

Синхронизация разнесённых радиоэлектронных устройств по сигналам ГНСС с использованием SDR-технологий

С. В. Литвинов, Ю. А. Полевода, Е. А. Чистяков, Г. В. Коняшкин

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия
E-mail: litvinov_s@mirea.ru

Продemonстрирована разработанная система формирования синхронизирующих сигналов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В качестве приёмника сигналов ГНСС применяется SDR-приёмник HackRF One, построенный по технологии программно-определяемой радиосистемы (*англ.* Software-Defined Radio — SDR). Программная конфигурация HackRF One обеспечивает приём и обработку сигналов ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и формирование на выходе сигналов синхронизации: сигнал секундной метки 1 Гц (1 PPS — *англ.* pulse per second) и сигнал опорной частоты 10 МГц. Дополнительно формируются данные о координатах места и коды времени, привязанные к мировой системе. Предлагается вариант построения формирователя тактовых частот (от 96 до 250 МГц), использующего SDR-приёмник в качестве опорного генератора. Такой формирователь представляет собой схему косвенного синтеза на основе системы фазовой автоподстройки частоты с делителем частоты в цепи обратной связи. То есть опорное напряжение цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) подстройки частоты формируется из опорного напряжения кварцевого генератора. Стабильность частоты выходного сигнала обеспечивается схемой стабилизации напряжения питания опорного генератора и ЦАП, а также применением буферного развязывающего усилителя для снижения влияния нагрузок потребителей сигнала 10 МГц.

Ключевые слова: синхронизация, опорная частота, секундная метка, глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС, ГЛОНАСС, SDR-технологии

Одобрена к печати: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-24-32

Введение

Для корректной обработки данных в радиосистемах, разнесённых в пространстве, необходима их синхронизация. Такая синхронизация может реализовываться либо аппаратно, чтобы добиться идеального совпадения, либо после обработки в цифровом виде (Куликов и др., 2023). В ряде случаев аппаратная синхронизация может осуществляться кабельным соединением различных радиоустройств, однако это возможно лишь в случае аппаратуры, размещённой в непосредственной близости друг от друга. Синхронизация в цифровом виде неприменима в случае удалённого размещения передатчика и приёмника, поскольку не гарантирует обеспечение радиосвязи. Таким образом, для решения задачи синхронизации распределённых радиосистем видится целесообразным использовать сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). (Литвинов и др., 2019) В качестве приёмника сигналов ГНСС и выдачи синхросигналов вполне возможно использовать бюджетные решения, реализованные по технологии программно-определяемой радиосистемы (*англ.* Software-Defined Radio — SDR) (Полевода и др., 2022а). Цель данной статьи — описание разработанной системы формирования синхронизирующих сигналов, позволяющей синхронизировать различные типы устройств — как неподвижных, так и мобильных. А также проработка возможностей дальнейшего преобразования и использования синхросигналов.

Основой системы является SDR-приёмник, способный принять и обработать сигналы ГНСС и выдать коды времени, сигнал секундной метки 1 Гц (1 PPS — *англ.* pulse per second) и сигнал опорной частоты 10 МГц (Абрамова и др., 2023). Сигнал 1 Гц используется для привязки момента излучения/приёма сигналов, коды времени с приёмника поступают непосредственно на вычислительный комплекс, из частоты 10 МГц формируется опорная ча-

стота 100 МГц, используемая для запуска цифровых микросхем. Такими микросхемами могут быть аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), цифровые понижающие преобразователи (ЦПП), цифровые сигнальный процессоры (ЦСП) и пр.

Отличия в сигналах различных навигационных систем несущественно влияют на работу системы. Для формирования синхросигналов можно использовать известные ГНСС (<https://www.glonass-iac.ru>): широко используемую американскую систему GPS (*англ.* Global Positioning System) и российскую систему ГЛОНАСС, набирающую популярность китайскую систему BeiDou и европейскую систему Galileo (Шукеева, 2019).

Сигналы синхронизации

Основными сигналами синхронизации являются опорные сигналы времени и частоты — 1 PPS (*англ.* pulse per second, импульс в секунду) и 10 МГц (Роберто, 2014). Сигнал 1 PPS должен быть идентичным, с минимальной ошибкой, не превышающей $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ нс. Таким образом, импульсы 1 PPS могут передаваться только через каналы, задержка в которых известна, постоянна и может быть компенсирована. В случае опорной частоты 10 МГц не столько важны небольшие мгновенные изменения частоты и фазы, сколько неизменность средней частоты за длительный период времени. На практике считается допустимым, если изменение опорной частоты составляет $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ от величины 10 МГц, но при этом среднее значение за длительный период (за 24 ч или более) составляет 10 МГц с точностью $2 \cdot 10^{-12}$.

Накопленная ошибка является значительно более важной, чем мгновенное отклонение частоты. Так, накопленная ошибка в 100 импульсов, следующих с частотой 10 МГц, вызывает рассинхронизацию в 10 мкс. В двух радиоустройствах генераторы 10 МГц, один из которых имеет ошибку $+5 \cdot 10^{-10}$, другой — ошибку $-5 \cdot 10^{-10}$, накапливают за 3 ч разностную ошибку в 108 импульсов (10,8 мкс).

Кроме частоты 1 Гц и 10 МГц формируется массив данных, содержащий координаты места и коды времени, привязанные к мировой системе, которые передаются непосредственно на вычислительный комплекс.

Приём и обработка сигналов ГНСС

Для приёма и обработки сигналов навигационных систем авторами собран испытательный стенд на базе SDR-приёмника HackRF One (Рядинская, Полевода, 2022) с антенной GPS-ГЛОНАСС BS0318 (*англ.* Baltic Signal). В приёмнике программным методом конфигурируется алгоритм обработки сигналов, посредством которого на выходе формируются сигналы 1 PPS и 10 МГц. Эти сигналы регистрируются на цифровом осциллографе Rigol DS7024. Одновременно с этим приёмник передаёт служебную информацию (координаты и коды времени) на компьютер. Ниже представлена схема (*рис. 1*, см. с. 26) и внешний вид (*рис. 2*, см. с. 26) стенда приёма и обработки ГНСС на HackRF One.

Для приёма и обработки сигналов с дальнейшим получением синхронизационного сигнала, который будет синхронизировать устройства по времени, была построена схема в GNU Radio (Полевода и др., 2022б), представленная на *рис. 3* (см. с. 27).

В блоке **Options** задаются параметры названия функциональной схемы, язык формирования исполняемого кода и опции генерации визуального интерфейса вывода. В блоках **Variable** задаются основные переменные, которые используются в рамках функциональной схемы. Блок **Soapy HackRF Source** получает оцифрованные аналоговые данные с приёмника, в нём задаются параметры центральной частоты полосы приёма и её ширина, а также коэффициент усиления. Данные для дальнейшей обработки передаются на блок **Low Pass Filter** (низкочастотный фильтр), в котором возможна реализация различных типов оконных функций (Хэмминга, Ханна, Блэкмана и др.) для удаления высокочастотного шума и сглаживания сигналов. Блок **QT GUI Frequency Sink** отвечает за спектральное отображение обработанной

информации, а в блоке QT GUI Time Sink осуществляется потоковый вывод временной составляющей сигнала, на котором отображена принятая секундная метка 1 Гц. На рис. 4 (см. с. 27) приведён результат приёма сигнала ГЛОНАСС и выделения секундной метки.

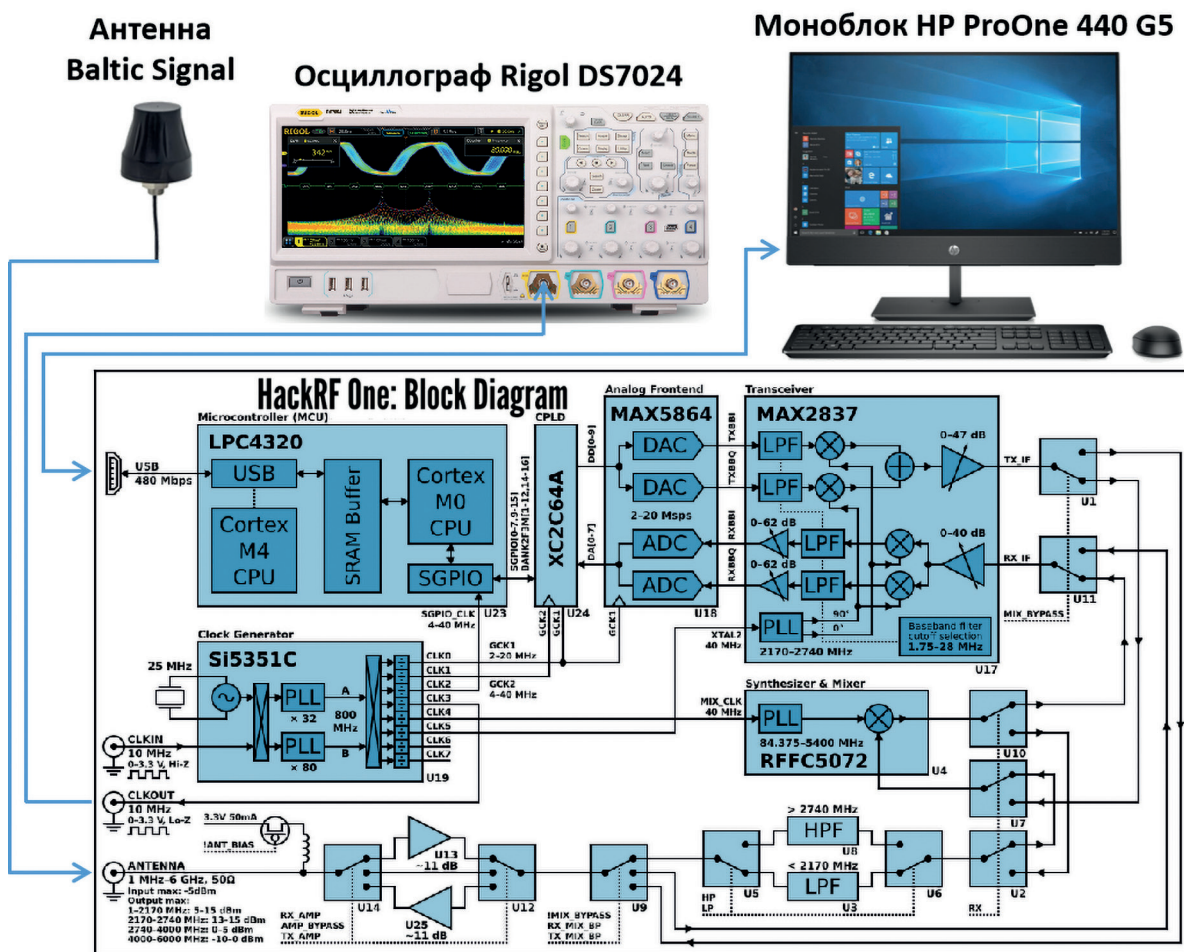


Рис. 1. Схема стенда приёма и обработки сигналов ГНСС на HackRF One



Рис. 2. Внешний вид стенда приёма и обработки ГНСС на HackRF One

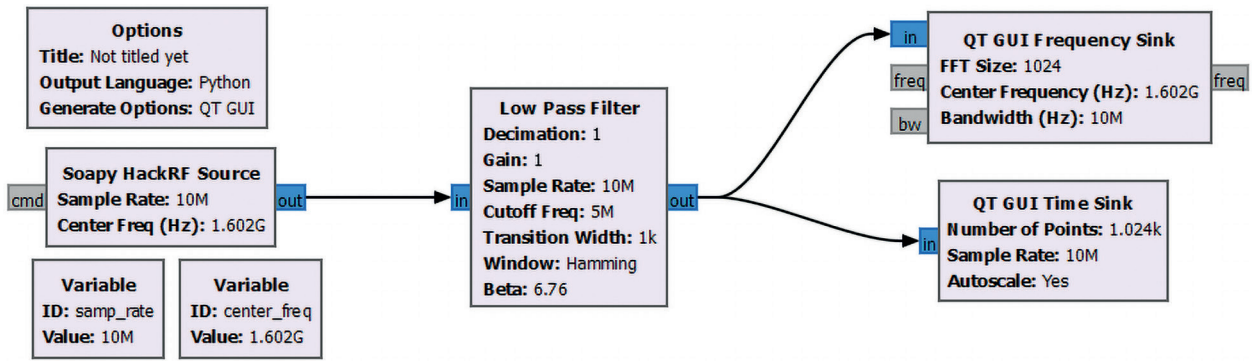


Рис. 3. Схема обработки сигнала в среде GNU Radio

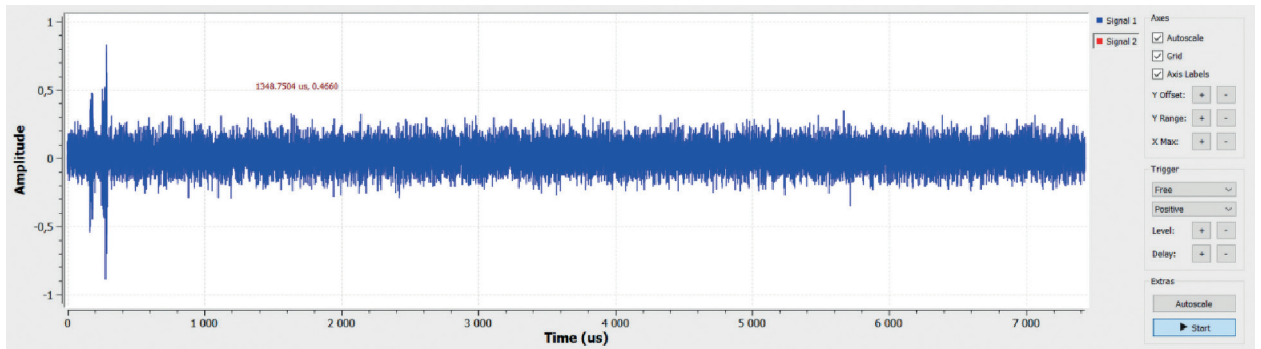


Рис. 4. Осциллограмма сигнала 1 PPS, полученная в GNU Radio

Программная конфигурация HackRF One обеспечивает приём и обработку сигналов ГЛОНАСС и формирование на выходе сигналов синхронизации:

- 1 PPS: импульс, частота 1 Гц, амплитуда 800 мВ, длительность 200 нс;
- опорный импульс: синусоида, частота 10 МГц, амплитуда 250 мВ.

Полученный сигнал 1 PPS затем прибавляется к опорной частоте 10 МГц таким образом, чтобы каждую секунду появлялся сигнал секундной метки, а затем, сразу после него, продолжался сигнал опорной частоты до следующей секундной метки. На рис. 5 приведены осциллограммы сформированных сигналов с разным разрешением по времени для наглядного представления опорной частоты и периодичности следования секундной метки. Из рисунков видно, что частота опорного сигнала — 10 МГц — прерывается секундной меткой (1 PPS).

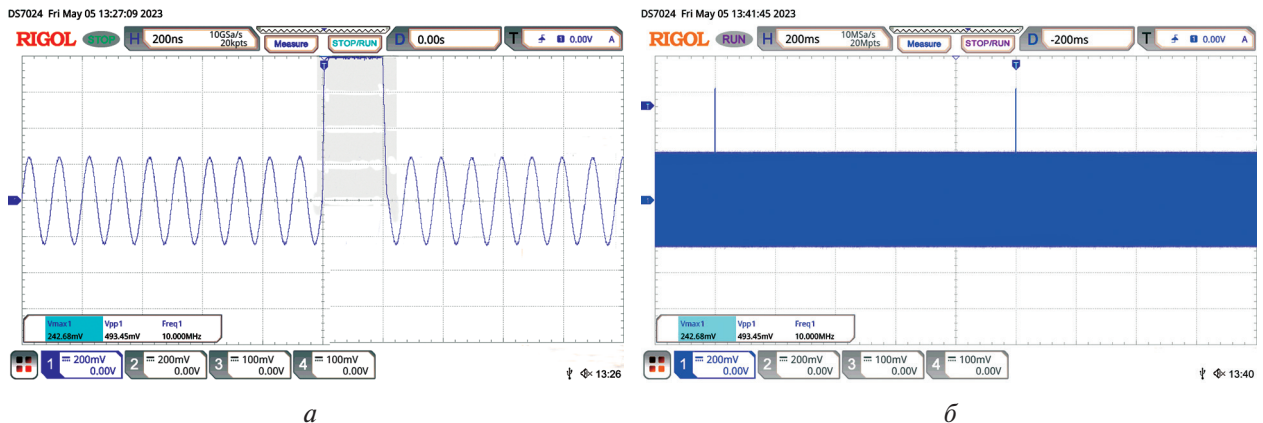


Рис. 5. Осциллограммы сигналов, зарегистрированные на осциллографе RIGOL DS7024: а — 1 PPS; б — 1 PPS и 10 МГц

Система формирования синхронизирующих сигналов

Выбор номинала опорной частоты определяется рабочей полосой формируемых (принимаемых) сигналов, требованиями по подавлению зеркального канала, характеристиками используемых АЦП, ЦАП, ЦСП, фильтров, их доступностью и стоимостью (Бобырь и др., 2021). Практика проектирования приёмных устройств диапазона частот 1–80 МГц показала, что оптимальное значение тактовой частоты АЦП должно находиться в пределах от 96 до 250 МГц (Неу, 2009). В этом случае подавление зеркального канала на 90 дБ с запасом обеспечивается одной или двумя микросборками фильтров низких частот (ФНЧ), а динамические и шумовые характеристики 16-разрядных АЦП сильно не деградируют. Следовательно, возникает необходимость разработки дополнительной аппаратуры, формирующей тактовый сигнал (например 100 МГц) из опорного 10 МГц с блока приёмника. При прямом использовании опорного сигнала синхронизирующего приёмника для формирования тактовых частот кольцом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) происходит умножение наводимых при транспортировании помеховых составляющих, о чём свидетельствуют спектры выходного сигнала схемы формирования тактовой частоты 100 МГц, приведённые на *рис. 6*.

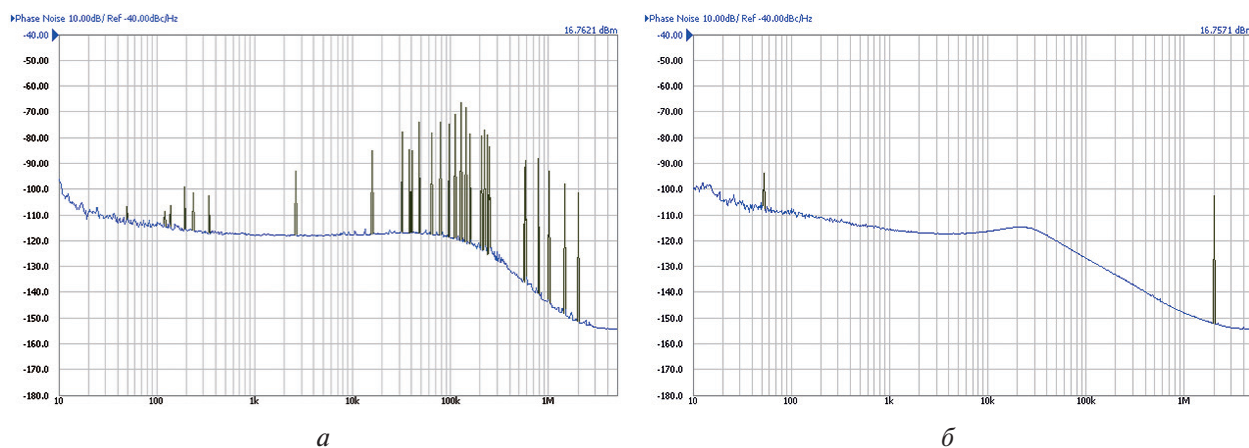


Рис. 6. Спектр тактового сигнала 100 МГц: *а* — опора от GPS приёмника Thunderbolt-E; *б* — опора от кварцевого генератора «Астра»

В качестве опорной частоты использовался выходной сигнал 10 МГц GPS приёмника Thunderbolt-E фирмы Trimble, который впоследствии заменялся сигналом от кварцевого генератора «Астра». Помехи в спектре генератора «Астра» были вызваны наводками от источника питания в диапазоне от 150 Гц до 10 кГц и внешними наводками при отстройках более 100 кГц. Помехи в спектре генератора приёмника Thunderbolt-E были вызваны наводками от цифровых цепей приёмника. Учитывая, что длина линии связи для доставки опорных сигналов составляет меньше метра, даже использование коаксиальных кабелей с двойным экранированием (эффективность экранирования более 120 дБ/м) не позволяет обеспечить подавление внешних высокочастотных помех на величину более 80–90 дБ, а наводку от сети 50 Гц на величину более 60–70 дБ.

Таким образом, для подавления помех в тактовом сигнале на величину более 90 дБ необходимо принять меры, уменьшающие влияние помех в опорном сигнале 10 МГц при формировании тактовых сигналов.

Предлагаемый вариант построения формирователя тактовых частот, структурная схема которого представлена на *рис. 7*, предусматривает для выполнения заданных требований к качеству тактового опорного сигнала:

- использование опорного синхронизирующего приёмника в качестве источника опорного сигнала 10 МГц, кода текущего времени и сигнала секундной метки;

- использование схемы перепривязки частоты для узкополосной фильтрации помеховых составляющих опорного сигнала синхронизирующего приёмника;
- применение специализированной микросхемы синтеза высокочастотного сигнала тактовой частоты с малым джиттером.

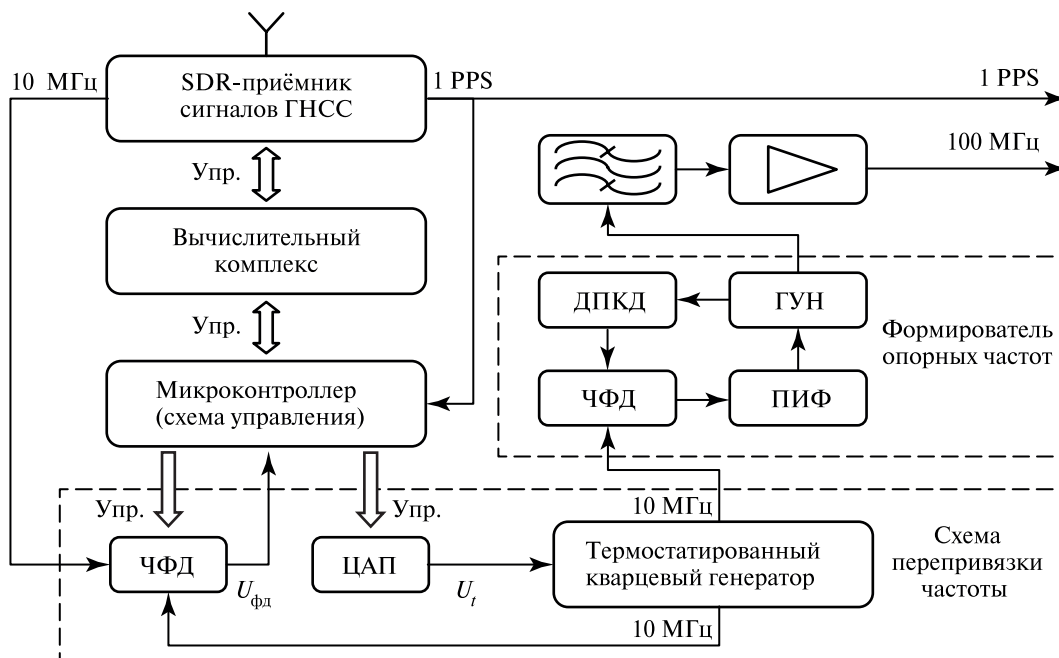


Рис. 7. Структурная схема тракта формирования опорной частоты

В качестве кварцевого генератора на опорную частоту 10 МГц можно использовать малошумящие прецизионные кварцевые генераторы, например серии ГКХХХ-ТС (АО «Морион»). Конкретная модель выбирается в зависимости от технических и экономических требований. Например, основное отличие генератора ГК200-ТС от ранее применявшихся генераторов серии ГК54-ТС (ГК75-ТС) состоит в снижении фазовых шумов в зоне малых отстроек от несущей (от 1 до 10 Гц) на 10 дБ, что демонстрируют сравнительные характеристики относительного уровня фазовых шумов генераторов ГК54-ТС (https://morion.com.ru/files/oscillators/103_file-ru.pdf?1603277655), ГК200-ТС (https://morion.com.ru/files/oscillators/30_file-ru.pdf?1599562582) и ГК267-ТС (https://morion.com.ru/files/oscillators/57_file-ru.pdf?1658907186), приведённые в *таблице*.

Стабильность частоты выходного сигнала 10 МГц дополнительно обеспечивается:

- схемой стабилизации напряжения питания опорного генератора и ЦАП;
- формированием опорного напряжения ЦАП подстройки частоты из опорного напряжения кварцевого генератора;
- применением буферного развязывающего усилителя для снижения влияния нагрузок потребителей сигнала 10 МГц.

Для подстройки частоты видится правильным использование прецизионного двухканального ЦАП разрядностью 16 бит и встроенной двухступенчатой схемой регулирования (грубая и точная), которая обеспечивает дискрет регулирования менее 0,0001 Гц. Применяемая схема включения ЦАП и качество элементной базы схемы минимизируют дрейф напряжения и шумы управляющего напряжения до уровня менее дискрета регулирования.

Для формирования частоты 100 МГц предлагается применить схему косвенного синтеза на основе системы фазовой автоподстройки частоты с делителем частоты в цепи обратной связи. В качестве частотно-фазового детектора (ЧФД) и делителей частоты с переменным

коэффициентом деления выбирается микросхема, обеспечивающая наименьший уровень собственного шума ЧФД при частоте сравнения 10 МГц, которая может работать при малых коэффициентах деления и позволяет управлять выходным током ЧФД и изменять полярность фазового детектора.

Сравнительные характеристики относительного уровня фазовых шумов генераторов ГК54-ТС, ГК200-ТС и ГК267-ТС

| Номинальная частота, МГц | ГК54-ТС | ГК200-ТС | ГК267-ТС |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Долговременная нестабильность частоты (без коррекции): | | | |
| • за год | $\leq \pm 1,0 \cdot 10^{-7}$ | $\leq \pm 5,0 \cdot 10^{-8}$ | $\leq \pm 5,0 \cdot 10^{-8}$ |
| • за 10 лет | | $\leq \pm 1,5 \cdot 10^{-7}$ | $\leq \pm 1,5 \cdot 10^{-7}$ |
| Кратковременная нестабильность частоты (вариация Аллана) за 1 с | $\leq \pm 5,0 \cdot 10^{-12}$ | $\leq \pm 5,0 \cdot 10^{-12}$ | $\leq \pm 2,0 \cdot 10^{-12}$ |
| Спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройке, дБ/Гц: | | | |
| • 1 Гц | -95 | -103 | -173 |
| • 10 Гц | -120 | -133 | -135 |
| • 100 Гц | -140 | -155 | -153 |
| • 1000 Гц | -150 | -160 | -160 |
| • 100 00 Гц | -155 | -161 | -160 |
| Пределы перестройки частоты при поставке относительно номинального значения частоты | $\geq \pm 3,0 \cdot 10^{-7}$ | $\geq \pm 4,0 \cdot 10^{-7}$ | $\geq \pm 3,0 \cdot 10^{-7}$ |

Характеристики перестраиваемого генератора управляемого напряжением (ГУН) в петле ФАПЧ определяют достижимый уровень шумового пьедестала вне полосы пропускания петли ФАПЧ. Важным параметром при выборе генератора является низкое напряжение управления, позволяющее исключить из петли ФАПЧ операционный усилитель, что, в свою очередь, исключает влияние его характеристик (шумы, АЧХ и ФЧХ) на характеристики петли ФАПЧ. Схема фазового детектора кольца ФАПЧ предусматривает установку на выход пропорционально интегрирующего фильтра ФНЧ, надёжно подавляющего частоту сравнения в спектре выходного сигнала, так как она будет источником дискретных помех при формировании сигнала.

Заключение

При разработке распределённых радиосистем необходимо уделять внимание синхронизации работы этих устройств. Одним из возможных инструментов для решения этой задачи представляется синхронизация по сигналам ГНСС с применением SDR-технологий. Так, в работе показано использование SDR-приёмника HackRF One в качестве опорного генератора, формирующего синхронизирующий сигнал 1 PPS и опорный сигнал 10 МГц. Этот генератор использует сигналы ГЛОНАСС и подстраивается под квантовые эталоны, размещаемые на спутниках. Кроме частоты 10 МГц и импульсного сигнала частотой 1 Гц, приёмник передаёт координаты места и коды времени, привязанные к мировой системе. Опорный сигнал 10 МГц используется для формирования тактовых частот от 96 до 250 МГц. Предложенная схема косвенного синтеза на основе системы фазовой автоподстройки частоты с делителем частоты в цепи обратной связи может быть использована при разработке модулей синхронизации радиоэлектронных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022.

Литература

1. *Абрамова Е. А., Литвинов С. В., Самохина Е. В.* Синхронизация по сигналам ГНСС с применением SDR-технологий // Научно-техн. вестн. Поволжья. 2023. № 5. С. 18–21.
2. *Бобырь М. В., Титов В. С., Иванов В. И., Потехин В. А.* Проектирование аналоговых и цифровых устройств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ООО «Научно-изд. центр ИНФРА-М». 2021. 245 с. DOI: 10.12737/1070341.
3. *Куликов Г. В., Данг С. Х., Куликов А. Г.* Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией // Russian Technological J. 2023. Т. 11. № 3. С. 30–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>.
4. *Литвинов С. В., Паньшин Е. А., Качановский Ю. М., Алексеева А. В.* Проведение работ по исследованию расширения функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» государственной сети Росгидромета // Гелиогеофиз. исслед. 2019. № 21. С. 32–39.
5. *Неу Т.* Влияние погрешностей тактовой частоты на работу АЦП // Компоненты и технологии. 2009. № 11. С. 34–38.
6. *Полехова Ю. А., Крижановский М. Н., Литвинов С. В., Горбунов Р. В.* (2022а) Возможности применения SDR-технологий для работы с сигналами ГНСС // Фундам., поисковые, приклад. исслед. и инновац. проекты: сб. тр. Нац. научно-практ. конф. 2022. С. 330–335.
7. *Полехова Ю. А., Троицкая А. Е., Бурень Г. А., Рядинская Э. А., Коняшкин Г. В.* (2022б) Разработка каналов связи с цифровой модуляцией в GNU Radio // Вопросы электромеханики: Тр. ВНИИЭМ. 2022. Т. 189. № 4. С. 41–48.
8. *Роберто В.* Стабильная синхронизация одночастотных сетей с помощью приемников GPS новой концепции ABE Elettronica // Broadcasting: телевидение и радиовещание. 2014. № 4/5(117). С. 52–53.
9. *Рядинская Э. А., Полехова Ю. А.* Конфигурирование HackRF One на передачу сигнала с АФМ // Фундам., поисковые, приклад. исслед. и инновац. проекты: сб. тр. Нац. научно-практ. конф. 2022. С. 183–187.
10. *Шукеева А. Н.* Точное позиционирование с современными глобальными навигационными спутниковыми системами: GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou // Молодой ученый. 2019. № 3(241). С. 64–66.

Synchronization of dispersed radio-electronic devices on GNSS signals using SDR technologies

S. V. Litvinov, Yu. A. Polevoda, E. A. Chistyakov, G. V. Konyashkin

*MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
E-mail: litvinov_s@mirea.ru*

The work demonstrates the developed system of synchronizing signals generation using signals of global navigation satellite systems (GNSS). As a receiver of GNSS signals the SDR receiver HackRF One is used, built on the technology of Software-Defined Radio (SDR). Software configuration of HackRF One provides reception and processing of GLONASS signals and formation of synchronization signals at the output: the signal of the second marker 1 Hz (1 PPS — pulse per second) and the reference frequency signal 10 MHz. In addition, data on the coordinates of the place and time codes tied to the world system are formed. A version of the construction of the shaper clock frequencies (from 96 to 250 MHz) using SDR receiver as a reference oscillator is proposed. Such a shaper is an indirect synthesis circuit based on a system of phase frequency autotuning with a frequency divider in the feedback circuit. This means that the reference voltage of the digital-to-analog converter (DAC) is formed from the reference voltage of the quartz oscillator. Stability of the output signal frequency is provided by the scheme of stabilization of the supply voltage of the reference oscillator and DAC, as well as the use of a buffer decoupling amplifier to reduce the load influence of 10 MHz signal consumers.

Keywords: synchronization, reference frequency, second marker, global navigation satellite systems, GNSS, GLONASS, SDR technologies

Accepted: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-24-32

References

1. Abramova E. A., Litvinov S. V., Samokhina E. V., Synchronization by GNSS signals using SDR technology, *Scientific and Technical Bull. of the Volga Region*, 2023, No. 5, pp. 18–21 (in Russian).
2. Bobyr M. V., Titov V. S., Ivanov V. I., Potekhin V. A., *Proektirovaniye analogovykh i tsifrovyykh ustroystv* (Design of analog and digital devices), 2nd ed., Moscow: INFRA-M Scientific Publishing Center LLC, 2021, 245 p. (in Russian), DOI 10.12737/1070341.
3. Kulikov G. V., Dang X. Kh., Kulikov A. G., Effect of synchronization system errors on the reception noise immunity of amplitude-phase shift keyed signals, *Russian Technological J.*, 2023, Vol. 11, Issue 3, pp. 30–37 (in Russian), <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>.
4. Litvinov S. V., Panshin E. A., Kachanovskii Iu. M., Alekseeva A. V., Analysis of possible improvements of roshydromet's government network ionozond "Parus-A", *Heliogeophysical Research*, 2019, No. 21, pp. 32–39 (in Russian).
5. Neu T., The effect of clock frequency errors on the operation of the ADC, *Components and technologies*, 2009, Vol. 11, pp. 34–38 (in Russian).
6. Polevoda Yu. A., Krizhanovsky M. N., Litvinov S. V., Gorbunov R. V. (2022a), Possibilities of SDR-technologies application for work with GNSS signals, *Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovatsionnye proekty, Sbornik trudov Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Fundamental, search, applied research and innovative projects, Proc. National Scientific and Practical Conference), 2022, pp. 330–335 (in Russian).
7. Polevoda Yu. A., Troitskaya A. E., Buren G. A., Ryadinskaya E. A., Konyashkin G. V. (2022b), Development of communication channels with digital modulation in GNU Radio, *Voprosy elektromekhaniki, Trudy VNIIEM*, 2022, Vol. 189, pp. 41–48 (in Russian).
8. Roberto V., Stable synchronization of single-frequency networks using GPS receivers of the new ABE Elettronica concept, *Broadcasting: Television and Radio-Broadcasting*, 2014, Vol. 4/5(117), pp. 52–53 (in Russian).
9. Ryadinskaya E. A., Polevoda Yu. A., Configuring HackRF One to transmit a signal from an AFM, *Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovatsionnye proekty, Sbornik trudov Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Fundamental, search, applied research and innovative projects, Proc. National Scientific and Practical Conference), 2022, pp. 183–187 (in Russian).
10. Shukeeva A. N., Precise positioning with modern global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou, *Young scientist*, 2019, Vol. 3(241), pp. 64–66 (in Russian).