

Научная статья
УДК 621.376

**АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТЫ
С ПОДСТРОЙКОЙ ПО СИГНАЛАМ ПЕРЕДАТЧИКОВ
СДВ-ДИАПАЗОНА И СИГНАЛАМ GLONASS/GPS**
Дмитрий Станиславович Потехин¹✉, Юлия Васильевна Гришанович²,
Сергей Дмитриевич Потехин³, Станислав Валентинович Гусев⁴

¹ ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет»
(РТУ МИРЭА), Москва, Россия
msyst@msyst.ru✉, SPIN-код: 5633-8641

² ФГБОУ ВО «Ковровский государственный технологический университет
имени В.А. Дегтярева» (КГТУ имени В.А. Дегтярева),
Ковров, Владимирская обл., Россия
grishanovichuv@dksta.ru, SPIN-код: 5229-0955

^{1, 3, 4} ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия
³vexilurz@gmail.com, SPIN-код: 9912-6120
⁴gusev@vniiftri.ru, SPIN-код: 8175-6287

Аннотация. В настоящее время плотность передающих радиостанций в эфире очень высока, в связи с чем к точности и стабильности генераторов опорных частот передающих устройств предъявляются высокие требования. Для обеспечения высокой стабильности необходимо поддерживать постоянными температуру, а также напряжённость электрических и магнитных полей. Поэтому генераторам требуется большое время после включения для выхода на рабочий режим. Кроме того, на стабильность частоты генераторов влияет процесс старения компонентов, составляющих их схемы. Это приводит к непрерывному уходу частоты и фазы генераторов. Существуют решения для компенсации этих уходов, но тем не менее частоты всегда будут меняться, поэтому требуется их подстройка по эталонным генераторам, для которой можно использовать эталонные сигналы, передаваемые во всём мире специальными радиостанциями. Статья посвящена методам синхронизации частоты прецизионных генераторов по вещаемым эталонам частоты.

Ключевые слова: эталонные сигналы частоты и времени, подстройка частоты, передатчик сверхдлинноволнового диапазона, цифровая обработка, вейвлет-преобразование, вейвлет-функция Морле

Для цитирования: Потехин Д.С., Гришанович Ю.В., Потехин С.Д., Гусев С.В. Аппаратная реализация построения генератора частоты с подстройкой по сигналам передатчиков СДВ-диапазона и сигналам GLONASS/GPS // Альманах современной метрологии. 2026. № 2 (46). С. 86–105.

© Потехин Д.С., Гришанович Ю.В., Потехин С.Д., Гусев С.В., 2026

Original article

HARDWARE IMPLEMENTATION OF A FREQUENCY GENERATOR WITH ADJUSTMENT TO THE SIGNALS OF SHORT-WAVE TRANSMITTERS AND GLONASS/GPS SIGNALS

**Dmitry S. Potekhin¹✉, Yuliya V. Grishanovich²,
Sergey D. Potekhin³, Stanislav V. Gusev⁴**

¹ FSBEI of HE “MIREA – Russian Technological University”, Moscow, Russia
msyst@msyst.ru✉, SPIN-code: 5633-8641

² Kovrov State Technological University named after V.A. Degtyarev,
Kovrov, Vladimir region, Russia

grishanovichuv@dksta.ru, SPIN-code: 5229-0955

^{1, 3, 4} FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia

³ vexilurz@gmail.com, SPIN-code: 9912-6120

⁴ gusev@vniiftri.ru, SPIN-code: 8175-6287

Abstract. Currently, the density of transmitting radio stations on the air is extremely high, which places stringent requirements on the accuracy and stability of reference frequency oscillators in transmitting devices. To ensure high stability, it is necessary to maintain constant temperature as well as constant electric and magnetic field strengths. Consequently, oscillators require a significant warm-up time after power-on to reach their operating mode. Furthermore, the frequency stability of oscillators is affected by the aging process of their constituent components. This results in continuous frequency and phase drift of the oscillators. While solutions exist to compensate for these drifts, frequencies will nevertheless always fluctuate, thus requiring adjustment against reference oscillators. This can be achieved using reference signals broadcast worldwide by dedicated radio stations. This article is devoted to methods for synchronizing the frequency of precision oscillators with broadcast frequency standards.

Keywords: reference frequency and time signals, frequency synchronization, very long-wave radio transmitter, digital processing, wavelet transform, Morlet wavelet

For citation: Potekhin D.S., Grishanovich Y.V., Potekhin S.D., Gusev S.V. Hardware implementation of a frequency generator with adjustment to the signals of short-wave transmitters and GLONASS/GPS signals. *Almanac of Modern Metrology*. 2026; 46 (2): 86–105.

Введение

Сегодня передачу размеров единиц времени, частоты и шкалы времени от Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 (ГЭВЧ) потребителям в России обеспечивают в основном при помощи эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ) через различные средства передачи, включающие в себя глобальную навигационную спутниковую систему (ГЛОНАСС), радиостанции сверхдлинноволнового

(СДВ), длинноволнового (ДВ) и коротковолнового (КВ) диапазонов как специализированные, служащие только для передачи эталонных сигналов, так и другого назначения (радионавигационные, звукового вещания, телевидения), передающие ЭСЧВ на вторичной основе [1], [2].

Эталонные сигналы частоты и времени предназначены для передачи размеров единиц времени, частоты и шкалы координированного времени от ГЭВЧ эталонным и рабочим средствам измерений с целью обеспечения единства измерений в стране [3], [4].

Информация о характеристиках и программах передач ЭСЧВ содержится в бюллетене «Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, сети телевизионного и звукового вещания», периодически выпускаемом Главным метрологическим центром Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ).

Сигналы специализированных ДВ-радиостанций обеспечивают сличения стандартов частоты и автоматическую синхронизацию различных задающих генераторов (кварцевых и квантовых на основе рубидия). В результате частота синхронизированных таким образом генераторов оказывается «привязанной» к частоте государственного эталона. Кодовую информацию о текущих значениях времени и дате, содержащуюся в эталонных сигналах частоты и времени, передаваемых радиостанциями РБУ (RBU) и РТЗ (RTZ), можно широко использовать в системах часофикации, автоматизации измерений, синхронизации компьютерных сетей и др.

Для обеспечения более точных измерений времени и частоты применяют ЭСЧВ, передаваемые по наземным каналам телевидения в составе телевизионных сигналов. В телевизионном техническом центре (ТТЦ «Останкино», Москва) находится центральный пункт формирования и ввода ЭСЧВ в 6-ю строку телевизионных сигналов «Первого канала». В зависимости от используемых ТВ-каналов, методов и средств погрешность синхронизации часов составляет 0,02–10 мкс, погрешность сличений по частоте — $(2 \div 5) \cdot 10^{-12}$ за сутки.

Сигналы проверки времени (6 точек), передаваемые по системе звукового вещания, с 1990 года содержат информацию о значении часа суток в шкале московского времени. Они предназначены для удовлетворения нужд потребителей в технической точности с погрешностью синхронизации часов 0,1–1,0 с, а также для наиболее простого решения проблем часофикации городов и объектов.

Передача точного времени через глобальную сеть Интернет позволяет удовлетворить потребности клиентов в синхронизации шкал времени компьютеров и компьютерных сетей с погрешностью 10–100 мс.

Сейчас широкое распространение получили термостабилизированные кварцевые генераторы и рубидиевые генераторы [5], [6]. Их применяют:

- в спутниковых навигационных системах, в том числе интегрированных с инерциальными навигационными системами;

- при синхронизации оборудования и передаче данных в высокоскоростных вычислительных сетях;
- в системах связи, включая широкополосную связь с быстрым переключением несущей частоты и спектральным уплотнением каналов;
- в прецизионной измерительной аппаратуре с повышенными требованиями к опорному генератору частоты (частотомеры, анализаторы спектра, векторные генераторы, осциллографы и т.д.).

Эти генераторы могут очень точно воспроизводить частоту и обеспечить стабильность от 10^{-9} до единиц 10^{-12} , но им нужно время после включения для нагрева термостата и выхода на рабочий режим. Кроме того, есть и другие факторы, влияющие на стабильность частоты генераторов, поэтому требуется их подстройка.

Состояние модернизированной системы передач эталонных сигналов частоты и времени

До 2008 года специализированные радиостанции РБУ и РТЗ ГМЦ ГСВЧ располагались в отделении Радиоцентра (РЦ) № 9 (Балашихинский район Московской области). В 2008 году из-за аварийного состояния антенной системы РБУ, прослужившей более 60 лет, радиостанции РБУ и РТЗ были переведены на техническую базу РЦ № 3 Московского регионального центра (МРЦ) — филиала ФГУП «Российские телевизионные радиовещательные сети» (РТРС) (Талдомский район Московской области).

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» был разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию (30.03.2008) комплекс автоматизированной аппаратуры формирования, контроля и управления ЭСЧВ радиостанций РБУ и РТЗ (АФКУ РС), в состав которого входит и новый рабочий эталон времени и частоты. Аппаратура формирования ЭСЧВ и рабочий эталон времени и частоты установлены в филиале РТРС МРЦ, а аппаратура дистанционного контроля и управления — в ГМЦ ГСВЧ ВНИИФТРИ. Контроль за работой комплекса и управление метрологическими характеристиками излучаемых сигналов осуществляют дистанционно из ГМЦ ГСВЧ.

Основные технические характеристики СДВ-радиостанций:

- частота СДВ-радиостанции РБУ: $f_{\text{РБУ}} = 66,6 \text{ кГц}$;
- частота СДВ-радиостанции РТЗ: $f_{\text{РТЗ}} = 50 \text{ кГц}$.

Относительная суточная погрешность по частоте ЭСЧВ, излучаемых радиостанцией: РБУ — не более $2 \cdot 10^{-12}$; РТЗ — не более $5 \cdot 10^{-12}$.

Среднесуточное отклонение временного положения характерной точки огибающей ЭСЧВ на выходе антенн передатчиков радиостанций РБУ и РТЗ относительно шкалы UTC (SU): не более $\pm 10 \text{ мкс}$.

Наряду с частотой эти радиостанции передают и точное время.
Структура сигнала: каждые 100 мс передаётся один бит (таблица 1).

Таблица 1

Формат десятой доли секунды

Начало, мс	Длительность, мс	Вид сигнала
0	10	немодулированная несущая
10	80	несущая, подвергнутая фазовой модуляции синусоидальными сигналами с поднесущими частотами 100 Гц или 312,5 Гц и индексом модуляции 0,698
90	5	немодулированная несущая
95	5	несущая отключена

Сигналы с поднесущей частотой 312,5 Гц используются для маркирования единиц («1») в двоичном коде. Сигналы с поднесущей частотой 100 Гц используются для маркирования нулей («0») в двоичном коде (таблица 2).

Таблица 2

Формат секунды

Начало, мс	Значение
0	информационный бит № 1
100	информационный бит № 1
200	всегда «0»
300	
400	
500	
600	
700	минутные маркеры (перед началом новой минуты передаётся «1», во всех остальных случаях — «0»)
800	
900	всегда «1»

Самый простой и распространённый способ подстройки генераторов связан с использованием системы GPS. Она даёт возможность получать сигнал 1 PPS, который вырабатывается приёмником один раз в секунду — в момент перехода с одной секунды на другую — с высочайшей точностью одновременно в любой части света с пиковыми ошибками всего в десятые доли наносекунды и со средними ошибками за длительный период, практически равными нулю.

Сигналы GPS обеспечивают 24 основных спутника и несколько резервных. Предусматривается поддержание и развитие этого сервиса по крайней мере до 2030 года.

Импульсы 1 PPS, рассчитанные приёмниками GPS на основе принятых от спутников сигналов, используются для так называемого дисциплинирования генераторов опорной частоты с основными значениями частоты: 5, 10 и 100 МГц.

Отклонение опорной частоты от точного значения, например 10 МГц, приводит к потере синхронизации генератора со шкалой времени. При этом не так важна мгновенная ошибка частоты, как средняя ошибка за длительный период времени. Даже небольшая ошибка, постепенно накапливаясь, приводит в конце концов к потере синхронизации [7], [8].

Комплекс АФКУ РС обеспечивает:

- формирование ЭСЧВ радиостанциями РБУ и РТЗ в соответствии с форматом, приведённым в бюллетене «Эталонные сигналы частоты и времени»;
- автоматическую подстройку фазы несущих колебаний и временного положения огибающей ЭСЧВ РБУ на выходе антенны передатчика;
- автоматический контроль и регистрацию метрологических характеристик ЭСЧВ, излучаемых передатчиками РБУ и РТЗ; технического состояния аппаратуры формирования (АФ) ЭСЧВ РС; характеристик опорных сигналов водородных стандартов частоты рабочего эталона относительно UTC (SU) с погрешностью не более 0,05 мкс методом дифференциальных сличений с использованием сигналов GPS;
- дистанционный контроль метрологических характеристик излучаемых ЭСЧВ, технического состояния аппаратуры формирования, регистрацию всех нарушений;
- дистанционное управление технологическими переключениями АФКУ РС и коррекцию метрологических характеристик излучаемых ЭСЧВ.

В качестве основного канала, реализующего удалённый доступ для контроля и управления АФ ЭСЧВ из ГМЦ ГСВЧ, используют глобальную сеть Интернет как наиболее надёжное и развитое средство коммуникации. Для защиты от несанкционированного доступа к системе управления АФ ЭСЧВ радиостанций предусмотрены: выделение технологическим компьютерам РЦ № 3 и ГМЦ ГСВЧ постоянных IP-адресов; защита на программно-аппаратном уровне через маршрутизаторы; использование защищённых протоколов управления и авторизация при вхождении в систему управления. В качестве резервных используют каналы управления по коммутируемой телефонной линии и каналы сотовой связи в стандарте GSM с привлечением соответствующих модемов.

При пропадании сигналов GPS от спутников устройство в течение нескольких часов удерживает синхронизацию благодаря внутреннему термостабилизированному опорному генератору с частотой 10 МГц. Тем не менее потеря синхронизации в таких условиях — вопрос времени. Поэтому важно иметь возможность принимать сигналы точного времени по разным каналам. В данной работе сигналы, принимаемые со спутников, предлагается дублировать, используя информацию о частоте и времени, передаваемую СДВ-радиостанциями РБУ и РТЗ.

Разрабатываемая принимающая антенна

Для приёма СДВ-сигналов разработана активная магнитная антенна (рис. 1) со следующими характеристиками:

- индуктивность $L = 12,36$ мГн;
- добротность $Q = 45$.



Рис. 1. Намотанная антенна

Fig. 1. Wound antenna

На рис. 2 приведён спектр принимаемых антенной частот полосой 700 Гц с частотой, вещаемой РБУ.

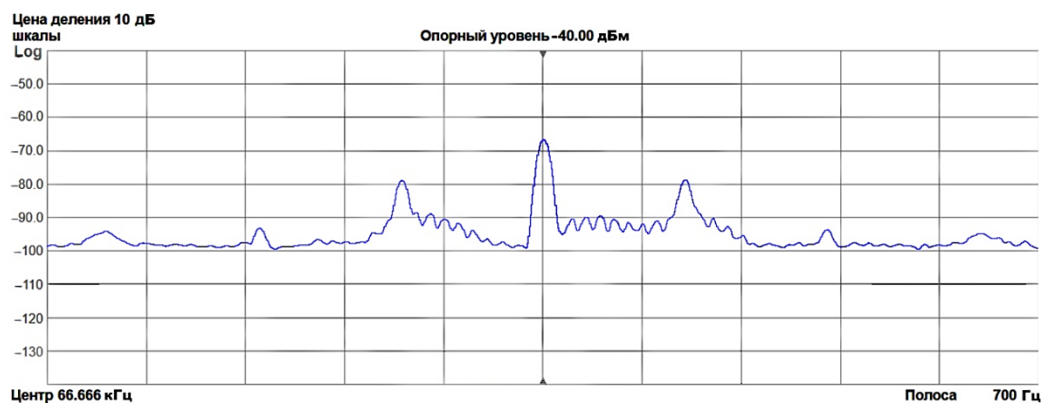


Рис. 2. Спектр частот, принимаемых активной антенной, настроенной на резонанс 66,(6) кГц; полоса сигнала — 700 Гц

Fig. 2. Spectrum of frequencies received by an active antenna tuned to resonance at 66,(6) kHz; signal bandwidth of 700 Hz

В центре спектра, представленного на рис. 2, находится частота, вещаемая РБУ; рядом — пары спектров, соответствующие поднесущим частотам 100 и 312,5 Гц.

Алгоритмы работы устройства

На рис. 3 приведена структурная схема аппаратных алгоритмов работы устройства синхронизации опорного генератора по радиосигналам передатчиков СДВ-диапазона и сигналам GLONASS/GPS.

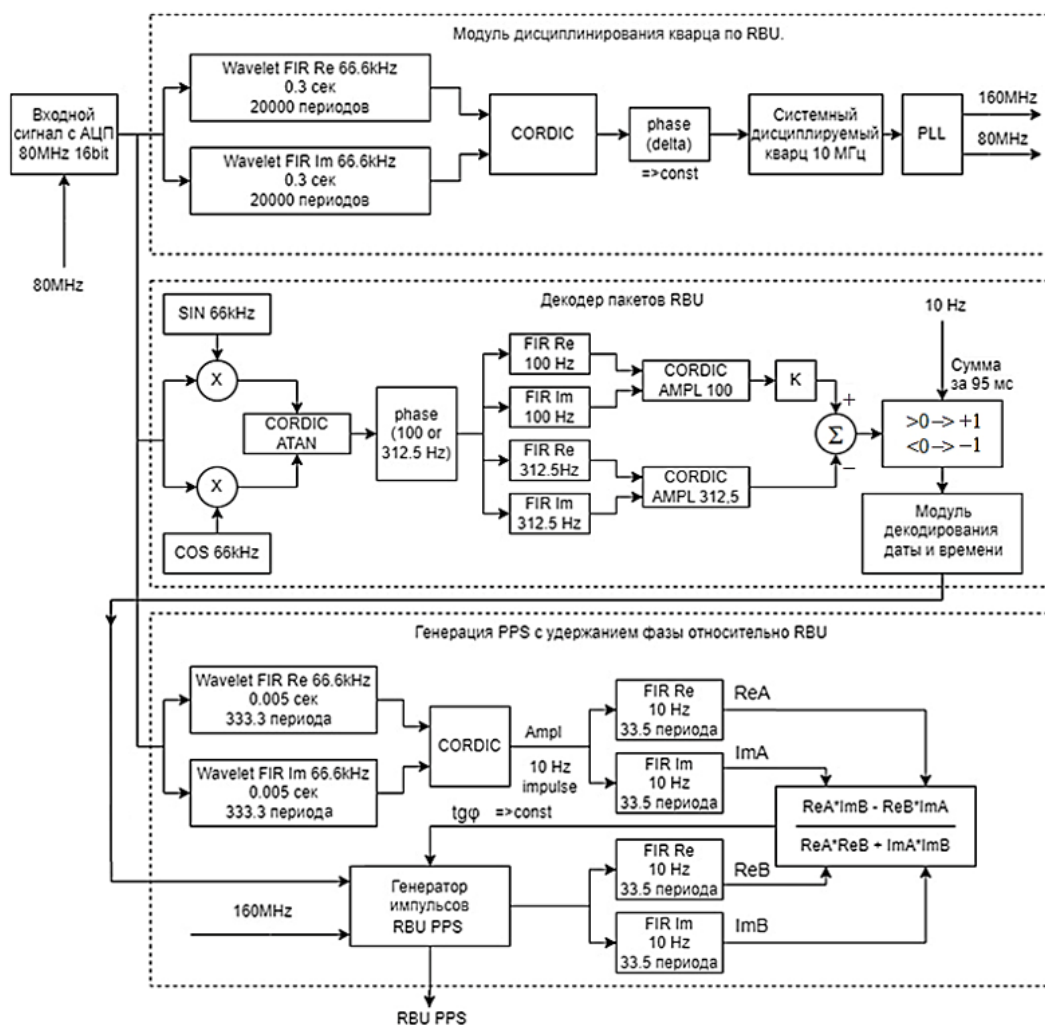


Рис. 3. Структурная схема аппаратных алгоритмов работы приёмника

Fig. 3. Block diagram of the receiver's hardware algorithms

Аппаратные алгоритмы работы устройства можно разделить на четыре части:

- 1) программно-аппаратные алгоритмы подстройки частоты опорного генератора (термостабилизированного кварцевого резонатора или рубидиевого стандарта частоты) по измерению величины фазовых набегов сигналов точного времени СДВ и опорного генератора (на рис. 3 обозначен как модуль дисциплинирования кварца);
- 2) аппаратные алгоритмы автономной генерации сигналов PPS, вырабатываемых на основе принимаемых сигналов точного времени СДВ. Основные задачи алгоритмов: декодировать пакеты, передаваемые радиостанциями, и генерировать сигналы PPS с удержанием фазы относительно РБУ или РТЗ;

- 3) аппаратные алгоритмы выработки сигналов синхронизации на основе принимаемых данных от СДВ и GLONASS/GPS;
- 4) программно-аппаратные алгоритмы формирования сигнала PPS, синхронизированного с принимаемыми сигналами СДВ и спутниковым приёмником GLONASS/GPS.

Математический аппарат реализации алгоритма

Основой алгоритма подстройки частоты опорного генератора (термостабилизированного кварцевого резонатора или рубидиевого стандарта частоты) по сигналам, передаваемым СДВ-радиостанциями, является измерение величины фазовых набегов сигналов точного времени СДВ и опорного генератора.

Обработка сигналов велась по оригинальной методике, согласно которой размер используемой модифицированной вейвлет-функции Морле [9]–[11] для определения фазы можно рассчитать по формуле:

$$N = \frac{12Q \ln 2\sqrt{2n}}{\pi} \cdot \frac{f_{\partial}}{f_0}, \quad (1)$$

где Q — добротность; n — разрядность чисел; f_{∂} — частота дискретизации; f_0 — частота сигнала.

Для описанных частот, добротности и разрядности вейвлет-функции расчёт показывает, что $N > 43\,000\,000$ точек или пар 18-битных чисел за 0,2 с. Другими словами, требуется поток данных более 7,5 Гбит/с, причём следовать они должны непрерывно и монотонно, а не пакетами. Поэтому и требуется постоянный поиск коэффициентов модифицированной вейвлет-функции Морле.

Наименьший общий коэффициент деления равен 600, то есть через 600 импульсов опорной частоты $f_{\text{оп}}$ фазы всех трёх сигналов совпадут с точностью, определяемой фазовыми набегам всех трёх источников частоты относительно друг друга.

Для одинаковых частот величину фазового набега лучше считать из отношения мнимой и реальной частей вейвлет-преобразования:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\operatorname{Im} W}{\operatorname{Re} W}. \quad (2)$$

Далее сдвиг фаз лучше преобразовать во временную задержку по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi}{2\pi f}. \quad (3)$$

где f — частота сигнала СДВ-радиостанции.

Временная задержка будет привязана к опорной частоте $f_{\text{оп}}$. Таким образом, восстанавливая векторную диаграмму [9], можно определить сдвиг фаз, выраженный в единицах времени, указанных генераторов относительно друг друга. После чего достаточно поставить пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор) и подавать сигнал подстройки на генератор опорной частоты.

Для автономной генерации PPS достаточно поделить опорную частоту на 10 000 000 и получить секундные импульсы. Затем произвести синхронизацию фронтов сгенерированных импульсов с импульсами PPS, полученными либо со спутниковых систем связи, либо на основе принимаемых сигналов точного времени СДВ, либо используя оба канала.

На рис. 4 представлена фотография экрана с демонстрацией работы алгоритма подстройки частоты, где бирюзовым цветом представлена фаза сигнала RBU относительно опорного генератора, красным — амплитуда, синим — усреднённая разность фаз.

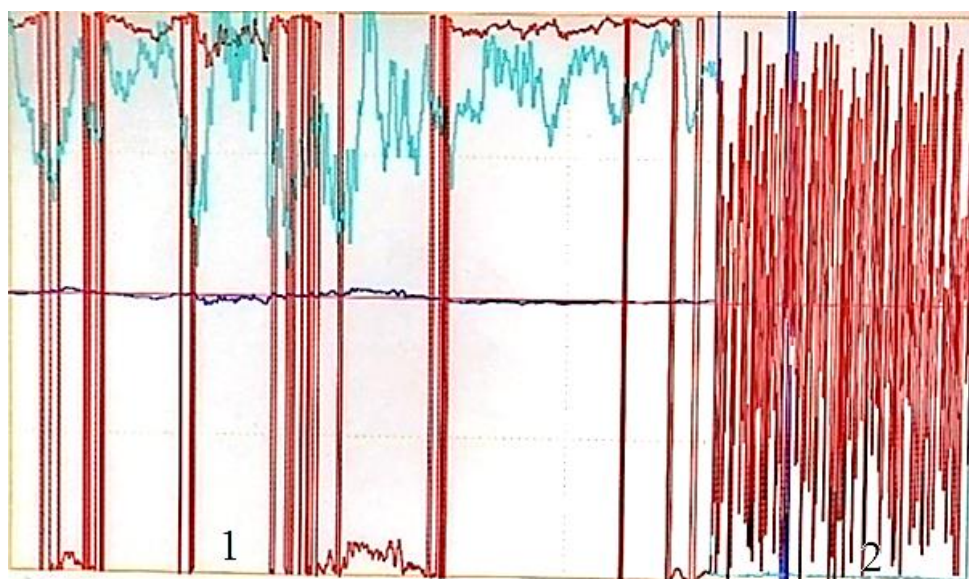


Рис. 4. Фотография экрана с демонстрацией работы алгоритма подстройки частоты

Fig. 4. Screenshot showing the frequency tuning algorithm in action

На фотографии можно выделить две зоны:

- 1 — зона, в которой идёт процедура подстройки частоты;
- 2 — зона, в которой сигнал РБУ не транслируется.

Дело в том, что каждый третий вторник чётного месяца радиостанция отключается для проведения профилактических работ. Фотография сделана 17.10.2023 — это как раз третий вторник чётного (десятого) месяца.

Об отсутствии сигнала говорит резкое падение амплитуды сигнала и случайное поведение фазы.

Метод восстановления векторной диаграммы с использованием ортогональных вейвлет-функций обладает высокой помехозащищённостью и способен работать при малых амплитудах сигнала. Поэтому критерием потери сигнала может являться как раз случайное поведение фазы. Это событие хорошо регистрируется усреднённой разностью фаз.

Алгоритмы «привязки» сигналов PPS, вырабатываемых на основе принимаемых сигналов СДВ, к сигналам PPS, вырабатываемым спутниковым приёмником GLONASS/GPS

Как уже говорилось выше, устройство синхронизации объектов цифрового телевизионного вещания РТРС от радиосигналов передатчиков СДВ-диапазона и сигналов GLONASS/GPS представляет собой программно-аппаратный комплекс.

На рис. 5 приведена структурная схема аппаратных алгоритмов работы устройства синхронизации объектов цифрового телевизионного вещания РТРС от радиосигналов передатчиков СДВ-диапазона и сигналов GLONASS/GPS.

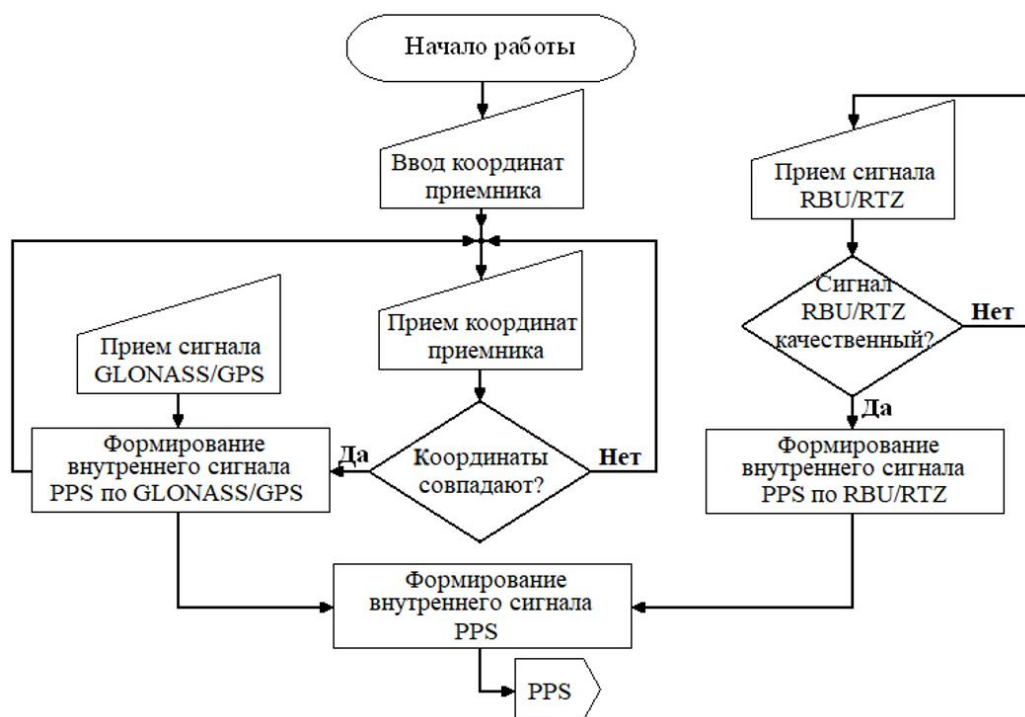


Рис. 5. Алгоритм формирования сигнала PPS, вырабатываемого на основе принимаемых сигналов СДВ и сигналов PPS, вырабатываемых спутниковым приёмником GLONASS/GPS

Fig. 5. The PPS signal generation algorithm based on the received SDF signals and PPS signals generated by the GLONASS/GPS satellite receiver

Как видно из представленного алгоритма, первым шагом требуется подтвердить валидность сигнала PPS (отсутствие GPS-спуфинга), полученного приёмником GLONASS/GPS. Для этого достаточно сравнить координаты антенны, принимаемые с GLONASS/GPS, с реальными координатами принимающей антенны, хранящимися в памяти управляющей программы.

Для реализации дальнейшей части алгоритма (см. рис. 5) используются следующие методы и алгоритмы обработки сигналов:

- алгоритм непрерывного нахождения коэффициентов модифицированной вейвлет-функции Морле [12];
- алгоритм подстройки частоты опорного генератора (термостабилизированного кварцевого резонатора или рубидиевого стандарта частоты) по измерению величины фазовых набегов сигналов точного времени СДВ и опорного генератора;
- алгоритм формирования сигналов PPS по результатам декодирования информации, передаваемой совместно с сигналами точного времени по СДВ-каналу;
- алгоритмы выработки сигналов синхронизации на основе принимаемых данных от СДВ и GLONASS/GPS.

Собственно, сигнал PPS формируется либо по двум внутренним сигналам PPS, сформированным по GLONASS/GPS и РБУ/РТЗ (если они оба качественные), либо по одному из сигналов (если качественный один из них). Если оба некачественные, то хранится значение PPS, соответствующее последним коррекциям. При этом время хранения сформированного сигнала PPS зависит от качества опорного генератора, термостабилизированного кварца или рубидиевого эталона частоты, от которого тактируются все аппаратные модули устройства синхронизации и который дисциплинируется по приёму сигналов GLONASS/GPS и РБУ/РТЗ.

На рис. 6 приведён изготовленный макет генератора частоты с подстройкой по сигналам передатчиков СДВ-диапазона и сигналам GLONASS/GPS.

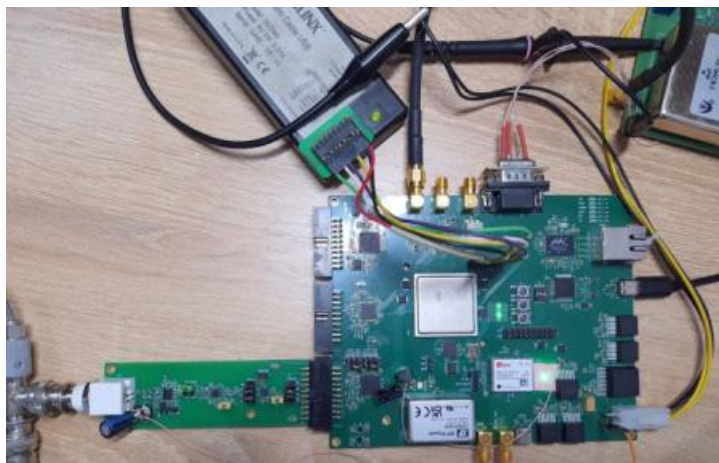


Рис. 6. Макет генератора частоты с подстройкой по сигналам передатчиков СДВ-диапазона и сигналам GLONASS/GPS

Fig. 6. The layout of a frequency generator with tuning based on signals from VHF transmitters and GLONASS/GPS signals

**Алгоритм формирования сигналов PPS
по результатам декодирования информации, передаваемой
совместно с сигналами точного времени по СДВ-каналу**

Для формирования сигнала PPS необходимо поделить опорную частоту на 10 000 000 — это позволит получить секундные импульсы — и затем декодировать сигналы точного времени, передаваемые по СДВ-каналу.

Для декодирования информации о времени, передаваемом по СДВ-каналу, необходимо воспользоваться таблицами 1 и 2, где приведён формат десятой доли секунды и секунды. Из таблицы 1 видно, что в конце каждой десятой доли секунды модуляция выключается на 5 мс. Таким образом, информацию о десятой доле секунды можно получить, выделив огибающую СДВ. Для этого необходимо сгенерировать ортогональный фильтр, настроенный на частоту 10 Гц; в качестве него может быть использован вейвлет-фильтр [13].

В таблице 1 имеется информация о том, что, кроме АМ-модуляции с огибающей частотой в 10 Гц, несущая подвергается фазовой модуляции частотами 100 и 312,5 Гц, следовательно, эти частоты должны быть удалены из спектра сигнала. Частоты радиостанций РБУ и РТЗ известны, а $\Delta f < 100$ Гц. Расчёт даёт минимальные добротности для сигналов: $6667 > Q_{\text{РБУ}} > 667$ и $5000 > Q_{\text{РТЗ}} > 500$. Уровень подавления в полосе заграждения ΔW_z выбирают более 100 дБ; по этим данным может быть рассчитана разрядность преобразования: $n = 18$ [5].

На рис. 7 приведён пример выделенной огибающей несущей частоты СДВ-сигнала, полученной вейвлет-фильтром, настроенным на частоту 10 Гц.

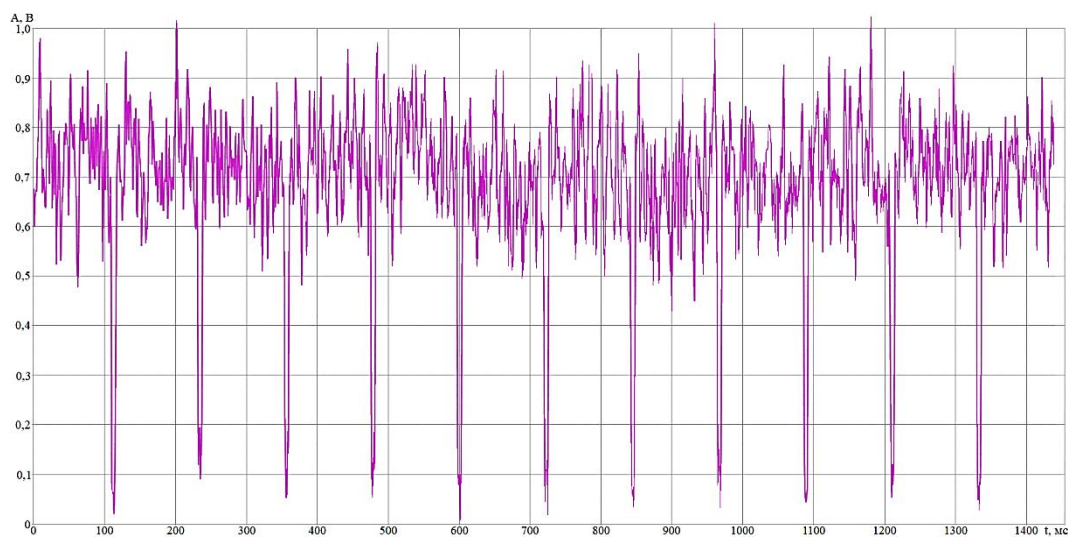


Рис. 7. Пример выделенного сигнала с частотой 10 Гц
Fig. 7. Example of a selected signal with a frequency of 10 Hz

Из рис. 7 видно, что восстановленная огибающая сильно зашумлена и пользоваться ею для декодирования информации о времени крайне неудобно, поэтому для восстановления сигнала точного времени по СДВ-каналу необходимо регистрировать фазу огибающей относительно секундных меток для подстройки её под сигнал.

Для кодировки времени несущая сигнала точного времени по СДВ-каналу подвергнута фазовой модуляции синусоидальными сигналами с поднесущими частотами 100 и 312,5 Гц для маркировки единиц («1») и нулей («0») соответственно в двоичном коде с индексом модуляции 0,698.

Для выделения фазой модуляции стандартно используется схема супергетеродинного приёмника с нулевой промежуточной частотой или гетеродин, работающий на частоте приёма. Входной сигнал смешивается с частотой гетеродина, при этом получаются два сигнала: сигнал с удвоенной частотой несущей и сигнал биений. Удвоенную несущую подавляют фильтром нижних частот (ФНЧ).

Для реализации этого принципа необходимо восстановить несущую частоту. Для этого можно записать один период синусоидального сигнала в таблицу и непрерывно её воспроизводить. Этот способ годится только в случае кратности частот дискретизации и сигнала несущей.

Далее необходимо перемножить входной сигнал с восстановленной несущей, после чего произвести фильтрацию ФНЧ. Полученный сигнал будет содержать поднесущие частоты 100 и 312,5 Гц (рис. 8), которые далее и потребуется выделить, для чего необходимо воспользоваться описанными ранее алгоритмами.

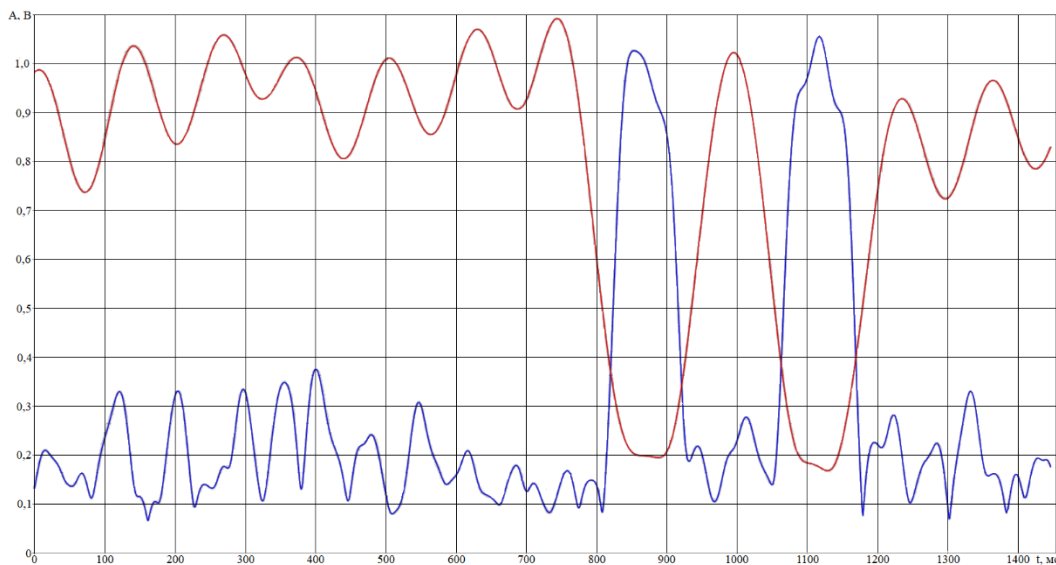


Рис. 8. Пример сигналов с выделенными поднесущими

Fig. 8. Example of signals with selected subcarriers

Далее можно суммировать разность амплитуд поднесущих частот ($A_{312} - A_{100}$), и если сумма получается положительной, то это — «1», если отрицательной — «0». Для проведения суммирования необходимо сформировать сигнал частотой 10 Гц и синхронизировать его с выделенными поднесущими (см. рис. 8). Метод непосредственного восстановления векторной диаграммы [9], [14] позволяет провести синхронизацию по результатам восстановления фазы этого сигнала (рис. 9).

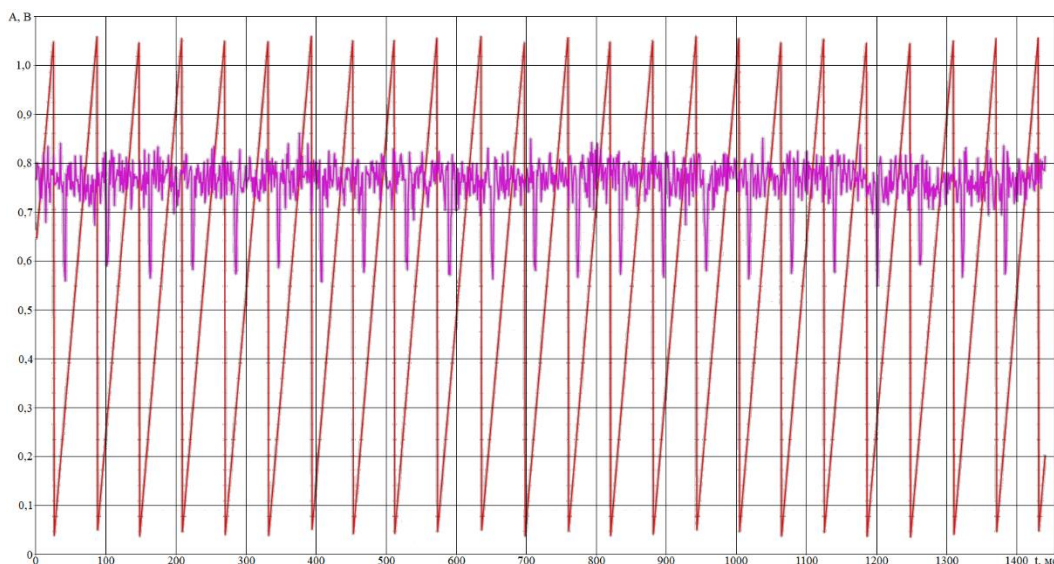


Рис. 9. Сигнал 10 Гц и его фаза, выделенная с помощью метода непосредственного восстановления векторной диаграммы

Fig. 9. 10 Hz signal and its phase reconstructed using the direct vector diagram reconstruction method

Теперь, пользуясь таблицей 2, можно расшифровать время и дату, а также определить, который из десяти 0,1-секундных импульсов соответствует началу секунды, и использовать его для формирования сигналов PPS по результатам декодирования информации, передаваемой совместно с сигналами точного времени по СДВ-каналу.

Как уже говорилось ранее, для автономной генерации сигналов PPS достаточно поделить опорную частоту на 10 000 000 и получить секундные импульсы. Для повышения точности формирования сигнала PPS частоту опорного генератора можно увеличить на какую-нибудь константу, например на 16, при этом коэффициент деления также умножить на эту же константу.

Далее требуется произвести синхронизацию фронтов сгенерированных импульсов с импульсами PPS, полученными на основе принимаемых сигналов точного времени по СДВ-каналу.

Эту синхронизацию легко сделать, регулируя коэффициентом деления опорную частоту. Для этого нужно измерить методом счёта разницу между фронтами формируемого сигнала PPS и фронтом сигнала 0,1-секундных импульсов, соответствующего началу секунды, определённой по результатам декодирования информации, передаваемой совместно с сигналами точного времени по СДВ-каналу. Далее измеренную разницу следует подать на вход ПИД-регулятора и корректировать коэффициент деления, тем самым подстраивая фазу сигнала PPS.

Алгоритм выработки сигналов синхронизации на основе принимаемых данных от СДВ-радиостанций и GLONASS/GPS

Алгоритм выработки сигнала PPS на основе принимаемых данных от СДВ и GLONASS/GPS предполагает выполнение следующих действий:

- получить сигналы PPS от двух указанных источников;
- сформировать флаги качества этих сигналов; если сигнал качественный, то устанавливаем соответствующий флаг в «1», если нет, то в «0»;
- знать или получать по каналу Ethernet величину задержки (поправку) между этими сигналами для данной конкретной локации.

Величина задержки сигнала СДВ равна отношению расстояния от источника сигнала до приёмника и скорости распространения электромагнитной волны при скорости света — 299 792 458 м/с. Например, для расстояния 300 км задержка составит 1 мс.

Флаг качества для сигнала PPS, формируемого по результатам декодирования времени СДВ, можно сформировать по условию непрерывного, устойчивого декодирования времени при условии монотонного поведения фазы сигнала СДВ.

Флаг качества для сигнала PPS, сформированного по GLONASS/GPS, можно установить при условиях непрерывного следования этого сигнала и отсутствия признаков его подмены. Признаком подмены сигнала является несоответствие рассчитанной и принятой задержек сигнала между СДВ и GLONASS/GPS.

Далее синхронизируют сформированный сигнал PPS с принимаемыми сигналами по алгоритму:

1. Проверка флагов качества. Если хотя бы один установлен в состояние «1», то проводится синхронизация.
2. Подсчёт разницы между фронтами, вычитание поправки и умножение каждой дельты на свой флаг. При этом получается, что поправка при плохом сигнале не работает.

3. Сложение дельт и деление на сумму флагов. При этом получается, что:
 - если работают оба канала, то работа идёт по средней дельте;
 - если работает только один канал, то работа идёт по нему;
 - если ни один канал не работает, то соблюдается режим хранения фазы.
4. Получившееся значение подаётся на вход ПИД-регулятора и корректируется коэффициент деления, тем самым подстраивается фаза сигнала PPS. Таким образом, получается система с возможностью увеличения количества каналов. Пока их три: спутниковый канал и два канала СДВ.

Результаты работы

Использование описанных алгоритмов позволило обеспечить синхронизацию сигналов PPS не хуже 0,5 мкс. Исследования, проведённые на макете устройства, показали, что достижимая точность синхронизации по сигналу PPS от спутникового приёмника GLONASS/GPS составляет 0,1 мкс, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к устройствам подобного типа. Кроме того, применение одновременно двух каналов синхронизации позволяет поддерживать требуемые характеристики даже при ухудшении условий приёма в одном из каналов, что повышает надёжность работы устройства.

Финансирование. Авторы заявляют, что во время проведения исследования и подготовки статьи не было получено никаких средств, грантов или другой поддержки.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Funding. The authors declare that no funds, grants or other support were received during conducting the research and preparation of the article.

Contribution of the authors. The authors have made equivalent contributions to the preparation of the article.

Conflict of interests. The authors declare that they have no potential conflict of interest related to the research presented in this article.

Список источников

1. Блинов И.Ю., Гончаров А.С., Пальчиков В.Г., Смирнов Ю.Ф. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли и её деятельность по обеспечению потребителей эталонными сигналами частоты и времени и информацией о точном времени // Вестник метролога. 2016. № 4. С. 7–11. EDN: UUBQTM.
2. Роцин Д.А. Модернизация программно-математического комплекса для сравнения шкал времени эталонов времени и частоты по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 1 (61). С. 93–105. EDN: VOOIDT.

3. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Гончаров А.С. Состояние и перспективы развития эталонной базы и прецизионных средств измерений координат и времени // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2006. № 16. С. 41–44.
4. Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С., Бувев С.Г., Малимон А.Н., Балаев Р.И., Федорова Д.М. Система передачи эталонных сигналов частоты и времени измерительным средствам наземного комплекса ГЛОНАСС по оптическому кабелю // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 29–32. EDN: ZQKEQN.
5. Иванов Ю. Современные кварцевые и рубидиевые генераторы // Современная электроника. 2024. № 1. С. 32–38. URL: <https://cloud.cta.ru/iblock/b19/b19db42550c2914f1468e9a84293f6e3/20240132.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).
6. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения: пер. с англ. М.: Физматлит, 2009. 512 с.
7. Потехин Д.С. Влияние белого шума на точность определения амплитуды и фазы гармонических сигналов с использованием вейвлет-преобразования функцией Морле // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 4-1 (38). С. 180–183. EDN: KZAEEL.
8. Потехин Д.С., Потехин С.Д., Бадалян Н.П. Влияние эффекта Саньяка на погрешность сличения частот радиовещаемых стандартов частоты-времени // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2015. № 1. С. 97–110. EDN: RSIXWL.
9. Потехин Д.С. Интегральный метод восстановления векторной диаграммы в системах цифровой обработки данных // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 2-1 (44). С. 161–164. EDN: NXXASH.
10. Потехин Д.С., Тетерин Е.П., Тарасов И.Е. Влияние коэффициентов и пределов интегрирования вейвлет-функции Морле на точность результатов анализа гармонических сигналов с нестационарными параметрами // Научное приборостроение. 2002. Т. 12. № 1. С. 90–95. EDN: HSQMYH.
11. Потехин Д.С., Гришанович Ю.В. Построение цифрового приёмника эталонных частот с использованием вейвлет-функции Морле // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 1. С. 67–71. EDN: NUMIXN.
12. Карпенков А.С., Гришанович Ю.В., Потехин Д.С., Тетерин Е.П. Методика расчёта целочисленного цифрового селекторного нерекурсивного фильтра с заданными добротностью и уровнем подавления // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 6-1. С. 79–85. EDN: KYWTYZ.
13. Potekhin D., Grishanovich Y. Processing of the spectral electromyogram by the method of wavelet analysis the modified Morlet function. In: High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production. HPCST 2021 / V. Jordan, I. Tarasov, V. Faerman (eds). Series: Communications in Computer and Information Science, V. 1526. Springer, Cham., 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94141-3_7.
14. Тарасов И.Е., Потехин Д.С., Платонова О.В. Перспективы применения софт-процессоров в системах на кристалле на базе программируемых логических интегральных схем // Russian Technological Journal. 2022. Т. 10. № 3. С. 24–33. EDN: UVLVBA. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-24-33>.

References

1. Blinov I.Yu., Goncharov A.S., Palchikov V.G., Smirnov Y.F. State service of time, frequency and determination of parameters of the Earth's rotation, and its activities to provide consumers with reference signals of frequency and time and information on the exact time. *Vestnik metrologa*. 2016; (4): 7–11. EDN: UUBQTM. (In Russ.)
2. Roschin D.A. Software modernization for comparison of time scales of time and frequency standards based on signals of global navigation satellite systems. *Prikladnaya Informatika — Journal of Applied Informatics*. 2016; 11 (1): 93–105. EDN: VOOIDT. (In Russ.)
3. Donchenko S.I., Blinov I.Yu., Goncharov A.S. Status and prospects of development of the standard base and precision means for measuring coordinates and time. *Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences*. 2006; (16): 41–44. (In Russ.)
4. Kolmogorov O.V., Shchipunov A.N., Prokhorov D.V., Donchenko S.S., Buev S.G., Malimon A.N., Balaev R.I., Fedorova D.M. System for transmitting reference frequency and time signals to measuring instruments of the GLONASS ground complex via optical cable. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2017; (9): 29–32. EDN: ZQKEQN. (In Russ.)
5. Ivanov Yu. Modern quartz and rubidium oscillators. *Modern Electronics*. 2024; (1): 32–38. URL: <https://cloud.cta.ru/iblock/b19/b19db42550c2914f1468e9a84293f6e3/20240132.pdf>. (In Russ.)
6. Riehle F. Frequency Standards: Basics and Applications: trans. from English. Moscow: Fizmatlit; 2009. 512 p. (In Russ.)
7. Potekhin D.S. Influence of white noise on the accuracy of determining the amplitude and phase of harmonic signals using the Morlet wavelet transform. *Control Systems and Information Technologies*. 2009; 38 (4-1): 180–183. EDN: KZAEEL. (In Russ.)
8. Potekhin D.S., Potekhin S.D., Badalyan N.P. The Sanyak effect impact on the error of the frequency comparison of frequency-time radio broadcast standards. *Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical Engineering, Power Engineering*. 2015; (1): 97–110. EDN: RSIXWL. (In Russ.)
9. Potekhin D.S. Integral method of vector diagramme reconstruction in digital data processing systems. *Control Systems and Information Technologies*. 2011; 44 (2.1): 161–164. EDN: NXXASH. (In Russ.)
10. Potekhin D.S., Teterin E.P., Tarasov I.E. Effect of coefficients and integration limits of the Morlet wavelet function on the accuracy of harmonic signal analysis with non-stationary parameters. *Scientific Instrumentation*. 2002; 12 (1): 90–95. EDN: HSQMYH. (In Russ.)
11. Potekhin D.S., Grishanovich Yu.V. Construction of a digital receiver for standard frequencies using Morlet wavelet function. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011; (1): 67–71. EDN: NUMIXN. (In Russ.)
12. Karpenkov A.S., Grishanovich Yu.V., Potekhin D.S., Teterin E.P. Design procedure of integer digital selection nonrecursive filter with the given Q-factor and suppression level. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2009; 6 (1): 79–85. EDN: KYWTYZ. (In Russ.)

13. Potekhin D., Grishanovich Y. Processing of the spectral electromyogram by the method of wavelet analysis the modified Morlet function. In: High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production. HPCST 2021 / V. Jordan, I. Tarasov, V. Faerman (eds). Series: Communications in Computer and Information Science. V. 1526. Springer, Cham.; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94141-3_7.
14. Tarasov I.E., Potekhin D.S., Platonova O.V. Prospects for using soft processors in systems-on-a-chip based on field-programmable gate arrays. *Russian Technological Journal*. 2022; 10 (3): 24–33. EDN: UVLVBA. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-24-33>. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 16.03.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 18.03.2026.

The article was submitted 16.03.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 18.03.2026.