

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34>

EDN:ZPZGVL



## Прием и обработка сигналов в перспективных образцах навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС

- Алексей Васильевич Козлов, vka@mil.ru
- Александр Михайлович Петушков, vka@mil.ru
- Евгений Александрович Саковский✉, vka@mil.ru
- Дмитрий Анатольевич Соловьёв, vka@mil.ru

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,  
Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация.

### Аннотация

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки программно-определяемых приемников, способных динамически адаптироваться к изменениям в навигационных системах без модификации аппаратной части, поскольку традиционные приемники на основе жестко заданных алгоритмов обладают ограниченной адаптивностью к изменениям структуры сигналов и появлению новых сервисов.

**Цель исследований:** разработка алгоритма совместной обработки навигационных сигналов с частотным и кодовым разделением, обеспечивающего универсальность программного приемника в условиях разнообразия сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. **Научная задача** заключается в экспериментальной верификации алгоритмов цифровой обработки сигналов, позволяющих унифицировать обработку различных типов навигационных сигналов в единой программной среде.

**Методы исследования:** алгоритмическое моделирование, корреляционная обработка на основе быстрого преобразования Фурье, а также экспериментальная отработка на макете программного приемника.

**Результаты:** представлены возможные подходы к совместной обработке сложных сигналов с частотным и кодовым разделением; изложена концепция развития технологии построения навигационной аппаратуры потребителя; приведены результаты экспериментальной отработки алгоритма приема и обработки навигационных сигналов с кодовым разделением; предложен алгоритм совместной обработки сигналов с частотным и кодовым разделением в едином программном приемнике. **Научная новизна** работы заключается в экспериментальном подтверждении возможности унификации алгоритмов приема для сигналов с частотным и кодовым разделением в рамках единого вычислительного ядра.

**Теоретическая значимость:** получение нового знания о принципах построения универсальных алгоритмов обработки навигационных сигналов.






**Практическая значимость:** предложенный алгоритм позволяет создавать универсальные навигационные приемники с программной адаптацией к изменениям в глобальных навигационных спутниковых системах, что снижает затраты на модернизацию аппаратуры, а его реализация на базе высокопроизводительных процессоров позволит обеспечить обработку в реальном масштабе времени в перспективных образцах аппаратуры.

**Ключевые слова:** цифровая обработка сигналов, навигационные сигналы, навигационная аппаратура потребителей, навигационный приемник, программный приемник, система ГЛОНАСС, глобальные навигационные спутниковые системы

**Ссылка для цитирования:** Козлов А.В., Петушков А.М., Саковский Е.А., Соловьёв Д.А. Прием и обработка сигналов в перспективных образцах навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 26–34. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34. EDN:ZPZGVL

Original research  
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34>  
EDN:ZPZGVL

# Reception and Processing of Signals in Prospective Models of User Navigation Equipment for GLONASS

 **Aleksey V. Kozlov**, vka@mil.ru  
 **Aleksandr M. Petushkov**, vka@mil.ru  
 **Evgeniy A. Sakovsky** , vka@mil.ru  
 **Dmitriy A. Solovyov**, vka@mil.ru

Military Aerospace Academy,  
St. Petersburg, 197198, Russian Federation

## Annotation

**Relevance** is driven by the necessity to develop software-defined receivers capable of dynamically adapting to changes in navigation systems without hardware modifications, as traditional hardware-defined receivers based on fixed signal processing algorithms possess limited adaptability to evolving signal structures and new services. **The research aim** is to develop an algorithm for the joint processing of navigation signals with frequency and code division multiple access, ensuring the universality of a software receiver under diverse Global Navigation Satellite System signal conditions.

**The scientific objective** is the experimental verification of digital signal processing algorithms that facilitate unified processing of multiple navigation signal types within a single software environment.

**Methods** employed in the study include algorithmic modeling, correlation processing based on the Fast Fourier Transform, and experimental validation using a software receiver prototype.

**Results** are as follows: possible approaches for joint processing of complex signals with frequency and code division in a GLONASS software receiver are presented; a concept for the development of user navigation equipment technology is outlined; experimental results for the reception and processing algorithm of code-division signals are provided; an algorithm for joint processing of frequency-division and code-division signals in a unified software receiver is proposed.

**The scientific novelty** lies in the substantiation and experimental confirmation of the feasibility of unifying reception algorithms for signals with frequency and code division multiple access within a unified computational core.

**Theoretical significance** lies in obtaining new knowledge about the principles of constructing universal processing algorithms for navigation signals.

**The practical significance** is that the proposed algorithm enables the development of universal navigation receivers with software-defined adaptability to Global Navigation Satellite Systems updates, significantly reducing hardware modernization costs. Its implementation on high-performance processors will provide real-time processing capabilities in prospective receiver designs.

**Keywords:** digital signal processing, navigation signals, user navigation equipment, navigation receiver, software receiver, the global navigation satellite system GLONASS, Global Navigation Satellite Systems

**For citation:** Kozlov A.V., Petushkov A.M., Sakovsky E.A., Solovyov D.A. Reception and Processing of Signals in Prospective Models of User Navigation Equipment for GLONASS. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):26–34. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-26-34. EDN:ZPZGVL

## Введение

Современные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou, характеризуются усложнением

структуры навигационных сигналов. Внедрение новых сигналов системы ГЛОНАСС (L1С, L3ОС и др.), а также развитие систем функциональных дополнений, требуют от навигационной аппаратуры

потребителей (НАП) повышенной адаптивности. Традиционные аналого-цифровые архитектуры не обеспечивают гибкости при смене форматов сигналов, что делает переход к программно-определяемым приемникам технологической необходимостью. Ключевым преимуществом программно-определяемых приемников является возможность адаптации к изменениям стандартов исключительно за счет обновления специального программного обеспечения (СПО), без замены аппаратной платформы.

### Концепция развития навигационных приемников

При создании современных НАП используется принцип смешанной аппаратно-программной реализации алгоритмов обработки сигналов. При этом операции, требующие высокого быстродействия, такие как согласованная фильтрация, селекция сигналов, дискриминирование, поиск, обнаружение и т. д., выполняются аппаратными средствами (аналоговыми или цифровыми), а программная часть обработки включает в себя выполнение сравнительно медленных операций по статистической обработке данных, поступающих из аппаратной части, как отмечено в [1]. Основным

элементом в навигационном приемнике является аппаратно реализованный коррелятор, логика работы которого неизменна, что ограничивает адаптивность НАП и не позволяет ей функционировать при появлении новых сигналов в ГНСС.

Производительность современных средств обработки сигналов позволяет осуществлять цифровую обработку, близкую к реальному масштабу времени не только на промежуточной частоте, но и на частоте несущего колебания, что, в свою очередь, позволяет реализовывать оптимальную обработку сигнала программным способом. Это определяет ключевое направление развития НАП ГНСС – переход от аппаратной к программной реализации алгоритмов оптимальной обработки сигналов, что является общим трендом в развитии приемной аппаратуры (подробно рассмотрено в [2]). При этом экспериментальная отработка алгоритмов на ранних этапах исследования может выполняться на доступной элементной базе предыдущих поколений в режиме постобработки, что позволяет верифицировать корректность предлагаемых решений до их реализации на более производительных платформах. Концепция развития навигационных приемников схематично отражена на рисунке 1.

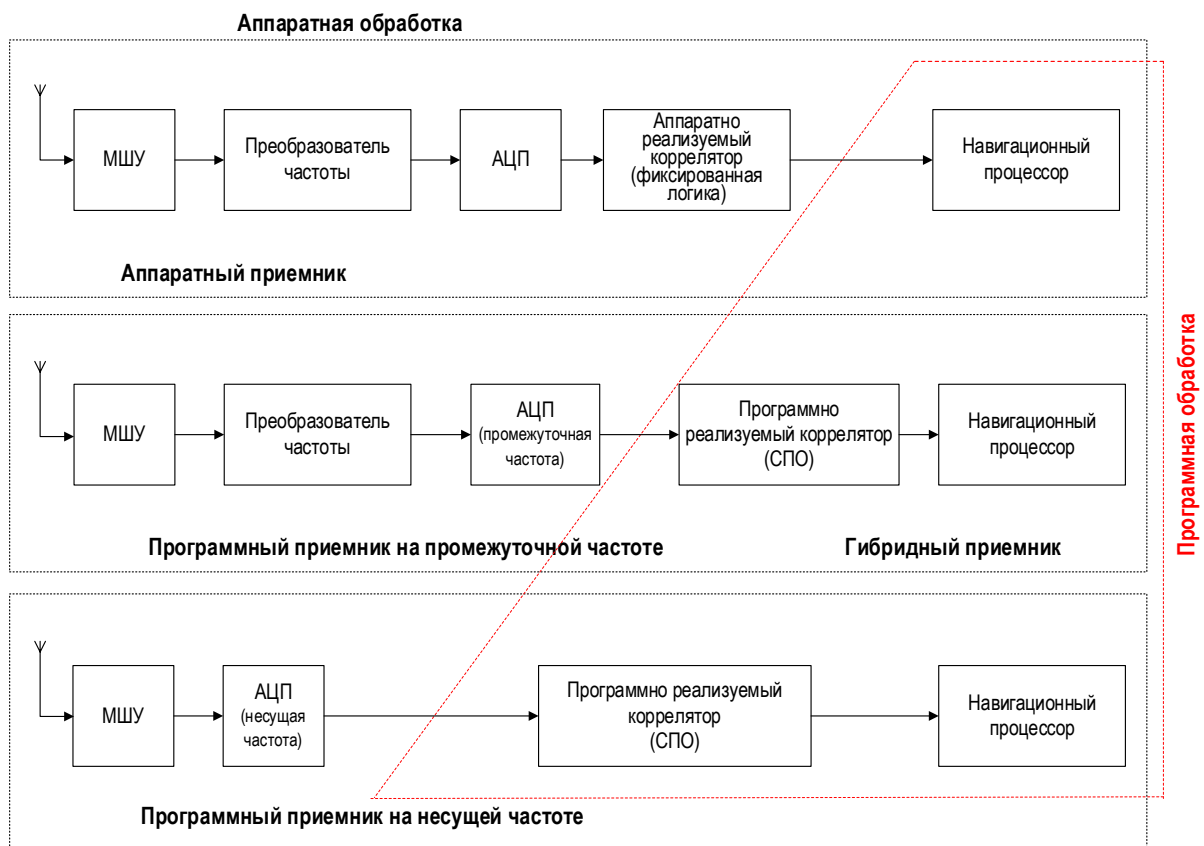


Рис. 1. Концепция развития навигационных приемников

Fig. 1. The Evolution of GNSS Receiver Technology

Под программным понимается приемник, в котором после аналого-цифрового преобразования (АЦП) или понижения частоты и АЦП обработка навигационных сигналов осуществляется программно. Развитие технологии программного приема навигационных сигналов стало возможным после появления высокопроизводительных сигнальных процессоров, реализующих корреляционную обработку сигнала в масштабе времени, близком к реальному.

Одним из основных отличий программного приемника спутниковых навигационных систем является наличие в тракте промежуточной частоты многоуровневого АЦП. Дальнейшая первичная обработка оцифрованного сигнала производится в сигнальном процессоре [1, 3]. Главными преимуществами программной стратегии обработки навигационных сигналов являются снижение аппаратных затрат и себестоимости, гибкость к изменениям в структуре существующих сигналов, появлению новых сигналов и к интеграции новых навигационных систем, а также возможность повышения помехоустойчивости за счет применения программных методов пред- и посткорреляционной обработки, реализация которых в специализированных интегральных схемах сопряжена со значительно большей сложностью и стоимостью. К числу достоинств рассматриваемого подхода также относится возможность реализации разработанных алгоритмов на различных типах вычислительных средств, используемых в современном приборостроении, без изменения архитектуры приемника [1–4]. Кроме того, к числу основных преимуществ программного приема следует отнести уменьшение стоимости модернизации при появлении новых навигационных систем и сигналов, а также – высокую стабильность характеристик приемника [1–4].

К настоящему времени известны программные реализации преобразователей частоты во временной и частотной областях, корреляторов, обнаружителей и схем слежения за параметрами спутниковых сигналов с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Теоретические основы этих методов подробно изложены в [3], практические аспекты реализации отражены в патентной литературе [5]. Помимо этого, разработаны измерители частоты на основе БПФ, а также детекторы и подавители помех [2, 4].

Анализ авторитетных источников, посвященных программной реализации навигационных приемников [1–4], указывает на явные преимущества по сравнению с традиционной схемой построения: новая элементная база, ускорение поиска сигналов за счет использования БПФ, малое энергопотребление, а также возможность адаптации к новым сигналам без изменения аппаратной части.

Однако цифровое понижение частоты входного сигнала остается одной из наиболее вычислительно затратных операций в программном приемнике.

Программные приемники ГНСС реализуют широкий спектр методов цифровой обработки сигналов [2–4], включая:

- свертку сигналов в частотной области;
- применение узкостробирующих корреляторов;
- ускоренный поиск на основе критерия обнаружения Вальда;
- бескодовый прием на закрытых частотах;
- программно-реализуемые кольца слежения за частотой, задержкой и фазой;
- отслеживание задержки через интегральный доплер;
- применение фильтра Калмана для решения навигационной задачи.

Основной проблемой при реализации технологии программного приема по-прежнему остаются высокие требования к вычислительной мощности процессоров и пропускной способности шин для реализации параллельных вычислений в реальном масштабе времени, с чем успешно справляются сигнальные процессоры.

#### **Прием и обработка сигналов с частотным и кодовым разделением**

Ключевым преимуществом программного построения НАП является возможность реализации единого вычислительного ядра для совместной обработки сигналов с частотным и кодовым разделением. Основной научно-технической задачей при этом становится не реализация базового алгоритма корреляции, а минимизация вычислительных затрат при параллельной обработке разнородных сигналов. Предлагаемое решение заключается в модификации классического алгоритма быстрой свертки [3] за счет параметризуемого формирования опорных сигналов и повторного использования их спектров. Это позволяет для набора сигналов с разными несущими частотами и кодовыми последовательностями однократно вычислять и хранить спектры опорных воздействий, многократно применяя их в итерациях поиска по разным спутникам и предполагаемым доплеровским сдвигам частоты. Данный подход исключает дублирование наиболее ресурсоемких операций при обработке сигналов ГЛОНАСС ( $L1$ ,  $L2$  – с частотным разделением) и новых сигналов с кодовым разделением ( $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ). На рисунке 2 представлена блок-схема реализации модифицированного алгоритма поиска и обнаружения навигационного сигнала по задержке дальномерного кода при некогерентном накоплении сигнала (алгоритм).

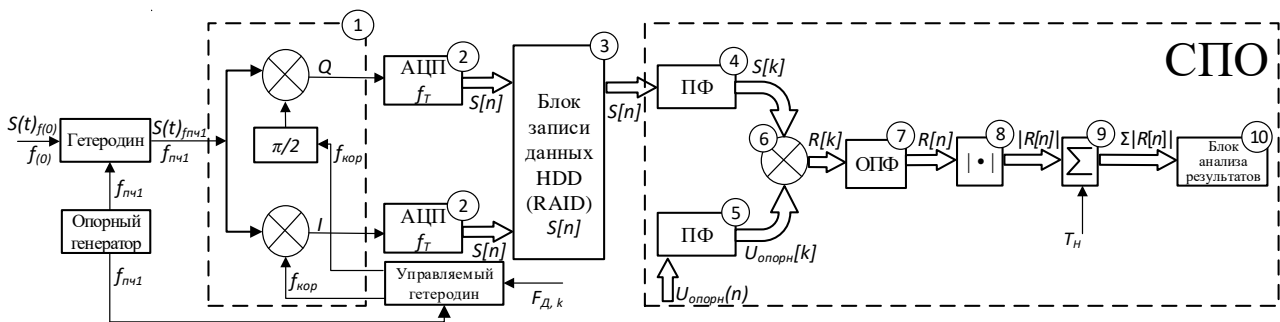


Рис. 2. Блок-схема реализации модифицированного алгоритма поиска и обнаружения навигационного сигнала по задержке дальномерного кода при некогерентном накоплении сигнала

Fig. 2. Block Diagram of the Modified Algorithm for Navigation Signal Search and Detection Based on PRN Code Delay Estimation with Non-Coherent Integration

На представленной схеме (см. рисунок 2) использованы следующие обозначения:

$f_{(0)}$  – несущая частота принимаемого навигационного сигнала;

$S(t)_{f(0)}$  – входной сигнал на несущей частоте;

$S(t)_{f_{пч1}}$  – входной сигнал на промежуточной частоте (ПЧ);

$I$  – синфазная составляющая комплексной огибающей сигнала;

$Q$  – квадратурная составляющая, соответствующая проекции сигнала на ортогональную ось, сдвинутую на  $\pi/2$ ;

$f_{пч1}$  – частота опорного генератора;

$f_T$  – частота дискретизации АЦП;

$S[n] = S(n/f_T)$  – отсчеты оцифрованного сигнала;

$U_{опорн}(n)$  – опорная кодовая последовательность (в отсчетах);

$f_{кор}$  – номинальное значение ПЧ в цифровой модели;  $F_{д,k}$  –  $k$ -я проверяемая величина доплеровского сдвига частоты космического аппарата и потребителя; суммарная частота  $f_{кор}$  для компенсации задается как  $(f_{пч1} + F_{д,k})$ ;

$S[k]$  – спектр принятого сигнала;

$U_{опорн}[k]$  – спектр опорного сигнала;

$R[k]$  – комплексно-сопряженное перемножение спектров  $(S[k], U_{опорн}[k])$ ;

$R[n]$  – корреляционная функция;

$|R[n]|$  – модуль корреляционного отклика;

$T_n$  – интервал времени некогерентного накопления модулей корреляционного отклика.

Алгоритм включает 10 блоков.

В блоках 1–3 алгоритма выполняется квадратурное преобразование и оцифровка: навигационный сигнал на несущей частоте  $f_{(0)}$  поступает на антенну и далее – в аналоговый тракт. С выхода аналогового тракта входной сигнал  $S(t)_{f_{пч1}}$  поступает в квадратурный приемник (блок 1). Управляемый гетеродин формирует опорное колебание, которое разветвляется на две ветви: для синфазного ( $I$ ) и квадратурного ( $Q$ ) каналов. Для формирования квадратуры ( $Q$ ) во второй ветви используется фазовращатель на  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ). Полученные квадратурные компоненты оцифровываются АЦП (блок 2) с ча-

стойкой  $f_T$ , формируя последовательность  $S[n] = S(n/f_T)$ , которая накапливается в запоминающем устройстве (блок 3) для последующей обработки.

В блоках 4–10 алгоритма осуществляется частотная корреляционная обработка с предлагаемой оптимизацией и реализуется алгоритм быстрой свертки.

В блоке 4 осуществляется вычисление преобразования Фурье (ПФ) от принятого сигнала  $S[n]$  для перевода в частотную область  $S[k]$ .

В блоке 5 происходит формирование спектра опорного сигнала  $U_{опорн}[k]$  – область применения предлагаемого метода. В отличие от классической реализации, где опорный сигнал  $U_{опорн}(n)$  генерируется и преобразуется заново для каждой итерации, в представленной архитектуре реализовано параметрическое управление генерацией  $U_{опорн}(n)$  (тип кода, частота) и повторное использование готовых спектров  $U_{опорн}[k]$ . Это существенно снижает нагрузку при переборе нескольких навигационных космических аппаратов (НКА) или повторных запусках поиска и, соответственно, уменьшает требуемый объем вычислений при изменении числа доплеровских гипотез и параметров поиска.

В блоке 6 реализуется комплексно-сопряженное перемножение спектров  $S[k]$  и  $U_{опорн}[k]$ , соответствующее корреляции в частотной области.

В блоке 7 производится обратное ПФ (ОПФ) для возврата корреляционной функции во временную область.

В блоке 8 выполняется вычисление модуля комплексного корреляционного отклика. Полученная последовательность  $|R[n]|$  представляет собой огибающую корреляционной функции и используется на последующих этапах для некогерентного накопления и принятия решения.

В блоке 9 выполняется некогерентное накопление модулей корреляционного отклика на интервале  $T_n$ . В данном режиме суммируются корреляционные отклики на интервале наблюдения. Это

позволяет повысить отношение сигнал / шум при наличии фазовых нестабильностей сигнала. Результирующая последовательность  $\Sigma|R[n]|$  поступает в блок 10.

В блоке 10 на основе поступившей последовательности  $\Sigma|R[n]|$  осуществляется анализ результатов накопления, принятие решения о наличии сигнала и оценка его задержки. В этом блоке выполняется сравнение максимального значения модуля корреляционного отклика с заданным порогом обнаружения и оценка временной задержки сигнала. В случае превышения порога сигнал считается обнаруженным, а положение максимума определяет оценку временной задержки сигнала.

Универсальность алгоритма (режим совместной обработки сигналов с частотным и кодовым разделением) обеспечивается на этапе формирования опоры  $U_{\text{опорн}}(n)$  (блок 5). Для сигналов с частотным разделением (ГЛОНАСС L1, L2) в качестве  $U_{\text{опорн}}(n)$  используется компенсирующая комплексная экспонента на соответствующей частоте. Для сигналов с кодовым разделением (ГЛОНАСС L3) – эта же экспонента, промодулированная конкретной псевдослучайной последовательностью. Единая структура обработки (блоки 4, 6–10) остается неизменной, что подтверждает возможность создания унифицированного программного приемника.

Для практической отработки и верификации алгоритма обработки сигналов с частотным и кодовым разделением разработана экспериментальная аппаратно-программная платформа, представленная на рисунке 3. Ее конфигурация не является прототипом конечного изделия, а служит для подтверждения корректности предлагаемых решений.

Макет состоит из следующих основных элементов [6]:

- блока антенного (БА) с малошумящим усилителем (производства КБ «Навис» и НТЦ «Модуль»)<sup>1</sup>;
- аналогового тракта, преобразующего сигналы разных диапазонов ГНСС на промежуточные частоты 10–20 МГц (производства КБ «Навис» и НТЦ «Модуль»)<sup>1</sup>;
- АЦП с частотой дискретизации  $f_T = 40,96$  МГц (PDA14, производства Signatec)<sup>2</sup>;
- опорного генератора (ОГ), формирующего общую тактовую частоту для каждой платы АЦП;
- персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ), осуществляющей запись оцифрованных сигналов на RAID-накопители и обработки на СПО.

Таким образом, разработанная аппаратно-программная платформа реализует полный цикл обработки сигнала. Аппаратная часть платформы, включающая антенные блоки, аналоговый тракт, АЦП и опорный генератор, решает задачу формирования, преобразования и синхронной оцифровки сигналов ГНСС, что функционально соответствует подготовке данных, накапливаемых на ЗУ ПЭВМ (блок 3 на рисунке 2). Программная часть платформы, выполняемая на ПЭВМ, реализована в виде программного модуля в среде MATLAB, который работает в режиме постобработки с данными, предварительно записанными ПЭВМ на RAID-накопители, что функционально соответствует вычислительным этапам предлагаемого алгоритма обработки сигналов с частотным и кодовым разделением, реализованных в функциональных устройствах (блоки 4–10 на рисунке 2).

<sup>1</sup> НТЦ «Модуль». URL: <https://module.ru> (дата обращения 15.02.2026)

<sup>2</sup> Signatec PDA14 Data Sheet // Artisan Technology Group. URL: [https://www.artisanng.com/info/Signatec\\_PDA14\\_Datasheet\\_201571411265.pdf](https://www.artisanng.com/info/Signatec_PDA14_Datasheet_201571411265.pdf) (дата обращения 15.02.2026)

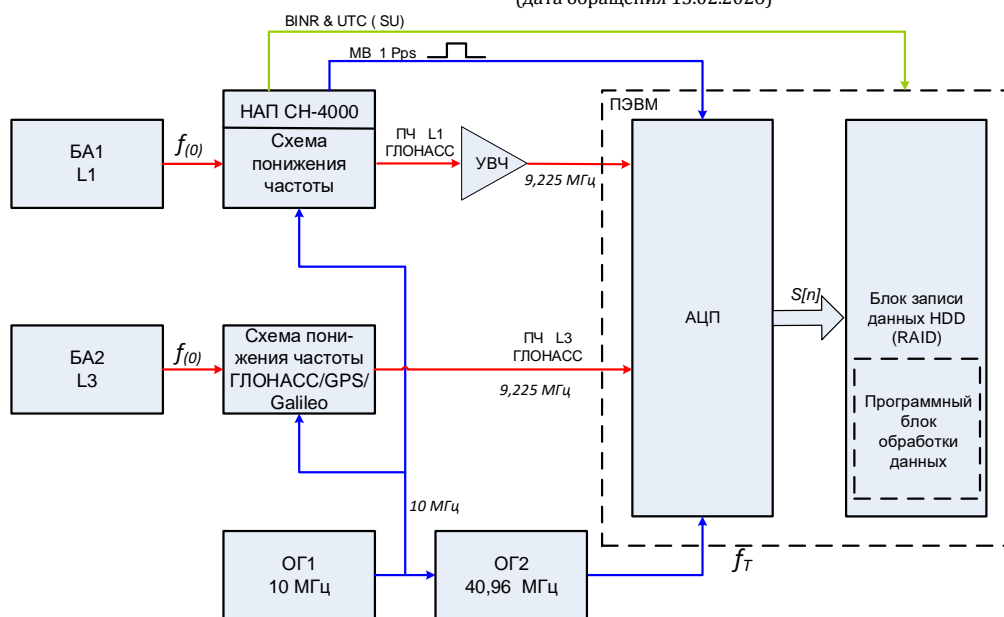


Рис. 3. Структурная схема макета программного приемника навигационных сигналов

Fig. 3. Software Receiver Prototype Block Diagram

С использованием макета программного приемника навигационных сигналов были проведены экспериментальные исследования, включавшие запись эфирного сигнала на промежуточной частоте 9,225 МГц с частотой дискретизации 40,96 МГц и 10-секундными интервалами. Обработка оцифрованного сигнала выполнена по представленному алгоритму в составе СПО. Для заданных параметров макета (частота дискретизации 40,96 МГц, интервал некогерентного накопления 20 мс) длина обрабатываемой реализации составляет 819200 отсчетов. Оценка вычислительной потребности алгоритма получена расчетным путем по числу операций в доминирующих этапах обработки – ПФ, ОПФ, комплексно-сопряженном перемножении спектров, вычислении модуля корреляционного отклика и некогерентном накоплении – и в пересчете на операции с плавающей запятой составляет порядка  $(0,9-1,7) \times 10^8$  операций на одну доплеровскую гипотезу. Для диапазона поиска 21–41 доплеровских гипотез это соответствует требуемой производительности порядка 94–340 гигафлопс в режиме реального времени. Таким образом, приведенная оценка характеризует требования к вычислительной платформе и служит основой для выбора элементной базы при переходе к реализации алгоритма в реальном времени.

Особенностью обнаружения навигационного сигнала в частотном диапазоне  $L3$  является использование сигнала с кодовым разделением. Поскольку априорных данных о структуре дальномерного кода нет, то поиск и обнаружение сигнала осуществлялись методом перебора всех дальномерных кодовых последовательностей, алгоритмы

формирования которых описаны в интерфейсном контрольном документе на навигационный радиосигнал в частотном диапазоне  $L3$  с открытым доступом и кодовым разделением (<https://russian-spacesystems.ru/Business/IKD-L3-dlya-KA-N-11-12-02.12.11.pdf>).

На рисунке 4 представлен результат обнаружения навигационного сигнала на выходе корреляционного приемника при использовании некогерентного накопления сигнала на интервале времени 20 мс: огибающие синфазной (оранжевая кривая) и квадратурной (зеленая кривая) составляющих корреляционного отклика приемника в зависимости от задержки опорного кода. Наличие выраженного максимума синфазной составляющей в области  $\sim 1800-1900$  отсчетов при близком к нулю уровне квадратурной составляющей свидетельствует о достижении в этой точке кодовой синхронизации и успешном обнаружении навигационного сигнала.

Архитектура предложенного алгоритма приема навигационных сигналов системы ГЛОНАСС и разработанного СПО обеспечивает унифицированное вычислительное ядро, применимое к сигналам как с кодовым, так и с частотным разделением. Это создает основу для одновременной обработки сигналов в различных навигационных диапазонах в рамках единой программной платформы. В данной работе экспериментально подтверждена работоспособность платформы для сигналов с кодовым разделением (частотный диапазон  $L3$ ), возможность обработки сигналов  $L1$ ,  $L2$  обеспечивается тем же алгоритмическим ядром при смене конфигурационных параметров.

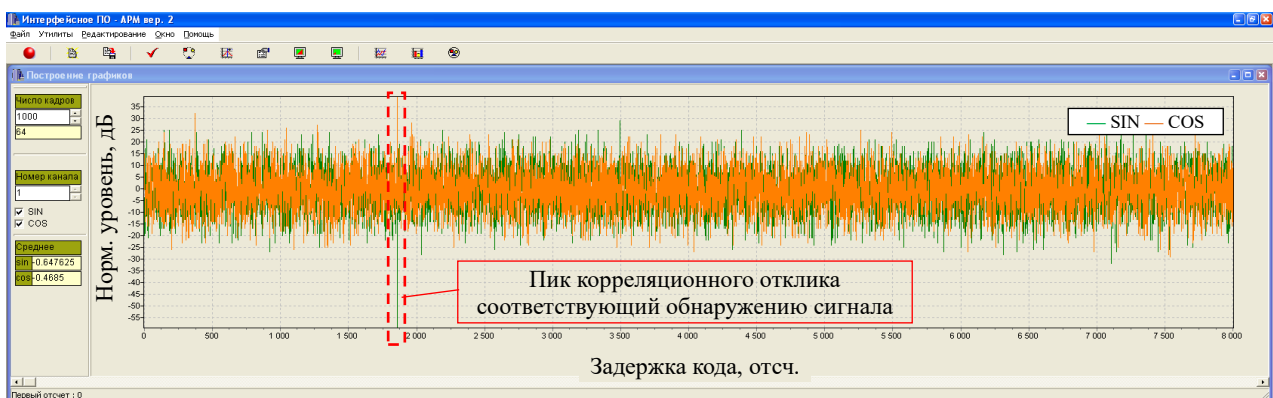


Рис. 4. Сигнал на выходе коррелятора при некогерентном накоплении на интервале 20 мс при обнаружении сигнала ГЛОНАСС в частотном диапазоне  $L3$

Fig. 4. Correlator Output for GLONASS  $L3$  Signal Detection with 20 ms Non-Coherent Integration

## Заключение

Проведенные исследования подтвердили эффективность программного подхода при обработке навигационных сигналов с частотным и кодо-

вым разделением, что особенно актуально в условиях совершенствования ГНСС.

Предложенный алгоритм приема навигационных сигналов, успешно апробированный в постобра-

ботке на ПЭВМ, демонстрирует возможность реализации в реальном времени при использовании современных высокопроизводительных процессоров (например, GPU серии NVIDIA Jetson или FPGA Xilinx Zynq UltraScale+), принципиальная возможность использования которых для задач цифровой обработки радиосигналов обоснована успешными примерами реализации навигационных приемников реального времени на аналогичных архитектурах [7–10] и согласуется с заявленными характеристиками производительности данных платформ<sup>3,4,5,6</sup>.

<sup>3</sup> NVIDIA Jetson Orin. Next-level AI performance for next-gen robotics and edge solutions // NVIDIA. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-orin> (дата обращения 15.02.2026)

<sup>4</sup> NVIDIA Jetson AGX Orin Series Technical Brief (TB-10749-001, v1.2). URL: <https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/gtc/t21/jetson-orin/nvidia-jetson-agx-orin-technical-brief.pdf> (дата обращения 15.02.2026)

<sup>5</sup> Zynq UltraScale+ MPSoC Data Sheet: Overview (DS891) // AMD URL: [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds891-zynq-ultrascale-plus-overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds891-zynq-ultrascale-plus-overview.pdf) (дата обращения 15.02.2026)

<sup>6</sup> Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview (DS190) // Xilinx. URL: [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds190-zynq-7000-overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-zynq-7000-overview.pdf) (дата обращения 15.02.2026)

Разработка компактных и функциональных образцов навигационной аппаратуры, соответствующих современным требованиям потребителей, возможна лишь при применении технологии программного приема сигналов. Ключевое преимущество данного подхода заключается в его адаптивности: изменение параметров навигационных сигналов не требует модификации аппаратной части, а реализуется за счет перепрограммирования программно-определяемого радиоприемного тракта. Это обеспечивает гибкость, масштабируемость и снижение стоимости жизненного цикла изделий по сравнению с классическими аналого-цифровыми архитектурами. Перечисленные свойства предложенного алгоритма обеспечивают его универсальность, подтвержденную экспериментально при обработке сигналов различных ГНСС с частотным и кодовым разделением.

Полученные результаты формируют основу для перехода к инженерной реализации унифицированного вычислительного ядра, ориентированного на перспективные образцы НАП.

#### Список источников

1. Tsui J.B.Y. *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005. 352. p.
2. Kaplan E.D., Hegarty C.J. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House, 2017. 1062 p.
3. Borre K., Akos D.M., Bertelsen N., Rinder P., Jensen S.H. *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser, 2007. 176 p. DOI:10.1007/978-0-8176-4540-3
4. Morton Y., van Diggelen F., Spilker Jr. J.J., Parkinson B.W. Lo S., Gao G. (eds.). *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2021. Vol. 1. 1136 p.
5. Енин С.В., Меняйлов Д.Е., Дугаев В.М., Панин Г.А., Вишин Д.Ф., Петричкович Я.Я. и др. Устройство для приема сигналов системы спутниковой навигации. Патент на полезную модель № RU 109872 U1 от 26.05.2011. Опубл. 27.10.2011. EDN:WSEGWS
6. Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Герасименко И.С., Добриков В.А., Иванов В.Ф., Симонов А.Б. и др. Программный приемник сигналов спутниковых навигационных систем на базе СБИС К1879ХК1Я // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. № 23. С. 230–235. EDN:PHSJFV
7. Hobiger T., Gotoh T., Amagai J., Koyama Y., Kondo T. A GPU based real-time GPS software receiver // *GPS Solutions*. 2010. Vol. 14. PP. 207–216. DOI:10.1007/s10291-009-0135-2. EDN:QTDPOX
8. Seo J., Chen Y.-H., De Lorenzo D.S., Lo S., Enge P., Akos D., et al. A Real-Time Capable Software-Defined Receiver Using GPU for Adaptive Anti-Jam GPS // *Sensors*. 2011. Vol. 11. PP. 8966–8991. DOI:10.3390/s110908966
9. Huang K.-Y., Juang J.-C., Tsai Y.-F., Lin C.-T. Efficient FPGA Implementation of a Dual-Frequency GNSS Receiver with Robust Inter-Frequency Aiding // *Sensors*. 2021. Vol. 21. PP. 4634. DOI:10.3390/s21144634. EDN:WRUQFZ
10. Majoral M., Fernández-Prades C., Arribas J. A Flexible System-on-Chip Field-Programmable Gate Array Architecture for Prototyping Experimental Global Navigation Satellite System Receivers // *Sensors*. 2023. Vol. 23. PP. 9483. DOI:10.3390/s23239483. EDN:KAUYXU

#### References

1. Tsui J.B.Y. *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*. Hoboken: Wiley-Interscience; 2005. 352. p.
2. Kaplan E.D., Hegarty C.J. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House; 2017. 1062 p.
3. Borre K., Akos D. M., Bertelsen N., Rinder P., and Jensen S. H. *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser; 2007. 176 p. DOI:10.1007/978-0-8176-4540-3
4. Morton Y., van Diggelen F., Spilker Jr. J.J., Parkinson B.W. Lo S., Gao G. (eds.). *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, vol.1*. Hoboken: Wiley-IEEE Press; 2021. 1136 p.
5. Enin S.V., Menyailov D.E., Dugaev V.M., Panin G.A., Vishin D.F., Petrichkovich Ya.Ya., et al. *Device for Receiving Signals from a Satellite Navigation System*. Patent RF, no. 109872, 26.05.2011. (in Russ.) EDN:WSEGWS


6. Bakholdin V. S., Gavrilov D. A., Gerasimenko I. S., Dobrikov V. A., Ivanov V. F., Simonov A.B., et al. Software-Defined Receiver for GNSS Signals Based on SBIS K1879HK1YA. Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences. 2012;23:230–235. (in Russ.) EDN:PHSJFV
7. Hobiger T., Gotoh T., Amagai J., Koyama Y., Kondo T. A GPU based real-time GPS software receiver. *GPS Solutions*. 2010; 14:207–216. DOI:10.1007/s10291-009-0135-2. EDN:QTDPOX
8. Seo J., Chen Y.-H., De Lorenzo D.S., Lo S., Enge P., Akos D., et al. A Real-Time Capable Software-Defined Receiver Using GPU for Adaptive Anti-Jam GPS. *Sensors*. 2011;11:8966–8991. DOI:10.3390/s110908966
9. Huang K.-Y., Juang J.-C., Tsai Y.-F., Lin C.-T. Efficient FPGA Implementation of a Dual-Frequency GNSS Receiver with Robust Inter-Frequency Aiding. *Sensors*. 2021;21:4634. DOI:10.3390/s21144634. EDN:WRUQFZ
10. Majoral M., Fernández-Prades C., Arribas J. A Flexible System-on-Chip Field-Programmable Gate Array Architecture for Prototyping Experimental Global Navigation Satellite System Receivers. *Sensors*. 2023;23:9483. DOI:10.3390/s23239483. EDN:KAUYXU

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 03.04.2026.


The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 31.03.2026; accepted for publication 03.04.2026.

## Информация об авторах:

**КОЗЛОВ**  
Алексей Васильевич

кандидат технических наук, начальник отдела Военного Института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского  
 <https://orcid.org/0009-0009-7037-3383>


**ПЕТУШКОВ**  
Александр Михайлович

кандидат военных наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Военного Института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского  
 <https://orcid.org/0009-0007-9130-4382>

**САКОВСКИЙ**  
Евгений Александрович

старший научный сотрудник лаборатории Военного Института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского  
 <https://orcid.org/0009-0002-1667-7246>

**СОЛОВЬЁВ**  
Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой подготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций Министерства Обороны РФ Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского  
 <https://orcid.org/0009-0001-7125-6009>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.