

УДК 621.396

## **СИСТЕМА ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ: АППАРАТНАЯ АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

*Гомолко В. А.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Вашкевич М.И. – канд. тех. наук, доцент*

**Аннотация.** Статья описывает структуру навигационного приемника. Представленная реализация навигационного приемного устройства обладает высокой универсальностью и гибкостью благодаря возможности модификации навигационных алгоритмов.

**Ключевые слова.** ГНСС, обработка навигационного сигнала, навигационное приемное устройство.

### **Вводная часть.**

Спутниковые системы навигации предоставляют различные услуги и возможности для разнообразных отраслей и применений, таких как авиация, морская транспортировка, спутниковая связь, а также для частных пользователей. Современные глобальные навигационные спутниковые системы (далее – ГНСС) предназначены для определения геопозиции объектов, скорости, времени, а также направление движения навигационного приемного устройства. Благодаря относительно высокой точности и доступности ГНСС стали неотъемлемой частью современных систем разных областей.

На 2023 год три основные спутниковые системы обеспечивают практически полное покрытие и непрерывное функционирование на глобальном уровне – *GPS* (США), *ГЛОНАСС* (Россия), *BeiDou* (Китай), *GALILEO* (Европейский союз). ГНСС не требуют от пользователей передачи каких-либо данных, что обеспечивает простоту и удобство использования. ГНСС непрерывно вещают сигналы на различных частотах, которые могут быть приняты пользователем, обладающим спутниковым приемником. За изменение параметров ГНСС ответственны органы, отвечающие за их обслуживание и функционирование. Например, система *GPS* контролируется военно-воздушными силами США.

В статье рассматриваются ключевые принципы обработки сигналов ГНСС и приводится пример аппаратной архитектуры на программируемых логических интегральных схемах (далее – ПЛИС). Реализация включает в себя минимальный тракт для получения сигнала от спутника и преобразования в цифровой формат для дальнейшей обработки на процессоре общего или специализированного назначения.

### **Принципы обработки сигналов ГНСС.**

Обработка навигационного сигнала, полученного со спутника, состоит из несколько основных стадий:

1. Радиочастотная часть: на данном этапе осуществляется прием сигнала, усиление, фильтрация и перенос на промежуточную частоту.
2. Аналого-цифровое преобразование: аналоговый сигнал преобразуется в цифровой формат для использования цифровых методов обработки.
3. Цифровая обработка сигнала: включает в себя процессы поиска, слежения за сигналом и извлечение навигационных данных.
4. Решение навигационной задачи: на этом этапе из навигационного сообщения извлекаются данные о местоположении спутников и с использованием этих данных вычисляется геопозиция пользователя на Земле.

Современные спутниковые приемники осуществляют обработку в цифровой части из-за преимуществ подхода, поскольку цифровые методы позволяют реализовывать сложные алгоритмы обработки и анализа, что обеспечивает высокую точность и надежность работы навигационной системы. В зависимости от архитектуры приемника обработка после аналого-цифрового преобразователя осуществляется с использованием отдельных корреляционных каналов либо процессорных ресурсов.

Для получения навигационных данных и определения геопозиции, необходимо определить, какие спутники находятся в видимом звездном созвездии. Этот процесс осуществляется при помощи процесса поиска. Поиск зависит от доступной информации и условий работы приемника, может быть в условиях неопределенности (англ. *cold start*) или в условиях априорной информации (англ. *hot start*):

1. В условиях неопределенности приемник не имеет предварительной информации о спутниках, текущем времени, своем местоположении и т.п. В данном случае приемник выполняет полный поиск по всем спутниковым сигналам, обычно до нескольких минут, из-за большого объема вычислений.
2. В условиях априорной информации приемник уже имеет информацию о спутниках, текущем времени, своем местоположении и т.п. Это может быть вызвано тем, что спутник работал некоторое время или при поддержке вспомогательной системы (англ. *assisted GNSS*), что ускоряет процесс поиска и обработку сигналов [1].

Поиск – стадия, на которой приемник определяет наличие сигнала от спутника и его приблизительные параметры, такие как частота и фазовое смещение [2]. Данный процесс начинается с генерации локальных сигналов, которые соответствуют спутниковым сигналам с различными параметрами фазового смещения и частоты Доплера.

Чтобы не потерять возможность извлечь полезные данные из спутникового сигнала, после успешного приобретения предварительных данных требуется постоянная синхронизация, этот процесс называется слежением. Приемник стремится максимально точно синхронизироваться с полученным сигналом. Это означает определение точного фазового смещения кода и частоты несущей. Для этого, обычно, используются две замкнутые петли: петля фазовой автоподстройки частоты (англ. *phase-locked loop*) и петля слежения за кодовой задержкой (англ. *delay-locked loop*) [3].

ФАПЧ – петля фазовой автоподстройки частоты. Петля отслеживает изменение частоты через разницу фаз. Разница между локально-сгенерированным и входным сигналом – фазовая ошибка. Управляющий сигнал зависит от фазовой ошибки, чем меньше ошибка, тем меньше значение управляющего сигнала подается на генератор сигнала. Этот процесс автоподстройки продолжается до тех пор, пока локальная частота не синхронизируется с частотой входного сигнала.

Петля слежения за кодовой задержкой отслеживает изменение задержки спутникового кода входного сигнала и подстраивает под этот сигнал локально генерируемую задержку. Архитектура петли использует структуру ранний-поздний-точный:

1. Ранний коррелятор: сравнивает локальный код с входным, сдвинутым на несколько кодовых символов назад;
2. Поздний коррелятор: сравнивает локальный код с входным, сдвинутый на несколько кодовых символов вперед;
3. Точный коррелятор: сравнивает локальный код с входным сигналом без задержки.

На основе разницы между ранней и поздней корреляцией, фильтр генерирует сигнал со скорректированной задержкой.

Параллельно процессу слежения происходит извлечение навигационных данных. Извлечение начинается после успешной синхронизации с телеметрическим словом (англ. *telemetry word*). Телеметрическое слово состоит из предопределенной последовательности бит, на основе которой приемник определяет начало подкадра. После успешной синхронизации с телеметрическим словом приемник извлекает битовую последовательность, которая затем объединяется в слова. Полученные слова собираются в структуру навигационного сообщения и обрабатываются в соответствии с интерфейсным документом на спутниковую систему для решения навигационной задачи – определение геопозиции объекта, скорости и времени.

#### **Аппаратная архитектура навигационного приемника**

В навигационных приемниках цифровая обработка сигналов может быть реализована как на аппаратном уровне, так и на уровне программного обеспечения, для исполнения инструкций процессором общего назначения вместе с сопроцессорами, при необходимости. До возможной обработки аппаратная архитектура должна как минимум иметь минимальный тракт для получения сигнала от спутника и преобразования в цифровой формат [4]. Этот тракт включает в себя радиочастотный усилитель, фильтры, гетеродин для переноса сигнала на промежуточную частоту

и аналого-цифровой преобразователь. Аппаратно-программная структура представлена на рисунке 1.

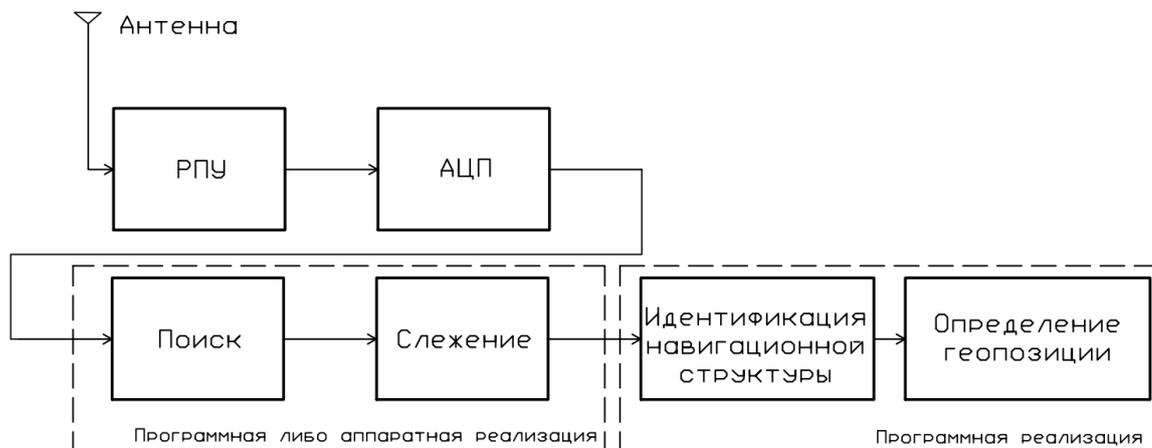


Рисунок 1 – Структура навигационного приемного устройства

В данной реализации тракт до поиска разработан аппаратно, вычисления по цифровым данным происходят с использованием процессорных ресурсов *ARM Cortex A9*, что позволяет получить высокую производительность, энергоэффективность и эффективное использование памяти для встроенной системы [5]. Данное решение позволяет без особой сложности вносить изменения в навигационные алгоритмы при необходимости, что делает приемник универсальным, а программное обеспечение кроссплатформенным: программное обеспечение может работать на большинстве устройств с архитектурой *ARM* без необходимости адаптации программного обеспечения.

Аппаратные компоненты были описаны на языке описания аппаратуры. Ключевыми компонентами являются модуль ввода и цифровой канал обработки. Модуль ввода выполняет функцию первичной настройки всех компонентов системы, таких как радиочастотная схема для приема данных и цифрового канала обработки, а также калибровку АЦП.

В цифровом канале происходит перенос на нулевую промежуточную частоту и демодуляция сигнала с использованием квадратурного гетеродина. После демодуляции сигнал преобразуется в две составляющие: *I* и *Q*. Нежелательные гармоники подавляются низкочастотным фильтром с децимацией, что позволяет снизить частоту дискретизации и сэкономить вычислительные ресурсы. Затем комплексные отчеты передаются через контроллер прямого доступа к памяти в оперативную память системы для дальнейшей обработки при помощи программного обеспечения.

После того, как комплексные отчеты были переданы в оперативную память, происходит навигационная обработка: определения первичных параметров по полученным данным, таких как частота и фазовое смещение. После успешного определения первичных параметров происходит стадия слежения, где происходит постоянная синхронизация с сигналом и последующее извлечение навигационных данных с целью определения геопозиции объекта, скорости и времени.

#### Аппаратные ресурсы.

Далее представлена таблица 1, которая показывает количество и типы ресурсов, используемых в данной аппаратной архитектуре навигационного приемного устройства на *Zynq 7015*.

Таблица 1 – Аппаратные затраты на ПЛИС *Zynq 7015*

| Ресурс        | Количество | Доступно |
|---------------|------------|----------|
| <i>LUT</i>    | 8257       | 46200    |
| <i>LUTRAM</i> | 511        | 14400    |
| <i>FF</i>     | 12372      | 92400    |
| <i>BRAM</i>   | 8          | 95       |
| <i>DSP</i>    | 54         | 160      |
| <i>IO</i>     | 32         | 150      |
| <i>MMCM</i>   | 1          | 3        |

**Вывод.**

В статье были рассмотрены ключевые принципы обработки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и рассмотрен пример аппаратной архитектуры на программируемых логических интегральных схемах. Обработка навигационного сигнала включает несколько основных стадий, таких как радиочастотная часть, аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка сигнала и решение навигационной задачи.

**Список использованных источников:**

1. Frank Van Diggelen (2009). *A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Artech House.
2. Гомолко В. А. Быстрый поиск GPS-сигнала. *Материалы 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР*. – Минск, 2022. Руководитель: Вашкевич М.И.
3. Roland E. Best (2007). *Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications*. McGraw-Hill Education.
4. Doberstein D. *Fundamentals of GPS receivers : a hardware approach* – New York : Springer, ©2012. С
5. James A. Langbridge (2014). *Professional Embedded ARM Development*. Wrox.

UDC 621.396

## **NAVIGATION DATA PROCESSING SYSTEM: HARDWARE ARCHITECTURE AND SOFTWARE**

*Gomolko V. A.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Vashkevich M.I. – PhD in Physics and Mathematics*

**Annotation.** The article describes the structure of a navigation receiver. The presented implementation of the navigation receiver has high universality and flexibility due to the ability to modify navigation algorithms with minimal effort.

**Keywords.** GNSS, navigation signal processing, navigation receiver.