

Постановка задачи синхронизации SDR устройств для позиционирования в перспективных сетях связи

Д. С. Рябиков

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*

dimas3067@mail.ru

Аннотация. Для проверки и демонстрации высокоточных алгоритмов и систем измерения дальности и позиционирования требуется тестовый стенд для генерации и приема широкополосных радиосигналов, синхронизированных по времени и частоте. Разработка такого стенда требует решения нескольких задач. Необходимо поддерживать точную синхронизацию по времени и частоте, полученную от централизованного распределенного временно-частотного опорного сигнала, в аппаратуре передатчиков и приемников, а также обеспечить устойчивую пропускную способность данных хранения данных на уровне нескольких ГБ. В работе рассматривается постановка задачи синхронизации SDR устройств для позиционирования в перспективных сетях связи и различные подходы к ее решению.

Ключевые слова: SDR, USRP, синхронизация, позиционирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), являющиеся в настоящее время наиболее популярной технологией позиционирования, хорошо работают в открытых пространствах с метровой точностью. Несмотря на их проверенную эффективность и высокую экономическую ценность, ГНСС имеет ряд серьезных ограничений, особенно в тех областях, где они наиболее необходимы, а именно в застроенных, городских районах и внутри помещений, где люди живут, работают и перемещаются. В таких районах производительность ГНСС снижается, поскольку сигналы спутников блокируются зданиями и другими объектами, а приёмники ГНСС могут подвержены ошибкам из-за многолучевых отражений сигналов, по которым выполняются измерения расстояния. Кроме того, ГНСС уязвимы к непреднамеренным или преднамеренным помехам, таким как спуфинг и глушение [1].

Новые услуги измерения расстояния и локации, используемые для навигации, автоматизированного вождения, локализации смартфонов и дополненной реальности, требуют повышенной точности на уровне дециметров и сантиметров, а также должны работать в зонах, где ГНСС недоступна. На рынке доступны несколько наземных систем измерения расстояния для использования внутри и снаружи помещений, а также разрабатываются новые алгоритмы, методы и платформы для достижения более высокой точности [2]–[5]. Обычно измерение расстояния основано на оценке времени между передачей сигнала на передатчике и его

приёмом на приёмнике. В условиях плотного многолучевого радиоканала, то есть при большом количестве отражений, приёмник может захватить отражённый сигнал вместо желаемого прямого сигнала или сигнала прямой видимости LoS (Line-of-Sight). Кроме того, он может не суметь отличить прямой сигнал от близких отражений с немного большей задержкой, что приведёт к смещению оценки времени прибытия ToA (Time of Arrival) сигнала. Поскольку точность оценки ToA [6] и разделимость многолучевых отражений обратно пропорциональны ширине полосы сигнала, для достижения высокой точности измерения расстояния и позиционирования необходимы широкополосные сигналы измерения расстояния. Помимо высокого разрешения по расстоянию, передатчики и приёмники также должны быть точно синхронизированы по времени, а в случае использования фазового измерения расстояния также требуется точная синхронизация по радиочастоте. Это может быть достигнуто путём подключения передатчиков к точному эталонному сигналу времени и частоты, например, сигналу 1 PPS (Pulse Per Second) и эталону частоты 10 МГц. Точная синхронизация передатчиков и приёмников важна, поскольку даже небольшая ошибка, например, в 1 нс, уже вызывает ошибку измерения расстояния в 0,3 м. Для разработки алгоритмов измерения расстояния и позиционирования с высокой точностью крайне желательна гибкая установка тестового стенда для сбора экспериментальных данных в реальных условиях и демонстрации концепции. Внутренние ошибки такой системы должны быть (значительно) меньше, чем те, на которые нацелен алгоритм или система, подлежащая оценке.

Примерные системные требования для потенциального устройства [7]:

- синхронизация по времени между различными устройствами с точностью лучше 100 пс;
- эталоны времени и частоты, происходящие из одного источника;
- широкополосная передача сигналов с полосой пропускания >100 МГц, одновременная передача в нескольких диапазонах;
- диапазон настройки: 1–5 ГГц;
- устойчивая передача принимаемых сигналов;
- автономная работа базовых станций (передатчиков).

Для решения задачи широкополосной передачи и приёма данных может быть разработана система для конкретного приложения. В [8] представлена платформа для сбора данных на основе субдискретизации, предназначенная для тестирования широкополосных мультимедийных приёмников. В [10] показана платформа для передачи и приёма сигналов IR-UWB с периодической передачей импульсов и эквивалентной временной дискретизацией.

Системы программно-определяемого радио SDR (Software Defined Radio) — это гибкие программируемые аппаратные устройства, которые могут использоваться для прототипирования самых разнообразных радиотехнологий. Устройства SDR доступны как с низкой сложностью и низкой стоимостью, так и в виде очень продвинутого и дорогостоящего оборудования. Эти устройства имеют блок цифровой обработки сигналов, а также отдельные блоки АЦП/ЦАП и радиочастотные модули для передачи и приёма радиосигналов. Более продвинутые SDR платы также содержат ПЛИС для реализации пользовательских алгоритмов обработки сигналов на борту [9]. SDR платы можно настраивать и управлять через подключённый ПК. Обработка данных может выполняться как в самом SDR устройстве, так и на ПК через высокоскоростное соединение для дальнейшей офлайн-обработки.

Примеры систем SDR для прототипирования, проверки и демонстрации, связанные с измерением расстояния и позиционированием, можно найти в [10]–[13]. Например, в [10] представлена система внутренней локализации на основе SDR с использованием сигналов Wi-Fi и метода TDoA (Time Difference of Arrival). В [12] демонстрируются методы измерения расстояния на основе многоканальных широкополосных сетей. В [13] представлена архитектура SDR для навигации с использованием сигналов CDMA (Code Division Multiple Access). Многие из этих работ, хотя и используют гибкость SDR, являются очень специфичными для конкретных приложений. Вся платформа, как правило, строится для проверки или демонстрации конкретных методов измерения расстояния или позиционирования.

II. ПРИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНЛОВ

Прием широкополосных радиосигналов для прототипирования алгоритмов измерения дальности может быть проблематичным из-за большого объема генерируемых данных. Учитывая вычислительные затраты и пропускную способность данных такого полного приема, проблему можно облегчить, реализуя и тестируя все алгоритмы непосредственно на устройстве с реальными сигналами, принимаемыми радиочастотной аппаратурой в тестовом стенде. Этот вариант обработки, однако, может оказаться очень трудоемким и не без проблем в реализации, особенно из-за ограничений разработки аппаратуры FPGA и ASIC. Кроме того, такая реализация, как правило, нецелесообразна на ранних этапах разработки, когда алгоритмы и техники не надежно проверены.

В этой ситуации обычной практикой является сначала реализация и тестирование на компьютере в MATLAB [14], Python/NumPy с моделями сигналов, а затем с сигналами, полученными из радиоэфира. Это позволяет быстрее провести первичную оценку

производительности. Затем, если необходимо, на более позднем этапе может быть выполнена аппаратная реализация для дальнейшей проверки.

Для достижения прототипирования алгоритмов измерения дальности стоит использовать тестовый стенд на базе широкополосных SDR. Таблица 1 представляет характеристики пяти устройств SDR, способных к приему двухканальных широкополосных сигналов. Максимальная полоса пропускания варьируется от 320 до 1200 МГц, а скорости выборки — от 400 до 1480 MSPS.

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ SDR УСТРОЙСТВ, СПОСОБНЫХ ПРИНИМАТЬ ДВУХДИАПАЗОННЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ

Устройство	Максимальная полоса пропускания (МГц)	Максимальная частота выборки (MSPS)	Частотный диапазон (ГГц)
Crimson TNG [15]	1200 (4 двойных гх канала)	1480 (4 x 370)	от 0 до 6
AARONIA Spectran V6 [16]	490 (2 x 245)	500 (2 x 250)	от 0.01 до 6
Ettus N320/N321 [17]	400 (2 x 200)	500 (2 x 250)	от 0.003 до 6
Ettus N300/N310 [18]	400 (4x 100)	> 600	от 0.003 до 6
Ettus X300/X310 [19]	320 (2 x 160)	400 (2 x 200)	от 0.01 до 6

Наиболее популярным и универсальным программным решением, подходящим для разработки алгоритмов на SDR, является GNU Radio. GNU Radio – это бесплатный и открытый инструмент для разработки и управления программным обеспечением, предоставляющий блоки обработки сигналов для систем SDR [20]. Эти блоки написаны на C++ или Python. GNU Radio совместим с большим количеством систем SDR, доступных на рынке. Также стоит отметить, что USRP компании Ettus Research имеют возможность реализовывать аппаратные блоки цифровой обработки сигналов в FPGA через RFNoC (Radio Frequency Network on Chip) [21].

Благодаря RFNoC становится возможной потоковая передача данных между блоками цифровой обработки сигналов, работающими на аппаратуре, а также между аппаратными и хостовыми блоками ПК через драйвер UHD (USRP Hardware Driver) для USRP (Universal Software Radio Peripheral) от компании Ettus Research, компоненты блока, который может быть разработан с помощью RFNoC, представлены на рисунке 1, включая его интеграцию в GNU Radio.

III. СИНХРОНИЗАЦИЯ

Синхронизация – критическая проблема в измерении дальности. Поскольку широкополосные сигналы измерения дальности используются для достижения точности на уровне дециметров или даже сантиметров, небольшое временное несоответствие, возникающее в цепи передачи или приема, значительно снижает производительность измерения дальности. Выбор синхронизацию на основе внешнего временного опорного сигнала (1PPS/PPS) и частотного опорного сигнала 10 МГц позволяет выравнивать передающие и

приемные окна по времени для правильной записи сигналов измерения дальности на стороне приемника. Сигналы 1PPS и 10 МГц могут быть получены из различных источников.

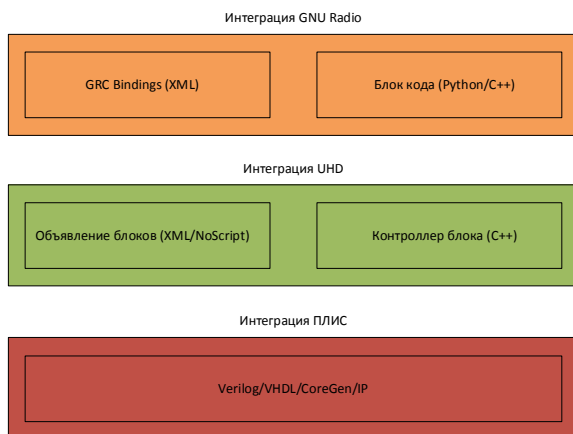


Рис. 1. Компоненты блока RFNoC

Когда приемник и передатчик(и) тестового стенда находятся относительно близко друг к другу, источником синхронизации может быть распределитель тактовых сигналов, электрические выходы 1PPS и 10 МГц которого передаются по коаксиальным кабелям к SDR. Когда устройства тестового стенда находятся на большем расстоянии друг от друга, синхронизация на основе GPS может показаться решением. Однако точность времени GPS составляет порядка 10 нс и, следовательно, не подходит для точности на уровне дециметров. Беспроводная синхронизация высокой точности может обеспечить субнаносекундную синхронизацию [22], [23] и может использоваться для синхронизации устройств тестового стенда.

Синхронизация на основе White Rabbit (WR) по оптическим волокнам также является перспективным решением для распределения точных синхронизационных опорных сигналов на больших территориях. Распределение временно-частотных опорных сигналов по десяткам километров с субнаносекундной точностью синхронизации было продемонстрировано [24]. Высокая временная точность на уровне 100 пс уже была продемонстрирована с WR [25], [26]. Ошибка времени 100 пс вызовет смещение измерения дальности 3 см, что может быть приемлемо для системы измерения дальности или позиционирования на уровне дециметров [27]. В предложенном тестовом стенде временно-частотные опорные сигналы распределяются по небольшому оптическому волокну с использованием узлов WR.

Приемник тестового стенда может работать в синхронном режиме, совместно используя те же временные и частотные опорные сигналы с передатчиком(и), или может работать в асинхронном автономном режиме, который более подходит для автомобильного сценария. В асинхронном режиме используется метод на основе согласованного фильтра для обнаружения времени прибытия входящих пакетов измерения дальности и временного выравнивания окон приема с окнами передачи.

Синхронный режим работы практически не вызывает временных задержек; однако синхронизированные модули могут все еще иметь фазовые сдвиги или

разницу на уровне субвыборки во времени передачи/приема. Для асинхронного режима работы влияние временных задержек значительно сильнее. Кроме того, вводится частотное смещение свободно работающего приемного осциллятора. Синхронизация на основе согласованного фильтра не является полностью сопоставимой с синхронизацией на основе внешних сигналов 1PPS/10 МГц, будучи менее точной.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе была рассмотрена задача синхронизации SDR устройств для позиционирования в перспективных сетях связи. Выдвинуты требования к тестовой SDR платформе, исследованы устройства, позволяющие принимать широкополосные сигналы и реализовывать алгоритмы цифровой обработки сигналов. Использование эталонного сигнала времени и частоты, например 1 PPS и 10 МГц является хорошим вариантом для обеспечения необходимой синхронизации. Также технология White Rabbit показала себя как перспективное решение проблем синхронизации, которая может обеспечить высокий уровень синхронизации данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Schmidt E., Ruble Z., Akopian D., Pack D. J. Software-defined radio GNSS instrumentation for spoofing mitigation: A review and a case study // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. V. 68. №. 8. P. 2768–2784. August 2019.
- [2] Barnes J., Rizos C., Kanli M., Pahwa A., A positioning technology for classically difficult GNSS environments from locata // *IEEE/ION Position, Location, Navigation Symposium*. P. 715–721.
- [3] Mimoune K.-M., Ahriz I., Guillory J. Evaluation and improvement of localization algorithms based on UWB pozyx system // *International Conference Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. P. 1–5. September 2019.
- [4] Kahe G., Masoumi Ganjgah F. MAKAN: A low-cost lowcomplexity local positioning system // *Navigation*, V. 66, №. 2. P. 401–415, June 2019.
- [5] Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M. Exploiting LTE signals for navigation: Theory to implementation // *IEEE Transactions on Wireless Communications*, V. 17, №. 4. P. 2173–2189. April 2018.
- [6] Kay S. M. Fundamentals of statistical signal processing // *Estimation Theory*. V. 1. P. 53.
- [7] Diouf C., Dun H., Kazaz T., Janssen G., Tiberius C. A USRP-Based Testbed for Wideband Ranging and Positioning Signal Acquisition // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. V.70. P 1–15. March 2021.
- [8] Oya J. R. G. Munoz F., Torralba A., Jurado A., Garrido A. J., Banos J., Data acquisition system based on subsampling for testing wideband multistandard receivers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. V. 60. №. 9. P. 3234–3237. September 2011.
- [9] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Экспериментальная апробация SDR-платформы LibreSDR // *Научно-Техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная дню радио*. 2024. №. 79. С. 174–177.
- [10] Cervetto M., Marchi E., Galarza C. G., A fully-configurable SoC-based IR-UWB platform for data acquisition and algorithm testing // *IEEE Embedded Systems Letters*. May 2020.
- [11] Xie T., Zhang C., Wang Z. Wi-Fi TDoA indoor localization system based on SDR platform // *IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*. P. 82–83. November 2017.
- [12] Wolf F., Doré J.-B., Popon X., Rivaz S. D., Dehmas F., Cances J.-P. Coherent multi-channel ranging for narrowband LPWAN: Simulation and experimentation results // *15th Workshop Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*. P. 1–6. October 2018.
- [13] Khalife J., Shamaei K., Kassas Z. M. A software-defined receiver architecture for cellular CDMA-based navigation // *IEEE/ION Position, Location, Navigation Symposium (PLANS)*. P. 816–826. April 2016.

- [14] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Программный модуль обработки данных протокола NMEA и отображение местоположения на цифровой модели местности в среде MATLAB // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная дню радио. 2023. №. 78. С. 37–43.
- [15] Crimson TNG. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pervices.com/crimson-tng/> (Дата обращения 02.03.2025).
- [16] Spectran V6. [Электронный ресурс]. URL: https://prist.ru/upload/iblock/427/Aaronia_Spectran_V6_X_Datasheet.pdf?ysclid=m7ruz9yx5v201800481 (Дата обращения 02.03.2025).
- [17] Ettus N320/N321. [Электронный ресурс]. URL: <https://kb.ettus.com/N320/N321> (Дата обращения 02.03.2025).
- [18] Ettus N300/N310. [Электронный ресурс]. URL: <https://kb.ettus.com/N300/N310> (Дата обращения 02.03.2025).
- [19] Ettus X300/X310. [Электронный ресурс]. URL: <https://kb.ettus.com/X300/X310> (Дата обращения 02.03.2025).
- [20] Abirami M., Hariharan V., Sruthi M. B., Gandhiraj R., Soman K. P. Exploiting GNU radio and USRP: An economical test bed for real time communication systems // Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). P. 1–6. July 2013.
- [21] Braun M., Pendlum J. A flexible data processing framework for heterogeneous processing environments: RF network-on-chip // International Conference on FPGA Reconfiguration for General-Purpose Computing (FPGA4GPC). P. 1–6. August 2017.
- [22] Prager S., Haynes M. S., Moghaddam M. Wireless subnanosecond RF synchronization for distributed ultrawideband software-defined radar networks // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques V. 68, №. 11. P. 4787–4804. November 2020.
- [23] Rizos C., Yang L. Background and recent advances in the locata terrestrial positioning and timing technology // Sensors. V. 19, №. 8. P. 1821. April 2019.
- [24] Moreira P., Serrano J., Wlostowski T., Loschmidt P., Gaderer G. White rabbit: Sub-nanosecond timing distribution over Ethernet // Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. P. 1–5. October 2009.
- [25] Dierikx E. Optical fiber trans-national time transfer for comparing two UTC realisations // European Frequency Time Forum (EFTF/IFC). P. 1–2. April 2019.
- [26] Sotiropoulos N., Okonkwo C. M., Nuijts R., Waardt H., Koelemeij J. C. J. Delivering 10 Gb/s optical data with picosecond timing uncertainty over 75 km distance // Optics Express. V. 21, №. 26, P. 32643–32654, 2013.
- [27] Diouf C., Dun H., Kazaz T., Janssen G., Tiberius C. Demonstration of a decimeter-level accurate hybrid optical-wireless terrestrial positioning system // Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS). P. 2220–2228. October 2020.