С. А., Федотов Л. В. Синхронизация и стабильность задержки сигналов в многофункциональной цифровой системе радиотелескопа // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 14–23.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.14-23>

Synchronization and Delay Stability of Signals in the Multifunctional Digital Backend of Radio Telescope

S. A. Grenkov, L. V. Fedotov

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

Abstract

The instrumental delay in the signal path of the radio telescope must be taken into account when conducting radio interferometric observations. The stability of this delay, as well as possible signal synchronization errors, play an essential role in ensuring the accuracy of VLBI measurements. One of the main elements of the signal path of a radio telescope is a Data Acquisition System. Currently, all radio telescopes of the Quasar VLBI network are equipped with new digital Multifunctional Digital Backend (MDBE) systems, which differ in a wide operating frequency band of input signals (up to 2 GHz) and, accordingly, in the high speed of analog-to-digital conversion (4 Gbps). Delay and synchronization of signals in such a system require special research.

The article discusses the effect of instrumental signal delay stability on the accuracy of radio interferometric measurements, substantiated the requirements for this stability. Signal synchronization in the Multifunctional Digital Backend system is discussed in detail. The corresponding time charts are given. The features and advantages of technical solutions for synchronizing signals embedded in the considered multifunctional digital system are shown. The procedure is described and the results of experimental studies of delay and phase stability of signals in a multifunctional digital

conversion system are presented. At the same time, both the signal analysis capabilities provided in the system and external standard measuring devices are used.

Studies have shown that, unlike the previously used Data Acquisition Systems in the new multifunctional system, the analog-to-digital conversion process is synchronized with time stamps and starts again every second. This eliminates errors in synchronizing the input samples within each second. The phase instability introduced by the signal path of the multifunctional system is an order of magnitude less than the calculated error in determining the signal delay during VLBI observations using broadband channels and practically cannot affect the results of observations. The amount of signal delay during its processing in the channel of the multifunctional system varies widely depending on the observation mode and the tasks solved by the system. However, it remains quite definite and unchanged during the observation session.

Keywords: radio telescope, digital Data Acquisition System, synchronization, instrumental delay of signals, measurements.

Contacts: Leonid V. Fedotov (fedotov@iaaras.ru).

For citation: Grenkov S. A., Fedotov L. V. Synchronization and delay stability of signals in the Multifunctional Digital Backend of radio telescope // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 14–23.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.14-23>

Введение

Стабильность аппаратной задержки в сигнальном тракте радиотелескопа на интервале времени наблюдения источника радиоизлучения непосредственно влияет на точность определения радиоинтерферометрической задержки при радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) (Томпсон и др., 2003). Одним из основных элементов сигнального тракта является система преобразования сигналов, которая обеспечивает не только обработку сигналов для их дальнейшей регистрации, но и синхронизацию выходных данных. При этом фазовая стабильность формируемых в системе сигналов синхронизации играет существенную роль в обеспечении точности РСДБ-измерений. В настоящее время радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО» планируется оснастить новыми цифровыми многофункциональными системами (МСПС), которые предназначены для замены всей аппаратуры, обеспечивающей преобразование сигналов при радиоинтерферометрических, радиометрических, спектральных и других возможных наблюдениях (Nosov et al., 2021). Каждый из 12 каналов МСПС обеспечивает цифровую обработку сигналов с полосой частот до 2 ГГц, что требует высокой (фактически 4096 МГц) тактовой частоты аналого-цифрового преобразования и определяет повышенные требования к фазовой стабильности элементов системы, влияющих на задержку сигнала в каждом канале.

Известные работы по исследованию стабильности задержки сигнала в аппаратуре радиотелескопа посвящены либо оценке долговременной стабильности приемно-регистрирующей аппаратуры путем корреляционной обработки результатов наблюдений с последующим вычислением дисперсии Аллана для интерферометрической задержки (Векшин, Кен, 2019), либо исследованию температурной стабильности различных систем преобразования сигналов, используемых на радиотелескопах, и их элементов (Носов и др., 2019).

При проектировании МСПС были предусмотрены определенные программно-аппаратные инструменты контроля задержки и фазовой стабильности системы. Однако, вопрос о влиянии этих параметров на результаты РСДБ-наблюдений оставался открытым. Синхронизация сигналов в МСПС подробно не исследовалась.

Данная статья посвящена анализу процессов синхронизации сигналов в каналах МСПС, которые имеют свои особенности по сравнению с другими системами преобразования сигналов и непосредственно влияют на аппаратную задержку и фазовую стабильность сигнала при его преобразованиях. Приводятся также основные результаты теоретических и экспериментальных исследований задержки сигналов в МСПС и ее стабильности.

Влияние стабильности аппаратной задержки сигнала на точность радиоинтерферометрических измерений

Использование метода РСДБ в астрометрии или геодезии предполагает определение геометрической (интерференционной) задержки сигналов для каждой пары радиотелескопов интерферометра. Величина этой задержки известным выражением (Кононович, Мороз, 2011) связана с длиной базы радиоинтерферометра B , а также сферическими координатами источника излучения (склонение Ψ , часовой угол Λ) и вектора базы (склонение δ , прямое восхождение α):

$$\tau_g = \frac{B}{c} [\sin \Psi \sin \delta + \cos \Psi \cos \delta \cos(T_{зв.} - \alpha - \Lambda)], \quad (1)$$

где c — скорость света, а $T_{зв.}$ — звездное время по Гринвичу (в угловых единицах). Звездное время связано с всемирным временем UT (в секундах) через угловую скорость вращения Земли $\omega \approx 7.3 \cdot 10^{-5}$ рад/с: $T_{зв.} = 0.99727 \cdot \omega \cdot UT$. Найти связь между погрешностями определения τ_g и UT можно, используя метод линеаризации, продифференцировав выражение (1):

$$\Delta\tau_g \approx \frac{\partial\tau_g}{\partial UT} \Delta UT = \left[\frac{0.99727\omega B_3}{c} \cos\Psi \sin(T_{зв.} - \alpha - \Lambda) \right] \Delta UT,$$

где $B_3 = B \cos \delta$ — проекция базы на плоскость небесного экватора. Положим для определенности, что мы имеем дело с единичным наблюдением экваториального источника ($\Psi = 0$) на часовом угле, перпендикулярном экваториальной проекции базы ($T_{зв.} - \alpha - \Lambda \approx \pi/2$, при котором связь между $\Delta\tau_g$ и ΔUT максимальна. Тогда эту связь можно оценить приближенной формулой:

$$\Delta UT \approx \frac{c}{0.99727\omega B_3} \Delta\tau_g. \quad (2)$$

При длине проекции базы, например радиointерферометра Зеленчукская – Бадары, более 4400 км получаем $\Delta UT \approx 10^6 \Delta\tau_g$. Теоретическая формула (1) справедлива для единичного наблюдения и, кроме того, не учитывает различные поправки, связанные с ошибками координат радиотелескопов и источника, ошибками прецессии и нутации, ошибками из-за задержки сигнала в атмосфере, ошибками синхронизации шкал времени на радиотелескопах. Поправки всемирного времени определяются путем усреднения результатов большого числа наблюдений различных источников с учетом коррекции указанных погрешностей. Поэтому полученная выше оценка является весьма приблизительной. Однако она позволяет утверждать следующее: для того чтобы погрешность вычисления поправок всемирного времени не превышала 20 мкс (Иванов и др., 2021), необходимо, чтобы погрешность определения геометрической задержки была менее 20 пс.

Первичной оценкой геометрической задержки для каждого единичного наблюдения (скана) является вычисляемая РСДБ-коррелятором величина $\tau_c = \tau_g + \Delta\theta$ смещения по времени между сигналами, поступившими от радиотелескопов интерферометра. Это смещение зависит не только от геометрической задержки τ_g , но и от разности задержек в сигнальных трактах 1-го и 2-го радиотелескопов $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$. Среднеквадратическая погрешность (СКП) вычисления τ_c имеет расчетную теоретическую и аппаратную составляющие:

$$\sigma_{\tau_c} = \sqrt{\sigma_{\text{расч.}}^2 + \sigma_{\text{апп.}}^2}. \quad (3)$$

Расчетная СКП определения τ_c вычисляется по известной формуле для одноканального радиointерферометра (Томпсон и др., 2003):

$$\sigma_{\text{расч.}} \approx \frac{\sqrt{12}}{2\pi \cdot SNR \cdot \Delta f}, \quad (4)$$

где SNR — отношение сигнал-шум в корреляционном отклике, Δf — ширина полосы частот канала. При наблюдениях с использованием широкополосных каналов (например, $\Delta f = 1024$ МГц) и

среднем значении $SNR \approx 100$ по формуле (4) имеем $\sigma_{\text{расч.}} \approx 5.4$ пс.

Аппаратурная составляющая СКП $\sigma_{\text{апп.}} = \sqrt{\sigma_{\theta_1}^2 + \sigma_{\theta_2}^2}$, где σ_{θ_1} и σ_{θ_2} — среднеквадратические отклонения (СКО), характеризующие стабильность задержки в сигнальных трактах радиотелескопов интерферометра. При этом речь идет именно о кратковременной стабильности, так как на корреляторе каждый скан обрабатывается отдельно для определения интегральной задержки на этом скане. Поэтому требуется, чтобы на интервале времени одного скана (обычно не более 1–2 минут) задержки в сигнальных трактах радиотелескопов интерферометра были стабильными. При использовании в них одинаковой аппаратуры (радиоастрономических приемников и МСПС), что предусмотрено, например, на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО», $\sigma_{\text{апп.}} = \sigma_{\theta} \sqrt{2}$. Считается, что аппаратная нестабильность задержки σ_{θ} в каждом радиотелескопе должна быть, по крайней мере, в 4 раза меньше, чем допустимая погрешность измерения задержки сигнала радиointерферометром (Corey, 2006) и чтобы сократить указанную погрешность, например, до 20 пс, σ_{θ} не должна превышать 5 пс.

Синхронизация сигналов в МСПС и ее влияние на стабильность задержки в канале системы

На стабильность аппаратной задержки сигналов в МСПС влияет целый ряд факторов, в том числе состав (структура) цепей и узлов, через которые передается входной сигнал и сигналы синхронизации, температурные коэффициенты, режимы работы этих узлов и др. (Носов и др., 2019). Кроме этого, указанная стабильность непосредственно связана с синхронизацией сигналов в системе, которая заключается в однозначной маркировке каждого отсчета входного сигнала в соответствии с поступающими на вход системы сигналами опорной частоты (100 МГц) и шкалы времени радиотелескопа (1 Гц). Синхронизация сигналов в МСПС осуществляется по командам управляющего компьютера и включает в себя два этапа. При начальной установке параметров системы производится синхронизация синтезатора тактовых частот в модуле синхронизации и управления (МСУ) и синхронизация аналого-цифровых преобразователей (АЦП) во всех каналах. Перед началом сеанса наблюдений осуществляется:

— синхронизация внутренних меток времени сначала в МСУ (импульсов 1 PPS), а уже от них — в каждом канале, что занимает по времени до 5 секунд;

— синхронизация внутренней шкалы времени МСПС путем установки номера текущей секунды в соответствии со шкалой времени радиотелескопа так, чтобы число секунд на внутренних часах МСУ

и всех каналов МСПС совпадало с текущим значением времени на радиотелескопе.

Маркировка отсчетов входного сигнала в каждом канале МСПС состоит в установке взаимно однозначного соответствия между полученными в результате аналого-цифрового преобразования отсчетами сигнала и моментами времени

$$t_i = N_0 N_{PPS} T + n_i T, \quad (5)$$

где N_0 — число секунд после начала регистрации сигнала от данного конкретного источника радиополучения (начала скана), N_{PPS} — число периодов T тактовой частоты дискретизации сигнала $f_T = 4096$ МГц, укладывающихся на периоде следования меток времени 1 PPS, n_i — номер отсчета сигнала. Момент начала скана определяется командой от системы управления радиотелескопом и не зависит от МСПС. Поэтому для дальнейшего анализа можно считать, что это начальный момент времени $t = 0$. К ошибкам синхронизации могут приводить: нестабильность периода сигнала тактовой частоты T , которая полностью определяется фазовым шумом синтезатора тактовых частот, а также возможные флуктуации N_{PPS} в течение сеанса наблюдений. Однако такие флуктуации практически исключены принятым в МСПС способом формирования внутренней шкалы времени путем деления тактовой частоты f_T . После получения команды на синхронизацию первым поступившим от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа импульсом 1 Гц все счетчики в синтезаторе тактовых частот обнуляются. После этого метки времени 1 PPS внутренней шкалы времени МСПС формируются путем деления частоты сигнала, вырабатываемого синтезатором. Поэтому задержка и нестабильность фронтов поступающих в дальнейшем на вход МСПС импульсов 1 Гц уже не влияют на синхронизацию сигналов в системе.

В соответствии с принятым в МСПС для регистрации сигналов форматом VDIF (Whitney at al., 2010) после цифровой обработки отсчетов сигнала в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) последовательность 2-битовых отсчетов упаковывается в кадры по M отсчетов в каждом (по умолчанию $M = 20480$, но может быть установлено и другое значение). В заголовке кадра указывается его номер на текущем секундном интервале и время в секундах на момент формирования первого отсчета в кадре. Это дает возможность при распаковке данных в корреляторе на каждом скане восстановить последовательность отсчетов в соответствии с выражением (5).

За формирование сигналов тактовых частот для всех каналов — модулей цифрового преобразования сигналов (ЦПС) и внутренней шкалы времени в МСПС — отвечает МСУ (рис. 1). В нем

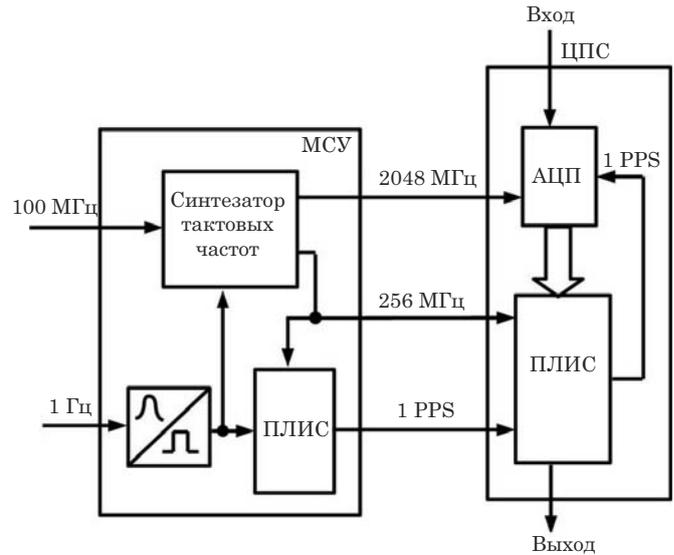


Рис. 1. Структурная схема синхронизации МСПС

с привязкой по фазе к внешнему сигналу опорной частоты 100 МГц формируются сигналы тактирования АЦП с частотой 2048 МГц и цифровой обработки сигналов в ПЛИС с частотой 256 МГц.

Для этого используется синтезатор тактовых частот на микросхеме LTC6951, которая представляет собой схему фазовой автоподстройки частоты (LTC6951, 2023) с низким уровнем фазового шума. Типовое среднее квадратическое значение дрожания фазы (джиттера) сигнала на выходе синтезатора (без учета шумов внешнего сигнала опорной частоты 100 МГц) составляет 115 фс.

Метки времени 1 PPS внутренней шкалы времени МСПС формируются из сигнала тактовой частоты 256 МГц с привязкой по фронту к внешним импульсам 1 Гц. Затем они вместе с сигналами 2048 МГц и 256 МГц распределяются по всем каналам системы (рис. 2). Так как при передаче от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа до МСПС импульсы 1 Гц могут искажаться, на входе МСУ предусмотрено формирование крутых (длительностью не более 0.6 нс) фронтов этих импульсов с помощью компаратора АСМР605 (АСМР605, 2023). Поэтому на вход ПЛИС импульсы 1 Гц поступают с задержкой $\tau_1 \approx 1.6$ нс. Общий сдвиг τ_2 шкалы времени МСПС относительно внешних импульсов 1 Гц теоретически не должен превышать одного периода (3.9 нс) тактовой частоты 256 МГц работы ПЛИС.

Аналого-цифровое преобразование сигнала в каналах МСПС осуществляется в высокоскоростной 4-ядерной микросхеме АЦП EV10AG190a (EV10AG190, 2023), в которой реализован метод временного чередования опросов АЦП (Кольцов, 2009). В режиме максимального быстродействия (для полосы частот сигнала 2 ГГц) в процессе работы осуществляется поочередный опрос ядер

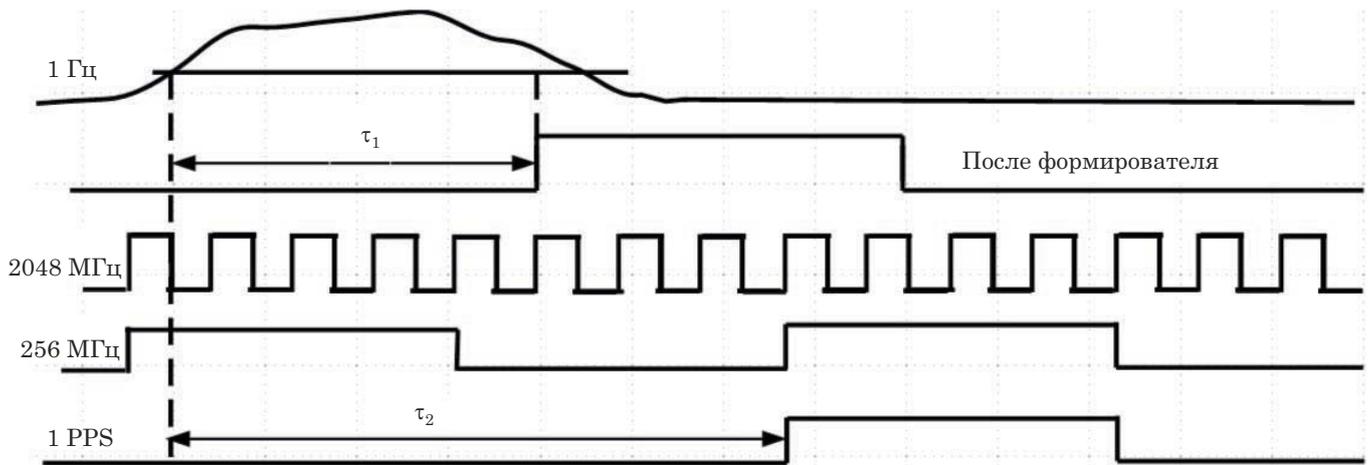


Рис. 2. Временные диаграммы синхронизации шкалы времени МСПС

АЦП, при котором на первый план выходят вопросы синхронизации их работы. Все 4 ядра аналого-цифрового преобразования (А, В, С, D) работают параллельно и синхронизируются внешними по отношению к микросхеме импульсами CLK с частотой 2048 МГц и периодом следования T_{CLK} , а также 1 PPS с периодом следования 1 с (рис. 3). Для этого внутри микросхемы из CLK вырабатываются собственные сигналы синхронизации (SYNC) и сигналы тактирования ядер АЦП (Такт АЦП). Чтобы исключить ошибки синхронизации в микросхеме предприняты специальные меры.

Внутренний сигнал SYNC переходит в активное состояние с задержкой на один период T_{CLK} по переднему фронту импульса CLK, но только при наличии логической «1» на входе 1 PPS. При этом все внутренние счетчики сбрасываются и тактовые сигналы (А, В, С, D) переходят в исходное состояние, а взятие отсчетов входного аналогового сигнала блокируется. Предусмотрена возможность расширения импульса SYNC при начальной калибровке АЦП на целое число тактов Y , что может потребоваться при совместном использовании нескольких микросхем EV10AG190a. После того как внешний сигнал 1 PPS перешел в состояние логического «0», по переднему фронту первого появившегося на входе импульса CLK запускается тактирование ядер АЦП. Формируются четыре тактовых сигнала с периодом следования $2T_{CLK}$, привязанных по фазе к импульсам CLK, но сдвинутых друг относительно друга на половину T_{CLK} . Это позволяет за 2 периода T_{CLK} оцифровывать 4 отсчета входного аналогового сигнала. То есть фактическая частота взятия отсчетов сигнала равна 4096 МГц. Таким образом, в АЦП предусмотрена синхронизация импульсами 1 PPS так, что с началом каждой секунды взятие выборок входного сигнала начинается заново. В качестве сигнала

1 PPS используются метки времени внутренней шкалы времени МСПС.

На выходе АЦП формируются цифровые потоки данных А, В, С, D, каждый из которых сопровождается своим сигналом готовности данных DR. Чтобы избежать сбоев синхронизации при передаче в ПЛИС этих потоков, необходимо не только выровнять фазы четырех импульсных последовательностей DR, но и синхронизовать их с импульсами тактирования работы ПЛИС 256 МГц. Эта операция производится в МСПС по команде синхронизации АЦП каждый раз перед началом сеанса наблюдений после синхронизации синтезатора тактовых частот. Процесс подбора задержек (которые много меньше периода тактовой частоты 256 МГц) для синхронизации цифровых потоков А, В, С, D может занимать несколько секунд. Критерием оптимальной синхронизации при передаче цифровых потоков в ПЛИС является нормальный закон распределения в каждой выборке из 4096 отсчетов шумового сигнала, поступивших из АЦП в ПЛИС. Хотя оптимальные для конкретной прошивки ПЛИС значения задержек запоминаются в ней, переход к другому режиму работы МСПС и соответствующая смена прошивки могут вызвать сбой синхронизации. Чтобы этого не произошло, перед началом нового сеанса наблюдений или по отдельной команде оператора предусмотрена повторная синхронизация АЦП.

Задержки сигнала при аналого-цифровом преобразовании обусловлены конструкцией микросхемы EV10AG190a и технологией ее изготовления (EV10AG190, 2023). Технологическая задержка за запуска тактирования ядер АЦП составляет $4T_{CLK} + YT_{CLK}$. Апертурная задержка момента взятия отсчета сигнала относительно переднего фронта тактового импульса $\tau_a = 100$ пс практически не влияет на процесс синхронизации АЦП

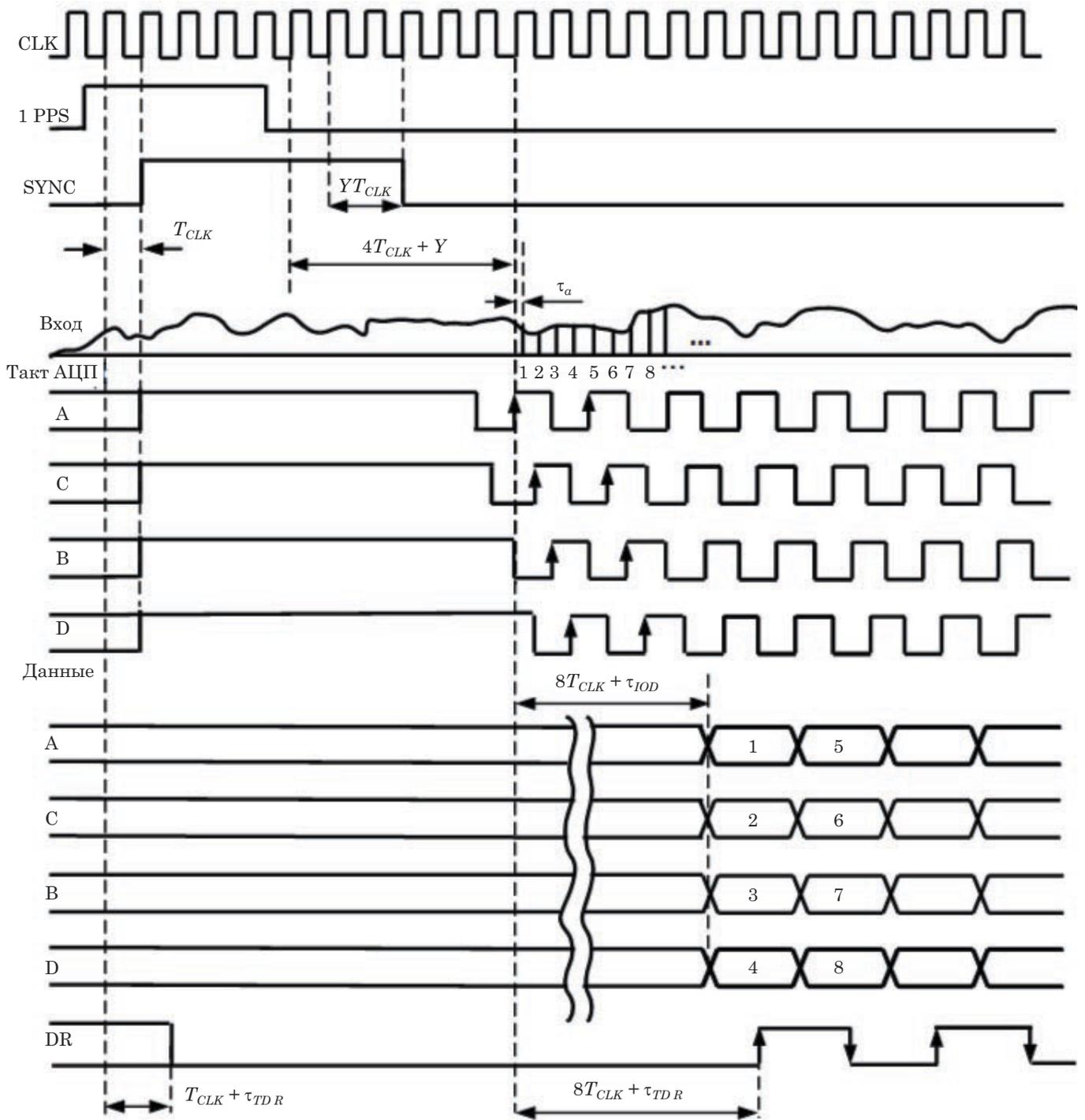


Рис. 3. Временные диаграммы синхронизации отсчетов сигнала в АЦП

(рис. 3). Данные на выходе соответствующего ядра АЦП появляются с задержкой $8T_{CLK} + \tau_{TOD}$, где $\tau_{TOD} = 3$ нс — технологическая задержка вывода данных. Выходные данные сопровождаются тактовыми импульсами готовности данных (DR), которые тоже имеют технологическую задержку $8T_{CLK} + \tau_{TDR}$, где $\tau_{TDR} \geq 3$ нс. Суммарная задержка сигнала в АЦП составляет $\tau_{АЦП} = (12 + Y)T_{CLK} + \tau_{TDR}$ и остается неизменной, по крайней мере, в течение

каждого скана. Теоретически при $T_{CLK} \cong 488$ пс и $Y = 2$ (как это принято в МСПС) значение этой задержки ≈ 9.8 нс. Стабильность указанной задержки определяется, в основном, стабильностью поступающих на вход микросхемы EV10AG190a импульсов тактирования АЦП (Носов и др., 2019). Процесс их формирования в МСПС отличается очень высокой стабильностью, как уже указывалось выше — на уровне 0.1 пс. Однако на практике требуется учи-

тивать возможную нестабильность внешнего по отношению к МСПС сигнала тактовой частоты 100 МГц.

В ПЛИС происходит демультиплексирование 4 параллельных цифровых потоков данных и дальнейшая цифровая обработка сигнала. Возникающая при этом задержка сигнала является вполне определенной. Как и для любого цифрового автомата, она всегда измеряется целым числом тактов работы ПЛИС и зависит только от объема функций, реализуемых конкретной прошивкой ПЛИС. Прошивка, загружаемая в ПЛИС всех каналов МСПС, меняется в зависимости от режима работы МСПС. В режиме широкополосной регистрации сигналов в полосе 2048 МГц задержка сигнала в ПЛИС минимальна, так как цифровая обработка сводится только к 2-битовому квантованию, форматированию VDIF и упаковке в кадры Ethernet. При широкополосной регистрации в полосе 1024 МГц перед квантованием добавляются преобразование сигнала с понижением частоты отсчетов путем децимации (Лайонс, 2006) и выбор нижней либо верхней половины диапазона 0–2048 МГц, а также цифровая фильтрация. В режиме регистрации сигналов в полосе 512 МГц преобразование с понижением частоты реализуется с помощью квадратурного гетеродина, смесителя и децимирующих полуполосных КИХ-фильтров, после чего спектр сигнала преобразуется из комплексной области в действительную.

При цифровой обработке сигналов в режиме узкополосной регистрации с помощью цифрового преселектора в виде квадратурного гетеродина, смесителя и децимирующих полуполосных КИХ-фильтров сначала формируются поддиапазоны частот регистрируемых сигналов. Затем внутри выбранного поддиапазона осуществляется квадратурное цифровое преобразование сигнала к видеочастотам с помощью набора из 16 цифровых видеоконверторов, настроенных на заданные частоты. На последнем этапе обработки производится цифровая фильтрация квадратурного сигнала с использованием полуполосных КИХ-фильтров и последующим преобразованием спектра из комплексной области в действительную. Возникающая при указанных выше преобразованиях задержка остается неизменной в течение сеанса РСДБ-наблюдений и не влияет на выходной цифровой поток в формате VDIF, в котором цифровые отсчеты сигнала жестко привязаны к меткам времени внутренней шкалы МСПС.

Экспериментальные исследования задержки сигналов и фазовой стабильности МСПС

Задержка сигнала при его прохождении по сигнальному тракту МСПС состоит из двух неравных составляющих:

1. Задержка от входного разъема до входа ПЛИС (задержка во входных аналоговых цепях и в элементах схемы + задержка в АЦП).

2. Задержка при цифровой обработке сигнала в ПЛИС.

Первая из этих составляющих зависит от настроек МСПС, диапазона входных частот и конкретной частоты входного сигнала. Однако по величине эта задержка не превышает 1 нс для используемых в МСПС частот входных сигналов (Носов и др., 2019). Измерить указанную задержку прямыми методами затруднительно, так как для этого надо внедряться в схему канала МСПС и измерять временной сдвиг между выходным цифровым сигналом и входным аналоговым. Конкретная величина этой маленькой задержки не имеет существенного значения при обычных радиоастрономических наблюдениях. Так, например, при обработке данных РСДБ-наблюдений комплекса «Квазар-КВО» на корреляторе, «окно», внутри которого определяется корреляционный отклик, составляет ± 300 нс (Суркис и др., 2011). Важно, чтобы задержка была стабильной, по крайней мере, за время одного скана. Поэтому экспериментальные исследования были направлены на измерение стабильности указанной первой составляющей задержки сигнала в МСПС.

Вторая составляющая задержки в сигнальном тракте МСПС намного больше первой и может достигать сотен микросекунд. Она определяется числом тактов (периодов тактовой частоты 256 МГц), затраченных на преобразования сигнала в ПЛИС, и не зависит от выбора диапазона частот или конкретной частоты входного сигнала, а зависит только от конфигурации ПЛИС. Оценить величину этой второй составляющей задержки можно теоретически, подсчитав число тактов в конкретной конфигурации соответствующей данной прошивке ПЛИС. Однако это связано с определенными трудностями и может вызвать сомнения в объективности подсчетов, потому что конкретная величина задержки определяется итоговой конфигурацией конкретного типа ПЛИС, где полученная на этапе проектирования битовая карта может быть реализована по-разному. Поэтому для определения искомой величины этой второй составляющей задержки была предложена методика, в которой можно использовать настройки МСПС, соответствующие стандартным условиям регистрации сигналов при РСДБ-наблюдениях, например на радиотелескопе РТ-32, где выходной диапазон частот сигналов приемной системы 100–1000 МГц.

При экспериментальном исследовании задержки в МСПС использовались имитаторы входного шумового сигнала (НСИ-1) и внешних сигналов синхронизации (НСИ-2) из состава нестандартного

измерительного оборудования, изготовленного для отладки и испытания опытных образцов МСПС. Методика измерения задержки сигнала была основана на предусмотренной в программном обеспечении МСПС возможности захвата и передачи в управляющий компьютер (ПК) выборки из определенного числа отсчетов сигнала. Причем отсчеты можно брать как непосредственно с выхода АЦП, так и после обработки их в ПЛИС, но до квантования и форматирования. Передача указанных выборок каждую секунду в компьютер осуществляется через интерфейс управления МСПС по сети Ethernet. Для проведения измерений в кроссплатформенной среде программирования QT 5.12 была разработана и установлена на ПК специальная программа, позволяющая:

— принять на каждой секунде времени эксперимента и зафиксировать в памяти ПК две выборки последовательных отсчетов сигнала (ВПОС1 — с выхода АЦП, ВПОС2 — с выхода ПЛИС);

— провести преобразование полосы частот и интервала следования отсчетов в ВПОС1, повторяющие преобразования, предусмотренные в соответствующей прошивке ПЛИС. После таких преобразований полосы частот и интервалы следования отсчетов в ВПОС1 и ВПОС2 совпадают, что дает возможность коррелировать указанные выборки;

— вычислить взаимно корреляционную функцию ВПОС2 и ВПОС1;

— определить задержку сигнала как смещение пика корреляционной функции по оси задержек.

Число отсчетов сигнала в выборке ВПОС2 всегда устанавливалось равным 4096. Число отсчетов в выборке ВПОС1 при работе МСПС в широкополосных режимах (1024 или 512 МГц) тоже было

равным 4096, а при работе в узкополосных режимах оно увеличивалось до 131072, чтобы обеспечить вычисление корреляции после преобразований сигнала, предусматривающих операции децимации. Результаты определения задержки сигнала для различных режимов работы МСПС и соответствующих прошивок ПЛИС приведены в таблице. Полученные величины задержки в ПЛИС сигнального тракта МСПС варьируются от 11 до 67584 периодов тактовой частоты работы ПЛИС 256 МГц (от 43 до 264000 нс) в зависимости от задач, решаемых соответствующей прошивкой ПЛИС.

Для исследования фазовой стабильности сигнального тракта МСПС на вход подавался в качестве тестового сигнал опорной частоты 100 МГц от имитатора НСИ-2 (рис. 4). Среднеквадратическое отклонение фазы этого сигнала, измеренное с помощью анализатора сигналов FSUP фирмы R&S ([Signal, 2023](#)), составляет 0.021 градусов (в полосе отстройки 3 Гц – 1 МГц). Это соответствует среднеквадратическому значению джиттера 0.5757 пс. Для установки необходимого уровня тестового сигнала на входе МСПС использовались стандартные аттенюаторы 6 дБ и 10 дБ.

С помощью программы управления МСПС каждую секунду производился захват и передача в ПК выборки $\{s_i\}$, где $i = 0 \dots 4095$, отсчетов преобразованного тестового сигнала $s = \cos 2\pi f + \varphi_0$ с выхода ПЛИС (до квантования и форматирования). Выборка фиксировалась в памяти ПК, после чего с помощью быстрого преобразования Фурье

$$y = \sum_{i=0}^{4095} s_i \cos(2\pi f) + j \sum_{i=0}^{4095} s_i \sin(2\pi f) = y_{\cos} + jy_{\sin}$$

Задержка сигнала при его цифровой обработке в МСПС

Таблица

Обозначение прошивки ПЛИС	Функции прошивки	Задержка, тактов
wbc1024	Преобразование с понижением частоты. Выбор полосы 0–1024 или 1024–2048 МГц.	11
wbc512	Преобразование с понижением частоты. Выбор полосы 512 МГц в диапазоне 0–2 ГГц.	33
ddc32	Преобразование с понижением частоты. Цифровой преселектор. Выделение 16 каналов с полосой 32 МГц.	388
ddc16	Преобразование с понижением частоты. Цифровой преселектор. Выделение 16 каналов с полосой 16 МГц.	712
ddc8	Преобразование с понижением частоты. Цифровой преселектор. Выделение 16 каналов с полосой 8 МГц.	2288
ddc4	Преобразование с понижением частоты. Цифровой преселектор. Выделение 16 каналов с полосой 4 МГц.	8544
ddc2	Преобразование с понижением частоты. Цифровой преселектор. Выделение 16 каналов с полосой 2 МГц.	16960
ddc05	Преобразование с понижением частоты. Цифровой преселектор. Выделение 16 каналов с полосой 0.5 МГц.	67584

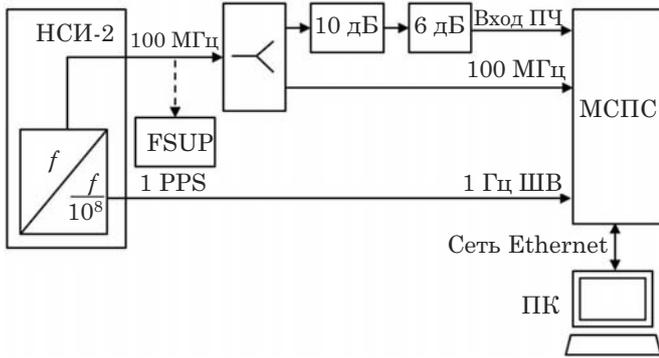


Рис. 4. Схема установки для исследования фазовой стабильности сигнального тракта МСПС

вычислялась фаза сигнала $\varphi = \arctg(y_{\sin}/y_{\cos})$. Указанные действия повторялись каждую секунду в течение 30 мин. В результате был построен график изменения фазы, рассчитано ее среднеквадратическое отклонение, а затем с помощью открыто распространяемой программы Alavar 5.2 (Alavar, 2023) вычислено отклонение Аллана для фазы тестового сигнала после его обработки в МСПС (рис. 5). Полученное значение среднеквадратического отклонения фазы составляет 0.02852 градуса. Таким образом, с учетом собственных фазовых шумов тестового сигнала оценка вносимого АЦП и ПЛИС среднеквадратического отклонения фазы составляет $\sqrt{0.02852^2 - 0.021^2} \approx 0.0193$ градуса фазы, а нестабильность, вносимая сигнальным трактом МСПС, не превышает 0.536 пс. Полученный график девиации Аллана (рис. 5) показывает, что в течение времени наблюдения одного источника (одного скана) девиация фазы, вносимая сигнальным трактом МСПС, представляет собой классический «белый шум». При усреднении за время больше 120 секунд начинает сказываться температурный дрейф.

С помощью стандартного счетчика-таймера 53230A (Keysing, 2023), точность которого (20 пс) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к измерениям в системе частотно-временной синхронизации радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО», была измерена задержка импульсов 1 PPS внутренней шкалы времени МСПС (выход «Контроль 1 Гц») относительно внешних секундных импульсов, присутствующих на входе МСПС. Результаты измерений показали, что значение задержки импульсов 1 PPS внутренней шкалы времени МСПС относительно внешних импульсов шкалы времени радиотелескопа составляет 4.61 нс и остается неизменным с учетом точности указанного измерительного прибора.

Измеренная задержка шкалы времени МСПС (сигнал 1 PPS) относительно шкалы времени радиотелескопа (сигнал 1 Гц ШВ) складывается из трех составляющих:

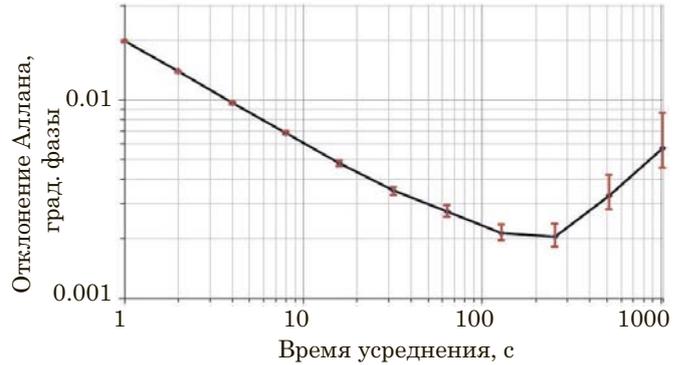


Рис. 5. Девиация Аллана для фазы тестового сигнала после его обработки в МСПС

1) априорной задержки формирования в МСПС сигнала 1 PPS с привязкой его по фронту к импульсам тактовой частоты — не более одного периода тактовой частоты (3.90625 нс);

2) задержки распространения в МСПС сигнала 1 PPS внутри ПЛИС и далее от выхода ПЛИС до контрольного выхода «Контроль 1 Гц»;

3) разности задержек в кабелях экспериментальной установки (рис. 3).

Поэтому она несколько превышает один период тактовой частоты работы ПЛИС. Указанная величина задержки остается практически неизменной в течение скана при РСДБ-наблюдениях и может быть при необходимости учтена в процессе корреляционной обработки результатов наблюдений.

Заключение

При создании МСПС предприняты специальные меры, обеспечивающие синхронизацию сигналов при их аналого-цифровом преобразовании и цифровой обработке. В отличие от использовавшихся до настоящего времени на РСДБ-радиотелескопах цифровых систем преобразования сигналов, в МСПС процесс аналого-цифрового преобразования синхронизован с метками времени 1PPS и каждую секунду начинается заново. Это позволяет исключить ошибки при синхронизации отсчетов входного сигнала внутри каждой секунды. Синхронизация цифровых потоков между АЦП и ПЛИС позволяет избежать сбоев при регистрации сигналов с помощью МСПС.

Вносимое сигнальным трактом МСПС (от входа АЦП до цифрового квантования и форматирования) дрожание фазы сигнала (джиттер) составляет всего 0.536 пс. Это на порядок меньше расчетной погрешности определения задержки сигнала при РСДБ-наблюдениях с использованием широкополосных каналов (≈ 5.4 пс) и практически не влияет на результаты наблюдений. Однако, необходимо учитывать, что в итоговую погрешность при РСДБ войдет джиттер опорного сигнала 100 МГц, который поступает на вход МСПС.

Величина задержки сигнала при его цифровой обработке в ПЛИС варьируется от 43 до 264000 нс (от 11 до 67584 периодов тактовой частоты работы ПЛИС) в зависимости от задач, решаемых ПЛИС, сконфигурированной в соответствии с заданной прошивкой. Эта задержка образуется при цифровой обработке сигнала от его поступления на вход ПЛИС до цифрового квантования и форматирования с последующим формированием Ethernet кадров. Поэтому указанная задержка, которая остается неизменной в течение сеанса РСДБ-наблюдений, не влияет на выходной цифровой поток в формате VDIF, в котором цифровые отсчеты сигнала жестко привязаны к меткам времени внутренней шкалы МСПС.

Измеренная задержка шкалы времени МСПС (сигнал 1 PPS) относительно внешних импульсов 1 Гц шкалы времени радиотелескопа составляет величину порядка длительности одного такта работы ПЛИС в канале МСПС и остается практически неизменной в течение скана при РСДБ-наблюдениях.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИПА РАН № 075-00926-23-00 от 29.12.2023. В статье использованы материалы докладов на Десятой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023).

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

Литература

Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Физматлит, 2003. 624 с.

Векшин Ю. В., Кен В. О. Анализ стабильности задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 51. С. 42–48.

Иванов Д. В., Ипатов А. В., Вытнов А. В. и др. Оперативные определения всемирного времени по наблюдениям РСДБ-сети «Квазар-КВО». Девятая всероссийская конференция Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспече-

ние (КВНО-2021). 13–17 сентября 2021 г. Санкт-Петербург. Тезисы докладов. С. 58.

Кольцов Ю. В. Суперскоростные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 12. С. 55–67.

Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 544 с.

Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.

Носов Е. В., Бердников А. С., Маршалов Д. А. Стабильность задержки в системах преобразования сигналов для РСДБ радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 52–59.

Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор для комплекса «Квазар-КВО» // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 91–99.

Allan Variance Software. [Электронный ресурс] URL: <http://www.alavar.org/> (дата обращения 15.05.2023).

Corey B. Notes on phase/delay stability of cable and electronics // 2006 September 15 VLBI2010 workshop. [Electronic resource] URL: https://ivscc.gsfc.nasa.gov/meetings/v2c_wm1/phase_stability.pdf (дата обращения 03.07.2023).

Keysight Universal Frequency Counter / Timer 53230A. [Electronic resource]. URL: <https://keysight-docs.s3-us-west-2.amazonaws.com/keysight-pdfs/53230A/53200+Series+Frequency+Counters+Timers+Assembly.pdf> (дата обращения: 09.06.2023).

Low power QUAD 10-bit 1,25 Gbps ADC operating up to 5 Gbps EV10AG190a. [Electronic resource]. URL: <https://datasheetspdf.com/datasheet/EV10AQ190.html> (дата обращения: 09.06.2023).

Nosov E., Marshalov D., Fedotov L., Sheynman Y. Multifunctional digital backend for quasar VLBI network // Journal of Instrumentation. 2021. Vol. 16, No 5. P. P05003. DOI 10.1088/1748-0221/16/05/P05003.

Rail-to-rail very fast 2,5V to 5,5V single-supply LVDS comparators ACMP605. [Electronic resource]. URL: <https://www.chipfind.ru/datasheet/html/ad/adcmp605.html> (дата обращения: 09.06.2023).

Signal source analyzer FSUP R&S. [Electronic resource]. URL: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/Rohde-Schwarz-FSUP26-Datasheet.pdf> (дата обращения: 09.06.2023).

Ultralow jitter multioutput clock synthesizer with integrated VCO. LTC 6951. [Electronic resource]. URL: <https://www.rlocman.ru/i/File/2017/11/17/6951fa.pdf> (дата обращения: 09.06.2023).

Whitney A., Kettenis M., et al. VLBI Data Interchange Format (VDIF) // IVS 2010 General Meeting Proceedings. Australia, Hobart, 2010. P. 192–196.