

УДК 621.391:621.396

ББК 39.57-5

DOI 10.51955/23121327\_2022\_1\_88

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ GNSS ПРИЁМНИКОВ

*Роман Олегович Арефьев,  
orcid.org/0000-0001-8040-6470,  
кандидат технических наук,  
Московский государственный технический университет гражданской авиации  
(Иркутский филиал)  
ул. Коммунаров, д. 3.  
Иркутск, 664047, Россия  
aqua160905@mail.ru*

*Олег Николаевич Скрыпник,  
orcid.org/0000-0002-2006-0428,  
доктор технических наук, профессор  
Белорусская государственная академия авиации,  
ул. Уборевича, д. 77.  
Минск, 220096, Республика Беларусь  
skripnikon@yandex.ru*

*Наталья Геннадьевна Арефьева (Астраханцева),  
orcid.org/0000-0002-9916-1239,  
кандидат технических наук,  
Московский государственный технический университет гражданской авиации  
(Иркутский филиал)  
ул. Коммунаров, д. 3.  
Иркутск, 664047, Россия  
n\_astrahanceva\_awesome@mail.ru*

**Аннотация.** В статье представлен опыт использования программно-определяемых приемников для приёма сигналов от навигационных спутников системы GPS и Beidou. Рассмотрены особенности платформы GNSS SDR и реализации на её основе приемников спутниковых систем навигации. Показана структура потокового графа GNSS SDR, дано описание функциональных возможностей каждого блока. В качестве радиочастотной части приёмника используется платформа HackRF с подключенной активной антенной и кварцевого генератора с компенсацией температуры. Проведено тестирование приемника с помощью имитатора СН-3803М, излучающего сигналы системы GPS. Экспериментальным путём получены зависимости времени решения навигационной задачи и количества навигационных спутников, по которым осуществляется слежение, от задаваемой вероятности ложной тревоги.

Путем натурных экспериментов сравнены характеристики работы SDR-приемника и портативного приемника ATGM336H (количество спутников в режиме слежения, точность позиционирования, геометрический фактор) по системам GPS и Beidou. Выявлены и проанализированы основные особенности работы приемников.

**Ключевые слова:** GPS, SDR, Beidou, программно-определяемый приёмник, геометрический фактор, точность позиционирования.

# THE EXPERIENCE OF USING GNSS SOFTWARE-DEFINED RECEIVERS

*Roman O. Arefyev,  
orcid.org/0000-0001-8040-6470,  
Candidate of Technical Sciences,  
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk branch,  
3, Kommunarov  
Irkutsk, 664047, Russia  
aqua160905@mail.ru*

*Oleg N. Skrypnik,  
orcid.org/0000-0002-2006-0428,  
Doctor of Technical Sciences, professor,  
Belarusian State Academy of Aviation,  
77, Ubovich  
Minsk, 220096, Republic of Belarus  
skripnikon@yandex.ru*

*Natalya G. Arefyeva (Astrakhanceva),  
orcid.org/0000-0002-9916-1239,  
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk branch,  
3, Kommunarov  
Irkutsk, 664047, Russia  
n\_astrahanceva\_awesome@mail.ru*

**Abstract.** The paper describes the experience of using software-defined receivers for receiving signals from GPS and Beidou navigation satellites. The peculiarities of the GNSS SDR platform and implementation of the satellite navigation system receivers on its basis were considered. The structure of the GNSS SDR flow graph with description of the functional capacity of each block was shown. As an RF part of the receiver, a HackRF platform with an active antenna and Temperature Controlled Crystal Oscillator was used. The receiver was tested with help of the SN-3803M simulator radiating GPS signals. The dependences of the time required for position-fixing and the number of the navigational satellites which provide tracking on the given false alarm probability were obtained experimentally.

Through natural experiments the authors compared the performance (number of tracking satellites, positioning accuracy, dilution of precision) of the SDR-receiver and *ATGM336H* portable receiver applied to the GPS and Beidou systems. The main features of the receivers operation were identified and analyzed.

**Keywords:** GPS, SDR, Beidou, software-defined receiver, dilution of precision, positioning accuracy.

## **Введение**

В основе модернизации мировой аэронавигационной системы и внедрения новых технологий использования воздушного пространства и организации воздушного движения лежат глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) [Глобальный аэронавигационный..., 2013]. В частности, концепция навигации, основанная на характеристиках (PBN, Performance Based Navigation), предполагает применение ГНСС на всех этапах полетов воздушных судов (ВС) [Руководство..., 2013]. При этом в документах ИКАО отмечается, что применение ГНСС на современном этапе имеет ряд ограничений, что определяет актуальность продолжения исследований,

направленных на повышение точности, целостности и надежности навигационных определений [Global Navigation..., 2013].

В настоящее время на мировом рынке широко представлены приёмники ГНСС различных производителей и назначения. Большинство из них имеют закрытую структуру, что не позволяет в полной мере провести исследование факторов, влияющих на точность позиционирования, связанных с алгоритмами обработки сигналов навигационных спутников (НС).

Такую возможность предоставляют программно-определяемые (SDR - Software-defined radio) приёмники. SDR-приёмники позволяют принимать сигналы любых созвездий ГНСС, преобразовывать аналоговые сигналы радиочастотного тракта в цифровую форму для дальнейшей программной обработки в соответствии с разработанными алгоритмами первичной и вторичной обработки сигналов.

Благодаря доступности SDR-платформ и программного обеспечения с открытым исходным кодом для синтеза алгоритмов обработки сигналов НС возникает возможность исследования характеристик позиционирования для различных созвездий ГНСС.

Так в работах [Вознюк и др., 2016] исследованы вопросы помехоустойчивости SDR-приёмника, методы обнаружения помех [Белянов и др., 2021]. В работе [Кумар и др., 2020] представлена доработка структурной связи SDR приёмника и ЭВМ с меньшей вероятностью потери зарегистрированных данных. В работе [Фомин и др., 2021] исследованы методы борьбы со спуфингом.

### **Особенности платформы GNSS SDR и реализации SDR-приёмников**

Для обеспечения настройки архитектуры тракта обработки сигналов SDR-приёмников используется программное обеспечение (ПО) с открытым кодом, предоставляемое на сайте GNSS SDR (Рис.1) [GNSS-SDR, s.a.]. Работа с GNSS SDR описана применительно к операционной системе Linux, для которой не требуется дополнительных лицензионных соглашений.

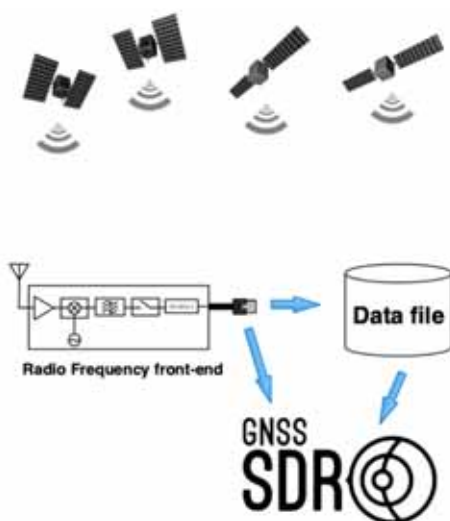


Рисунок 1. – GNSS SDR структура

GNSS-SDR – это проект с открытым исходным кодом, реализующий программно-определяемый приёмник GNSS на языке программирования C++. С помощью GNSS-SDR пользователи могут построить программный приёмник GNSS, создав потоковый граф, где узлы представляют собой блоки обработки сигналов, а линии – поток данных между ними. Структура приёмника в виде потокового графа позволяет проводить обработку с максимальной вычислительной мощностью, что дает возможность пользователю работать в формате реального времени. Сформированный сценарий представляет собой интерфейс, объединяющий все узлы и блоки в единую структуру, с помощью которой решается навигационная задача [Fernández-Prades et al., 2011].

Структура потокового графа показана на рис.2 [GNSS-SDR, s.a.]. В качестве источников сигналов (SIGNAL SOURCE) используются SDR-приёмники разных производителей. При этом в сценарии необходимо указать центральную частоту несущего колебания, частоту дискретизации и тип данных выходных отчетов.

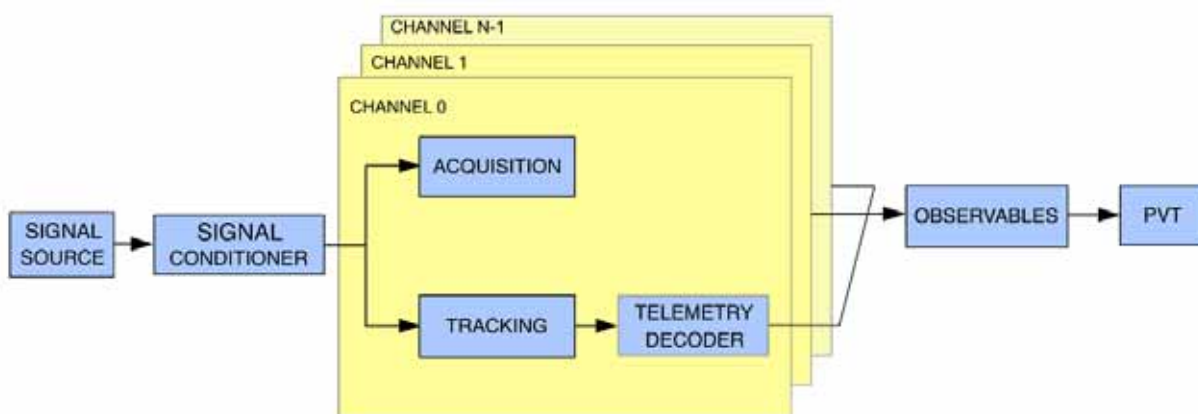


Рисунок 2 – Потоковый граф SDR-приёмника

Блок формирования сигнала (SIGNAL CONDITIONER) состоит из адаптера типа данных (преобразование входных данных к требуемому формату), входного фильтра (фильтрация шумов и помех) и устройства передискретизации отчетов (прореживание входной выборки до требуемой частоты дискретизации).

Отдельной настройкой потокового графа обладают каналы (CHANNEL). Основным достоинством GNSS SDR является приём сигналов от навигационных спутников в частотных диапазонах L1, L2 и L5, а также гибкая архитектура. Для этого необходимо идентифицировать в сценарии название и количество каналов конкретной GNSS. Имеется возможность настройки SDR-приёмника для работы в мультисистемном режиме.

В каждом канале SDR-приёмника осуществляется обнаружение и захват сигнала (блок ACQUISITION), слежение за его параметрами (блок TRACKING), декодирование информации (блок TELEMETRY DECODER). Параметры каждого блока также должны быть прописаны в сценарии.

Основные параметры всех блоков потокового графа можно найти на сайте [GNSS-SDR, s.a.].

Блок ACQUISITION по грубым оценкам фазы кода и доплеровского сдвига позволяет обнаружить наличие сигнала от НС GNSS. Для этого входной оцифрованный сигнал подвергается операции циклической свертки с копией этого сигнала [Borre et al., 2006]. Это существенно сокращает количество операций перемножения сигналов и повышает производительность процессора.

Блок TRACKING обеспечивает слежение за задержкой кода сигнала, доплеровским сдвигом и фазой несущего колебания. Петля слежения реализована на основе вычисления функции корреляции.

Блок TELEMETRY DECODER декодирует принятый сигнал и выделяет навигационное сообщение. Так как структуры сообщений у каждой системы GNSS отличны, в сценарии необходимо указать конкретный тип декодера.

Блок OBSERVABLES осуществляет измерения псевдодальности, фазы несущей и доплеровского сдвига. Данный блок не требует идентификации и является единым для работы всех систем.

Блок PVT решает навигационную задачу и выдает конечную информацию в форматах RINEX, NMEA 0183, RTCM 104 и др. Настройка блока PVT предполагает выбор режима позиционирования, добавление функции RAIM, моделей тропосферы и ионосферы.

SDR-приёмник реализован на готовой платформе HackRF One, которая позволяет осуществлять приём и передачу сигналов в диапазоне частот 1 МГц – 6 ГГц в полудуплексном режиме связи. Обработка сигналов выполняется программой с заранее выстроенной архитектурой.

Приёмник построен по принципу гетеродинного приёма с формированием квадратурных составляющих на нулевой промежуточной частоте, поступающих на 8-битный АЦП. Максимальная частота дискретизации составляет 20 МГц.

Для приёма сигналов от НС необходима установка дополнительного кварцевого генератора с компенсацией температуры и активной антенны. Для питания активной антенны необходим дополнительный источник 3,3 В. В HackRF One предусмотрена возможность подачи питания через разъем подключения антенны. Для этого реализована внутренняя цепь Bias – T или инжектор постоянного тока. При этом постоянный ток не влияет на принятый высокочастотный радиосигнал.

### **Результаты тестирования GNSS SDR с помощью имитатора CH-3803M**

Применение имитаторов сигналов ГНСС для тестирования приёмников позволяет многократно воспроизводить идентичные условия навигационного сеанса для любой точки на земной поверхности [Скрышник и др., 2015].

На первом этапе исследований был собран сценарий обработки сигналов с выхода SDR-приёмника для системы GPS с целью анализа работы в режимах поиска, захвата и слежения за сигналами НС GPS.

На поиск и захват сигналов от НС в блоке ACQUISITION влияет порог обнаружения  $\gamma$ , определяемый по критерию Неймана-Пирсона [ГЛОНАСС...,

2010]. Порог обнаружения вычисляется при задании в сценарии вероятности ложной тревоги (ЛТ)  $P_{fa}$ .

Для исследования влияния вероятности ЛТ на процессы работы SDR-приёмника были проведены эксперименты для точки с координатами  $52,09^\circ$  с. ш.,  $104,35^\circ$  в. д., высота  $500,05$  м на интервале наблюдения  $15$  мин. Имитатор СН-3803М транслировал сигналы GPS по радиоканалу, антенна приёмника находилась в непосредственной близости от передающей антенны имитатора.

На рис.3 представлены графики, характеризующие влияние задаваемой вероятности  $P_{fa}$  на время решения навигационной задачи (1 – время решения навигационной задачи, 2 – время нахождения всех видимых НС); на рис.4 – на количество НС, используемых в обработке (1 – количество НС в слежении, 2 – количество видимых НС).

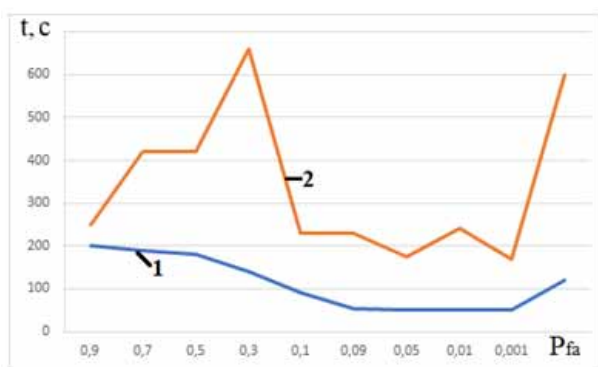


Рисунок 3 – Влияние  $P_{fa}$  на время решения навигационной задачи

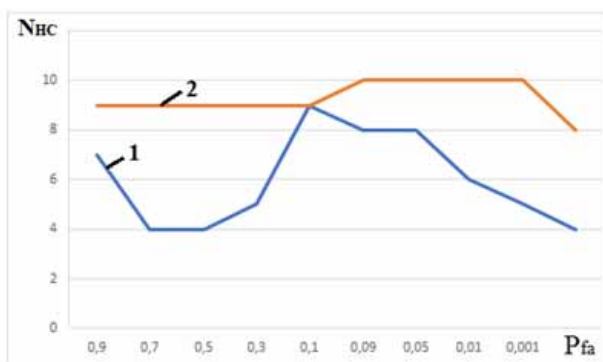


Рисунок 4 – Влияние  $P_{fa}$  на количество НС в решении навигационной задачи

Из полученных результатов следует, что достаточно эффективная работа SDR-приемника как по времени захвата, так и по количеству НС в слежении, обеспечивается при задании вероятности ложной тревоги  $P_{fa}$  от  $0,09$  до  $0,001$ . Дальнейшее уменьшение  $P_{fa}$  приводит к ухудшению работы SDR-приемника.

Диаграммы рассеяния мгновенных значений погрешностей определения горизонтальных координат SDR-приемником на более продолжительном интервале наблюдения  $1,5$  часа показаны на рис.5,а – для  $P_{fa}=0,9$  и на рис.5,б – для  $P_{fa}=0,05$ . Для этих же условий получены графики изменения погрешности определения высоты, представленные на рис.6 (кривая 1 – для  $P_{fa}=0,9$ , кривая 2 – для  $P_{fa}=0,05$ ).

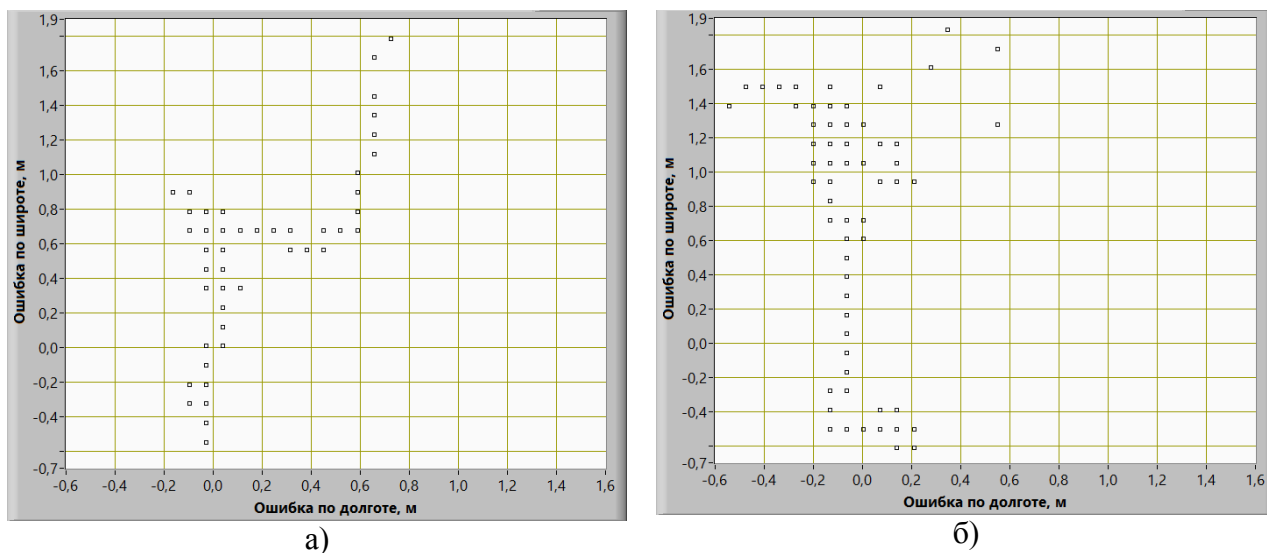


Рисунок 5 – Диаграммы рассеяния погрешностей позиционирования

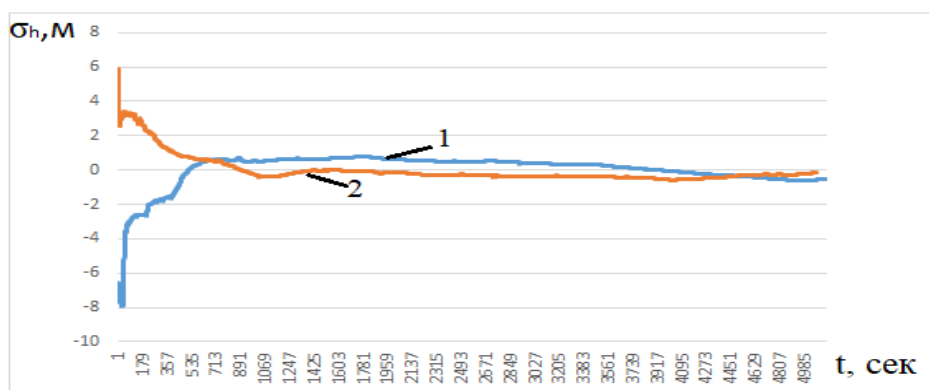


Рисунок 6 – Погрешности измерения высоты

В табл.1 приведены обобщённые результаты полунатурных экспериментов.

Таблица 1. Обобщенные результаты полунатурного моделирования

	СКП широты, м	СКП долготы, м	СКП высоты, м	Среднее число НС	Средний VDOP	Средний HDOP
$P_{fa}=0,9$	0,5	0,13	1,04	7,93	2,02	1,82
$P_{fa}=0,05$	0,7	0,14	0,79	6,94	2,25	2,29

Полунатурные эксперименты с СН-3803М подтвердили ожидаемый результат, когда уменьшение порога обнаружения при увеличении вероятности ложной тревоги приводит к слежению за большим количеством НС и как следствие, к некоторому повышению точности позиционирования. Однако при этом нужно учесть, что в лабораторных условиях сигнал менее подвержен случайным воздействиям, и его уровень существенно выше шумов.

## Результаты натурных экспериментов при работе по системе GPS

Натурные эксперименты проводились в точке с координатами, аналогичными полунатурному эксперименту. Вместе с SDR-приёмником был установлен приёмник ATGM336H (производства КНР), характеристики которого исследованы в работе [Скрыпник и др., 2020]. Сравнение данных двух приёмников позволило сопоставить созвездия НС, по которым решается навигационная задача и обеспечиваемые точности позиционирования.

При установке в сценарии обработки вероятности ЛТ  $P_{fa}=0,9$  SDR-приёмник обеспечил слежение не более, чем за тремя НС, что не позволило ему решить навигационную задачу. Приёмник *ATGM336H* решал навигационную задачу, обеспечивая слежение по десяти НС GPS и по двум НС системы QZSS [Скрыпник, 2020; Hofmann-Wellenhof et al., 2007; Kaplan et al., 2005]. При установке вероятности ЛТ  $P_{fa}=0,05$  SDR-приёмник решил навигационную задачу, однако слежение за сигналами некоторых НС было неустойчивым, что приводило к частичной потере выборки.

В табл.2 представлены обобщённые результаты проведённых экспериментов. Несмотря на меньшее количество НС при решении навигационной задачи SDR-приёмником, наблюдается достаточно хорошая точность позиционирования, что может быть обусловлено низким заданным порогом обнаружения при  $P_{fa}=0,05$ , а также применением алгоритмов фильтрации при вторичной обработке (решении навигационной задачи).

Таблица 2. Обобщённые результаты натурального эксперимента

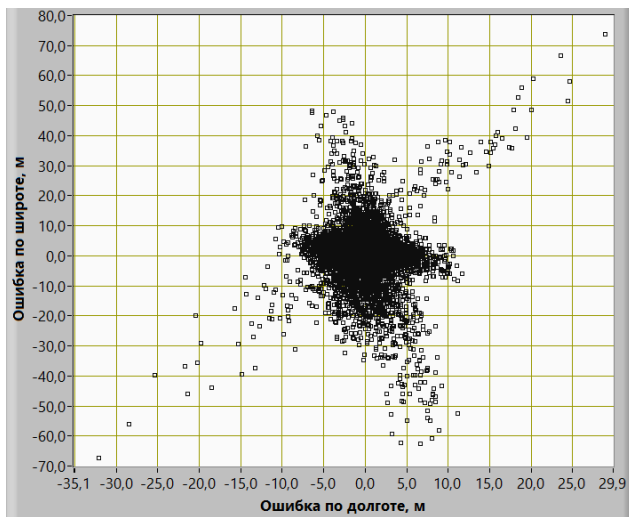
	СКП широты, м	СКП долготы, м	СКП высоты, м	Среднее число НС	Средний VDOP	Средний HDOP
SDR-приёмник ( $P_{fa}=0,05$ )	0,54	0,29	1,5	4,75	3,14	2,39
<i>ATGM336H</i>	0,36	0,41	1	12,64	1,09	0,8

## Результаты натурных экспериментов при работе по Beidou

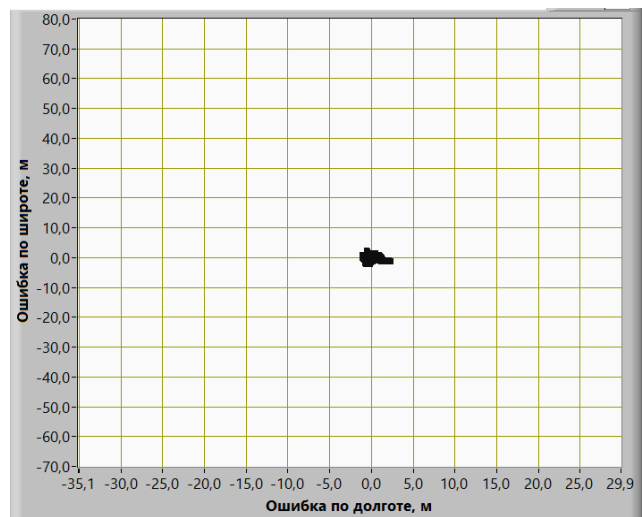
При проведении натурных экспериментов был задан сценарий для обработки сигналов системы Beidou на частоте 1561,098 МГц для эмпирически выбранного значения вероятности ЛТ  $P_{fa}=0,1$ . Эксперименты проводились на ту же дату, что и для GPS и сравнивались со значениями приёмника *ATGM336H*.

В процессе экспериментов наблюдалась более стабильная работа SDR-приёмника в режиме слежения за сигналами НС Beidou, чем за сигналами НС GPS. Результаты экспериментов в виде диаграмм рассеяния ошибок позиционирования и изменения вертикального геометрического фактора VDOP представлены на рис.7, обобщённые результаты – в табл.3.





а)



б)



в)

Рисунок 7 – Результаты экспериментов при работе по Beidou:  
 а – диаграмма рассеяния погрешностей позиционирования SDR-приемника;  
 б – диаграмма рассеяния погрешностей позиционирования приемника *ATGM336H*; в) вертикальный ГФ (кривая 1 – SDR-приёмник, кривая 2 – приёмник *ATGM336H*)

Анализ полученных результатов показывает, что точность позиционирования, обеспечиваемая SDR-приёмником при работе по Beidou, существенно хуже точности приемника *ATGM336H*. Это связано с нестабильным слежением SDR-приемника за сигналами от геостационарных спутников с №1 по № 5, что существенно ухудшило как вертикальный, так и горизонтальный геометрические факторы. При этом следует отметить, что SDR-приемник осуществлял приём и слежение за сигналами всех наблюдаемых НС в то время, как приёмник *ATGM336H* работает с сигналами НС с №1 по № 20 включительно.

Таблица 3. Обобщённые результаты натурного эксперимента

	СКП широты, м	СКП долготы, м	СКП высоты, м	Среднее число НС	Средний VDOP	Средний HDOP
SDR-приёмник ( $P_{fa}=0,05$ )	10,3	3,5	15,2	5,62	3,98	3,08
<i>ATGM336H</i>	1,08	0,9	0,93	12,41	1,36	1,37

Как следует из данных, приведённых в табл.3, при работе приёмника *ATGM336H* среднее значение VDOP оказалось меньше на 0,01 среднего HDOP.

На рис.6 представлены графики изменения вертикального (кривая 2) и горизонтального (кривая 1) ГФ при работе приемника *ATGM336H*. С 733 по 3173 секунду значения  $VDOP < HDOP$ . Это связано с составом наблюдаемой на этом интервале орбитальной группировки НС, состоящей преимущественно из пяти геостационарных, пяти геосинхронных и двух среднеорбитальных НС.



Рисунок 6 – Графики изменения горизонтального и вертикального ГФ

Для более детальной оценки проведена статистическая обработка результатов эксперимента с приемником *ATGM336H*. При этом рассмотрены два интервала времени – с 1 по 3173 сек. и с 3174 по 6833 сек. Результаты представлены в табл.4.

Таблица 4. Обобщённые результаты работы приёмника *ATGM336H*

	Интервал с 1 по 3173 сек	Интервал с 3174 по 6833 сек
СКП широты, м	1,15	0,97
СКП долготы, м	0,93	0,28
СКП высоты, м	0,19	0,47
Среднее число НС	10,8	13,8
Средний VDOP	1,75	1,025
Средний HDOP	1,85	0,95

Согласно полученным результатам VDOP на первом интервале оказался меньше HDOP на 0,1, при этом СКП измерения высоты составила 0,19 м, что меньше СКП определения горизонтальных координат. Во второй выборке среднее значение  $VDOP > HDOP$ , что и привело к ухудшению точности измерения высоты.

## **Заключение**

Основным достоинством SDR-приёмников, реализованных на программном обеспечении GNSS SDR, является гибкость структуры канала обработки, возможность проведения детальных исследований на всех частотах, множество поддерживаемых SDR-структур. Важным является и открытый программный код, не требующий дополнительных лицензионных соглашений.

Недостатками, по сравнению с обычными приёмниками, является критичность к устанавливаемому уровню порога обнаружения, что влияет на количество спутников, сигналы от которых включаются в решение навигационной задачи. Поэтому необходимо проведение дополнительных исследований по определению оптимального порога обнаружения сигналов для различных ГНСС, а также других параметров в задаваемых сценариях, для достижения стабильного приёма сигналов видимого созвездия.

Возможным решением по установке оптимального значения  $P_{fa}$  является запись файла с IQ компонентами на определенный момент времени и дальнейшей многократной его обработкой. При работе по системе Beidou в сценарии не предусмотрена фильтрация выходных данных, что также требует дополнительных исследований.

Реализация мультисистемного режима на платформе HackRF требует расширения полосы для приема сигналов или использования платформы с двумя или тремя частотными каналами. Это же касается и системы ГЛОНАСС, которая требует задания полосы приёмника 10 МГц для приёма сигналов со всех частотных литер.

Приёмник *ATGM336H* ограничен 12 каналами и не позволяет обрабатывать сигналы от НС с номерами больше 20. При этом наблюдаются ситуации, когда в рабочем созвездии преобладают НС с геостационарных и геосинхронных орбит, что приводит к меньшему значению VDOP по сравнению с HDOP. Изучение этого явления требует дополнительных исследований на базе других, более совершенных приемников.

## **Библиографический список**

*Белянов К. С.* Подход к реализации обнаружения внешних программно-аппаратных воздействий на систему спутниковой навигации / К. С. Белянов, С. С. Рыжиков, И. А. Агуреев // Оригинальные исследования. 2021. № 9. С. 95-102.

*Вознюк В. В.* Исследование помехоустойчивости аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы GPS на основе технологии программного приема / В. В. Вознюк, П. А. Маслаков, А. В. Фомин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. №. 650. С. 33-40.

Глобальный аэронавигационный план на 2013-2028 г. / Международная организация гражданской авиации. Doc 9750-AN/963. 4-е изд., 2013. 147 с.

ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: монография / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – 4-е изд., перер. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

*Кумар Б. П.* Усовершенствованный способ сбора радиочастотных данных GPS для программно реализуемых приемников спутниковой навигации / Б. П. Кумар, Ч. С. Пайдимари // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №. 1. С. 42-53.

- Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Doc. 9613. AN/937. Изд. 4-е. Международная организация гражданской авиации. 2013. 444 с.
- Скрыпник О. Н.* Характеристики точности мультисистемных GPS/GLONASS/Beidou приёмников / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев // Научно-практический журнал авиационный вестник – Минск, Республика Беларусь. 2020. № 3. С. 26-30.
- Скрыпник О. Н.* Экспериментальные исследования характеристик совмещенного GNSS приемника в высоких широтах / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Астраханцева // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 221 (11). С. 35-42.
- Скрыпник, О. Н.* Радионавигационные системы аэропортов и воздушных трасс: учебник. М.: Инфра-М, 2020.325 с.
- Фомин А. В.* Исследование спуфинг воздействий на навигационные приемники с использованием SDR-трансивера / А. В. Фомин, С. П. Леонтьев, Д. М. Самойлов // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК, 2021. №. 1. С. 81-84.
- Borre K.* A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach / K. Borre, D. Akos, N. Bertelsen N, P. Rinder, S. Jensen. A Boston: Birkhäuser, 2006.185 p.
- Fernández-Prades C.* GNSS-SDR: An Open Source Tool For Researchers and Developers / C. Fernández-Prades, J. Arribas, P. Closas // 2011 Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation / (ION GNSS 2011), Portland, OR, Sept. 2011. P. 780-794.
- Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. Doc. 9849. AN/457. 2-nd edition. ICAO. 2013. P. 90.
- GNSS-SDR An open-source Global Navigation Satellite Systems software-defined receiver // [Электронный ресурс] – URL: <https://gnss-sdr.org/>; (дата обращения 04.03.22)
- Hofmann-Wellenhof B.* GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle // Springer Science & Business Media, 2007. 16 p.
- Kaplan E.* Understanding GPS: principles and applications / E. Kaplan, C. Hegarty. – Artech house, 2005.723 p.

## References

- Beloyanov K. S., Ryzhikov S. S., Agureev I. A.* (2021). An approach to the implementation of detecting external software and hardware influences on the satellite navigation system. *Original research*. 9: 95-102. (In Russian)
- Borre K. A., Akos D., Bertelsen N., Rinder P., Jensen, S.* (2006). Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach Boston: Birkhäuser, 185 p.
- Fernández-Prades C., Arribas, J., Closas P.* (2011). GNSS-SDR: An Open Source Tool For Researchers and Developers // 2011 Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation / (ION GNSS 2011), Portland, OR, Sept. P. 780-794.
- Fomin A. V., Leont'ev S. P., Samoylov D. M.* (2021). Investigation of spoofing effects on navigation receivers using an SDR transceiver // SPbNTORES: trudy ezhegodnoj NTK. Saint Petersburg: LETI, №. 1. 81-84. (In Russian)
- Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. Doc. 9849. AN/457. 2-nd edition. ICAO. 2013. P. 90.
- GLONASS. Principles of construction and functioning: monograph / ed.: A. I. Peryova, V. N. Harisova. - 4th ed., Perry. and add. Moscow. 2010. 800 p. (In Russian)
- GNSS-SDR An open-source Global Navigation Satellite Systems software-defined receiver // [Electronic resource] – URL: <https://gnss-sdr.org/>; (Accessed 04.03.22).
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E.* (2007). GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more // Springer Science & Business Media, 2007. 16 p.
- ICAO 2013-2028 Global Air Navigation Plan. Doc 9750-AN/963. Fourth edition. 2013. 147 p.

- Kaplan E., Hegarty C.* (2005). *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house, 723 p.
- Kumar B. P., Paidimarry Ch. S.* (2020). Improved technique of GPS RF data capturing for GNSS SDR receivers // *Gyroscopy and navigation*, 2020. T. 28. №. 1. P. 42-53. (In Russian)
- Performance-based Navigation (PBN) Manual. Doc. 9613. AN/937. 4-th edition. International Civil Aviation Organization, 2013. 444 p. (In Russian)
- Skrypnik O. N., Aref'ev R. O., Astrakhanceva N. G.* (2015). Experimental researches of the combined GNSS receiver characteristics in high latitudes. *Civil Aviation High Technologies*. 221: 35-42 (In Russian)
- Skrypnik O. N., Aref'ev R. O.* (2020). Accuracy characteristics of multi-system GPS/GLONASS/Beidou receivers. *Aviation Bulletin*. Minsk, Republic of Belarus: Belarusian State Aviation Academy. 3: 26-30 (In Russian)
- Skrypnik O. N.* (2020) *Radio navigation systems of airports and air routes: textbook*. Moscow Infra-M Publ. 325 p. (In Russian)
- Voznuk V. V., Maslakov P. A., Fomin A. V.* (2016). The research of the noise immunity of users' GPS equipment based on the SDR technology. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 650: 33-40. (In Russian)