

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

<b>Направление</b>	11.04.01 - Радиотехника
<b>Программа</b>	Микроволновые, оптические и цифровые средства телекоммуникаций
<b>Факультет</b>	ФРТ
<b>Кафедра</b>	ТОР

*К защите допустить*

Зав. кафедрой

Ушаков В.Н.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
МАГИСТРА**

**Тема: Исследование взаимного влияния сигналов ГНСС на  
погрешность оценки псевдодальности**

Студент	_____	Бодин В.С.
	<i>подпись</i>	
Руководитель	_____	Москалец Д.О.
	<i>(Уч. степень, уч. звание)      подпись</i>	
Консультанты	_____	Сошин М.П.
	<i>К.Т.Н.      подпись</i>	
	<i>(Уч. степень, уч. звание)</i>	
	_____	Иванов А.И.
	<i>К.Т.Н.      подпись</i>	
	<i>(Уч. степень, уч. звание)</i>	
	_____	Лавренко Н.С.
	<i>подпись</i>	

Санкт-Петербург

2018

## ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю

Зав. кафедрой ТОР

Ушаков В.Н.

«      » 2018 г.

Студент            Бодин В.С.

Группа 2103

Тема работы: Исследование взаимного влияния сигналов ГНСС на погрешность оценки псевдодальности

Место выполнения ВКР: АО «КБ НАВИС»

Исходные данные (технические требования): Необходимо построить идеальную модель обработки и определить условия возникновения взаимных помех различных сигналов ГНСС при требованиях по допустимой величине квазисистематической погрешности порядка 0,1 нс.

Содержание ВКР: принципы построения и функционирования современных ГНСС; результаты моделирования процесса обработки сигнала на предмет оценки псевдодальности.

Перечень отчетных материалов: пояснительная записка, иллюстративный материал

## Дополнительные разделы: Специальные вопросы обеспечения безопасности

Дата выдачи задания

Дата представления ВКР к защите

«        » 20 \_\_\_\_ г.

«        » 20 \_\_\_\_ г.

Студент

Бодин В.С.

## Руководитель

(Уч. степень, уч. звание)

Москалец Д.О.

# Консультант

**К.Т.Н.**  
(Уч. степень, уч. звание)

Сошин М.П.

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю

Зав. кафедрой ТОР

---

УШАКОВ В.Н.

«        » 2018 г.

Студент            Бодин В.С.

Группа 2103

Тема работы: Исследование взаимного влияния сигналов ГНСС на погрешность оценки псевдодальности

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Обзор литературы по теме работы	
2	Разработка модели	
3	Моделирование	
5	Оформление пояснительной записки	
6	Оформление иллюстративного материала	

Студент

Бодин В.С.

# Руководитель

Москалец Д.О.

Консультант

K.T.H

(Уч. степень, уч. звание)

Сошин М.П.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 84 стр., 61 рис., 12 ист.

ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ, ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU, ОЦЕНКА ПСЕВДОДАЛЬНОСТИ, ДИСКРИМИНАТОР ЗАДЕРЖКИ ОГИБАЮЩЕЙ, ПОМЕХА МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

Цель работы - для сигналов ГНСС необходимо определить условия возникновения и величину искажения псевдодальности по дальномерному коду (ДК) за счет взаимного влияния сигналов ГНСС одного радиочастотного диапазона друг на друга.

В данной работе приведены результаты моделирования взаимного влияния сигналов ГНСС одного радиочастотного диапазона друг на друга.

В тексте ВКР приведено описание исследуемых ансамблей сигналов, модели, в рамках которой производились расчёты и результаты моделирования в среде Matlab. Также рассмотрен вопрос эргономики программного обеспечения разработанной программы.

## **ABSTRACT**

For GNSS signals, it is necessary to determine the conditions of occurrence and magnitude of distortion of the pseudo range by the ranging code due to the mutual influence of GNSS signals of one radio frequency band on each other.

In processing, GNSS signals to each other are imitation interference of multiple access.

It is necessary to construct an ideal model of processing and to determine the conditions for the occurrence (or practical absence) of mutual interference of various signals when the requirements for the permissible magnitude of the quasisystematic error are of the order of 0.1 ns.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	11
1. СИГНАЛЫ ГНСС ГЛОНАСС .....	12
1.1 Сигналы ГЛОНАСС с частотным разделением (L1OF, L2OF) в диапазонах L1 и L2 .....	14
1.2 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L1 (L1OC) .....	19
1.3 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L2 (L2OC) .....	24
1.4 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L3 (L3OC) .....	26
2. ОТКРЫТЫЙ СИГНАЛ GPS С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В ДИАПАЗОНЕ L1 (C/A КОД) .....	29
3. СИГНАЛ E1 СИСТЕМЫ GALILEO С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В ДИАПАЗОНЕ L1 .....	35
4. СИГНАЛЫ B1I, B2I СИСТЕМЫ BEIDOU С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ.....	42
5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБРАБОТКЕ НАВИГАЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	45
6. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	48
7. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	50
7.1 Сигналы с частотным разделением.....	51
7.1.1 Сигналы ГНСС ГЛОНАСС стандартной точности с частотным разделением .....	51
7.1.2 Сигналы ГНСС ГЛОНАСС высокой точности с частотным разделением .....	62

7.2 Сигналы с кодовым разделением .....	64
7.2.1 Сигналы ГНСС GPS стандартной точности (C/A) в диапазоне L1.....	64
7.2.2 Сигналы B1I, B2I ГНСС Beidou .....	66
7.2.3 Сигнал E1 ГНСС Galileo .....	69
8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ .....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	84

## ВВЕДЕНИЕ

Ансамбли сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) проектировались с учетом заданных точностных требований и ограничений по частотному плану сигналов и их допустимой мощности. При выборе ансамбля сигналов разумно балансировались разные источники ошибок для получения оперативного качественного решения навигационной задачи (шумовая, динамическая, искажения сигналов при обработке, взаимное влияние сигналов друг на друга). Одно из правил разработчиков — лучше, если все погрешности примерно равновесны.

Со временем происходило с одной стороны улучшение различных параметров элементной базы, в том числе снижение ее стоимости. В результате область применения аппаратуры спутниковой навигации (АСН) потребителей ГНСС существенно расширялась. В частности стали существенными применения на «стационарных» объектах. Для таких объектов имеется возможность для получения решений осуществлять накопление и статистическую обработку большого объема измерительной информации. Примерами могут служить:

- эталоны частоты и времени с использованием АСН;
- системы поверки эталонов времени и частоты с использованием одновременной работы по одним и тем же НКА ГНСС на разнесенных пунктах первичного и вторичных эталонов;
- АСН геодезических измерений;
- АСН контроля малых медленных перемещений важных элементов строительных конструкций (плотины ГЭС, мосты);
- уточнение параметров орбиты спутников различного назначения на основе набора массива измерений по дальномерному коду и фазе несущей;
- дифференциальные станции ГНСС различного назначения.



В результате использования статистической обработки большого массива информации стало возможным существенно уменьшить погрешности результатов.

Для АСН с высокими точностными требованиями существенным стало влияние параметров тракта обработки на погрешности решения задач. Для сигналов с частотным разделением (ГНСС ГЛОНАСС) как на первых этапах развития АСН, так и при ужесточении точностных требований к ней достаточно очевидной представлялась зависимость задержки сигнала в тракте обработки от его литерной частоты. При этом возникла задача калибровки этих задержек.

Для калибровки по задержке дальномерного кода используется эталонный имитатор сигналов ГНСС. Причем для обеспечения допустимых шумовых погрешностей (20 ... 10 ... 5 ... 2 ... 1 ... 0,1 нс) при выполнении измерений повышается мощность сигналов на 10...15 дБ (с учетом ограничения АСН) и используется набор измерений на достаточно продолжительном интервале (10...60 мин). Для сокращения продолжительности процедуры калибровки по всем литерам (их количество изменялось в процессе развития ГНСС ГЛОНАСС: 1...24; 1...12; -7 ... +6) каждого экземпляра АСН, подлежащего калибровке, желательно максимально одновременная работа по литерам. Последнее требование ограничено возможностями как имитаторов ГНСС, так и АСН.

Наиболее привлекательным для проведения калибровочных работ представляется одновременная обработка всех литерных сигналов на специальном сценарии работы имитатора. Он состоит в том, что все НКА ГНСС находятся в одной точке пространства и синхронно излучают сигналы с минимально необходимой соответствующей цифровой информацией (как минимум должна быть метка времени) — либо движутся по известному допустимому для АСН закону, оставаясь на протяжении необходимого времени радиовидимыми.

При попытке реализации такой процедуры калибровки с синхронно движущимися (или неподвижными) с допустимой погрешностью менее 5 нс выяснилось, что при одновременной калибровке по сравнению с индивидуальной имеются значимые различия в оценке калибровочной поправки (не шумовые).

Физической основой такого явления может быть совпадение частот спектральных составляющих сигналов четной (и отдельно нечетной) группы литер. Шаг спектральных составляющих сигналов составляет 1 кГц, шаг литерных частот как в первом, так и во втором диапазоне кратен 0,5 кГц.

Возникает вопрос о теоретическом обосновании описанного выше взаимодействия и способах его избежать, в частности, при проведении калибровке модулей, принимающих сигналы ГЛОНАСС, чтобы можно было ускорить данный процесс.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АКФ – автокорреляционная функция

АСН – аппаратура спутниковой навигации

ВКФ – взаимокорреляционная функция

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система

ДХ – дискриминационная характеристика

КА – космический аппарат

НАП – навигационная аппаратура потребителя

ПМД – помеха множественного доступа

ВОС – binary offset carrier modulated signal

CDMA – code division multiple access

## 1. СИГНАЛЫ ГНСС ГЛОНАСС

Первое научно обоснованное предположение [1] об использовании искусственных спутников Земли (ИСЗ) для навигации появилось в период работы профессора В.С.Шебашевича в Ленинградской военно-воздушной инженерной академии (ЛВВИА) им. А.Ф. Можайского в 1955г. Возможность использования ИСЗ в решении задач навигации была открыта при исследовании радиоастрономических методов в самолетовождении. Результаты этих исследований были дополнены научными основами низкоорбитальных СРНС, которые были существенно развиты в процессе выполнения исследований по теме «Спутник» (1958-1959 гг.), и использованы при опытно-конструкторских работах над первой отечественной низкоорбитальной системой «Цикада».

«Цикада» стала первой отечественной навигационной системой и была сдана в эксплуатацию в 1979г. В состав этой системы входили четыре навигационных спутника (НС), выведенных на круговые орбиты с равномерным распределением плоскостей орбит вдоль экватора высотой 1000 км.

В ходе эксплуатации системы было выявлено, что основной вклад в погрешность оценки навигационных параметров вносят погрешности передаваемых спутниками собственных эфемерид, которые передаются на спутники средствами наземного комплекса управления. Такое положение дел побудило разработчиков системы обратить внимание не только на совершенствование бортовых систем спутника, но и на повышение точности прогнозирования параметров орбит НС.

Успешная эксплуатация систем «Цикада» и «Сарсат» морскими потребителями вызвала большой интерес к спутниковой навигации. Таким образом, возникла потребность создания универсальной навигационной системы.

Низкоорбитальные системы не удовлетворяли требованиям всех классов потребителей в силу принципов их построения. Универсальная

навигационная система должна обеспечивать потребителю в любой момент времени возможность определять три координаты, вектор скорости и точное время. Исходя из этих требований, была выбрана такая структура спутниковой системы навигации, которая обеспечивает в любой момент времени радиовидимость не менее четырех спутников в любой точке Земли. Это условие ограничило высоту орбиты навигационных спутников и установило суммарное число НС в системе – 18, но для повышения точности определения навигационных параметров это число было увеличено до 24-х.

Одной из главных проблем синтеза подобной системы явилась проблема высокоточной взаимной синхронизации спутниковых шкал времени. Решение этой проблемы потребовало установки на НС высокостабильных бортовых цезиевых стандартов частоты и наземного водородного стандарта с относительной нестабильностью порядка  $10^{-13}$  и  $10^{-14}$  соответственно.

В октябре 1982 г. запуск спутника “Космос-1413” положил начало испытаний высокоорбитальной отечественной навигационной системы, получившей название ГЛОНАСС. И уже в 1995г. была развернута полная орбитальная группировка системы (24 космических аппарата (КА) ГЛОНАСС первого поколения) и начата штатная эксплуатация системы. Недостатком этой системы было отсутствие гражданской навигационной аппаратуры потребителей (НАП).

В настоящее время система ГЛОНАСС позволяет решать широкий спектр задач. История развития КА системы и характеристики, как на данный момент, так и ближайшие перспективы приведены в таблице 1. Для FDMA сигналов в скобках приведено значение центральной частоты.

На рисунке Рисунок 1 представлен вид космических аппаратов системы ГЛОНАСС, выведенных на орбиту в хронологическом порядке.



Рисунок 1 Космические аппараты системы ГЛОНАСС

В целях обеспечения постоянно растущих требований потребителей и сохранения конкурентоспособности системы, ГЛОНАСС непрерывно совершенствуется. Так, на ранних этапах своего существования система использовала лишь сигналы с частотным разделением, позднее были добавлены сигналы с кодовым разделением. Впрочем, обе идеологии построения систем множественного доступа имеют как преимущества, так и недостатки. В следующих подразделах последуют описания сигналов, используемой системой ГЛОНАСС, которые были исследованы в работе.

Таблица 1 Характеристики КА системы ГЛОНАСС

Характеристики	«ГЛОНАСС»	«ГЛОНАСС-М»	«ГЛОНАСС-К2»
Количество КА	24		
Количество КА в каждой плоскости	8		
Суточная нестабильность БСУ	$5 \cdot 10^{-13}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$
Тип сигналов	FDMA	FDMA, CDMA	FDMA, CDMA
Сигналы с открытым доступом	L1OF	L1OF, L2OF	L1OF, L2OF, L1OC, L3OC
Сигналы с санкционированным доступом	L1SF, L2SF	L1SF, L2SF	L1SF, L2SF, L1SC, L2SC

### 1.1 Сигналы ГЛОНАСС с частотным разделением (L1OF, L2OF) в диапазонах L1 и L2

Навигационный радиосигнал, передаваемый каждым навигационным космическим аппаратом (НКА) системы ГЛОНАСС на собственной несущей

частоте в поддиапазонах L1 и L2, является многокомпонентным фазоманипулированным сигналом [2]. Номинальные значения несущих частот в частотных поддиапазонах L1 и L2 определяются следующими выражениями:

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1,$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2,$$

где K – номера несущих частот радиосигналов, излучаемых НКА в частотных поддиапазонах L1 и L2, соответственно;

$$f_{01} = 1602 \text{ МГц}, \Delta f_1 = 562,5 \text{ кГц}, \text{ для поддиапазона L1};$$

$$f_{02} = 1246 \text{ МГц}, \Delta f_2 = 437,5 \text{ кГц}, \text{ для поддиапазона L2}.$$

Номер K определяет номер сигнала (литеру) и принимает значения от -7 до 6.

Фазовая манипуляция несущей осуществляется на  $\pi$  радиан и модулируется двоичной последовательностью, образованной суммированием по модулю два псевдослучайного (ПС) дальномерного кода, цифровой информации и вспомогательного колебания типа меандр.

Псевдослучайный дальномерный код представляет собой последовательность максимальной длины регистра сдвига (М - последовательность) с периодом  $T=1\text{мс}$  и скоростью передачи символов 511 кбит/с.

ПС дальномерный код снимается с 7-го разряда 9-ти разрядного регистра сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС). Начальным символом в периоде ПС дальномерного кода является 1-ый символ в группе 111111100, повторяющийся через 1мс. Регистр сдвига, формирующий ПС дальномерный код, имеет следующий вид (рисунок 2).

Анализ взаимного влияния сигналов будет производиться в частотной области. Амплитудные спектры сигналов литер от -7 до 7 в поддиапазонах L1 и L2 изображены на рисунках 3 и 4 соответственно.

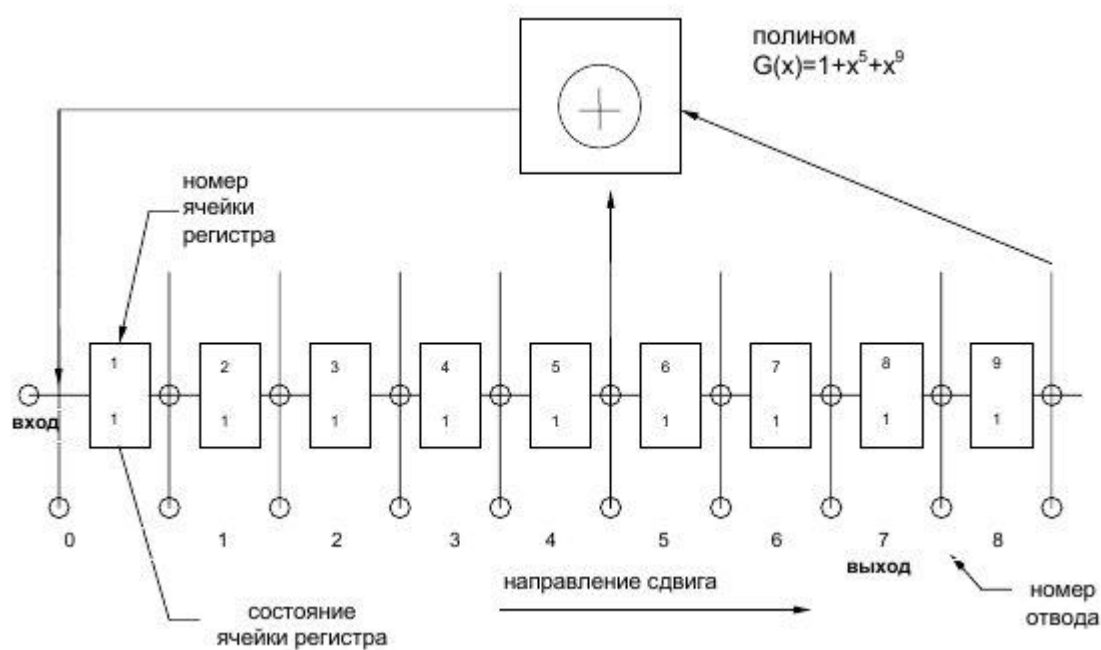


Рисунок 2 Структура РСЛОС формирующего дальномерный код

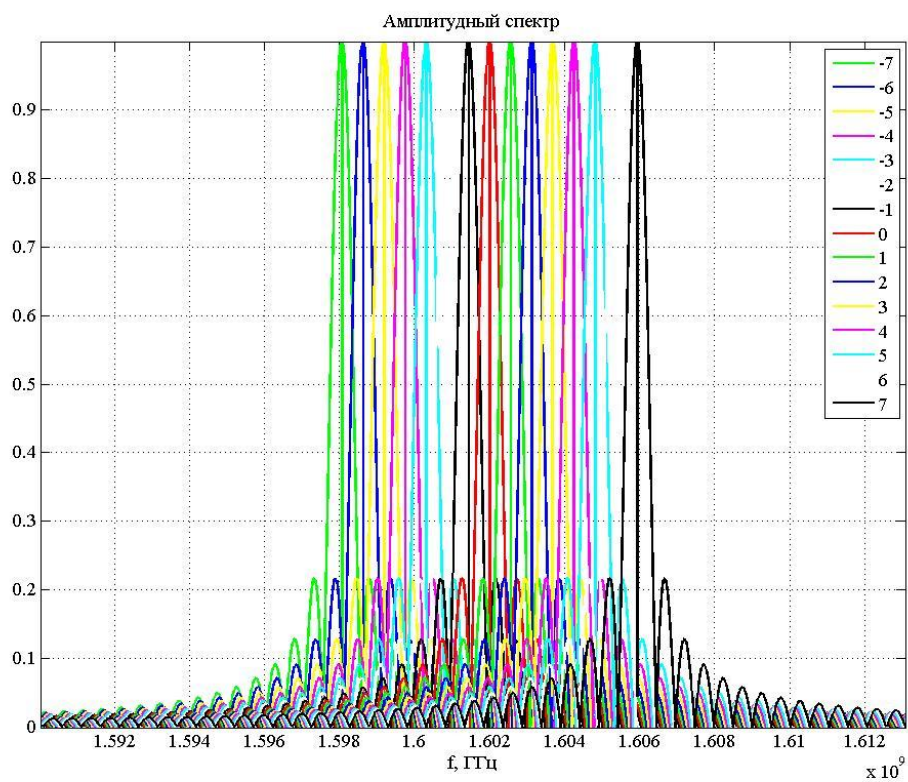


Рисунок 3 Амплитудные спектры сигнала L1OF (литеры от -7 до 7)



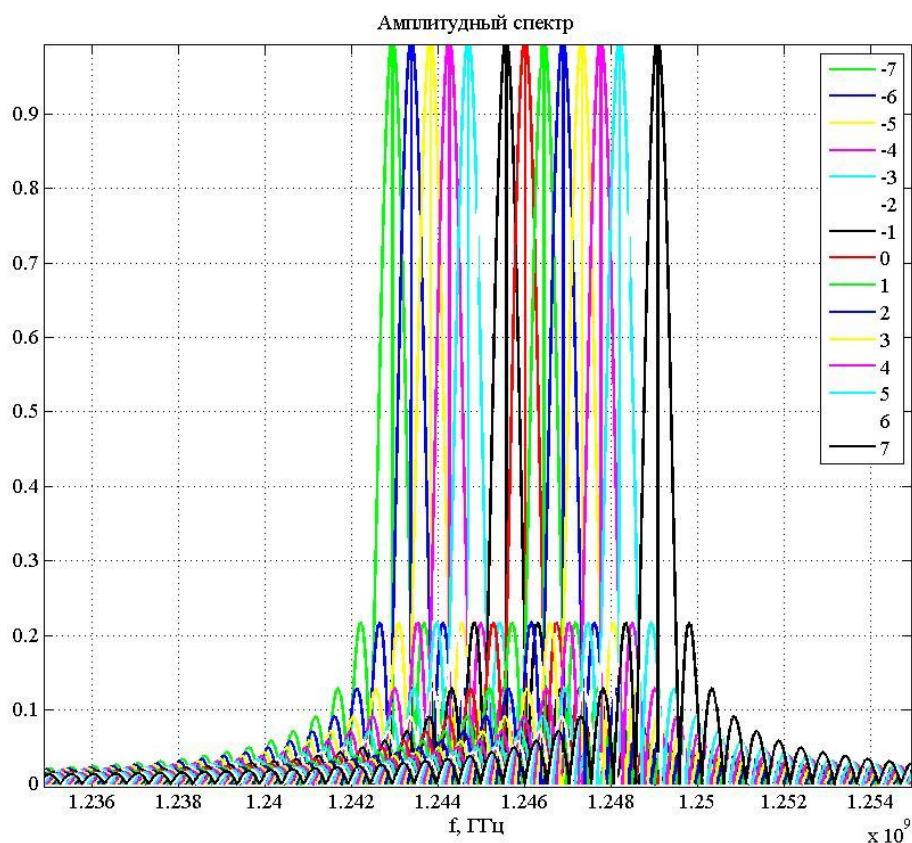


Рисунок 4 Амплитудные спектры сигнала L2OF (литеры от -7 до 7)

ПС дальномерный код имеет период повторения 1 мс, соответственно разнос между спектральными составляющими отдельно взятого сигнала будет составлять 1кГц, а между спектральными составляющими соседних литер 562,5 кГц и 437,5 кГц для поддиапазонов L1 и L2 соответственно. В ситуации, когда все сигналы синхронно излучаются из одной точки пространства (все спутники расположены в одном месте) доплеровский сдвиг частоты для всех сигналов будет одинаков. Это приводит к тому, что у сигналов кратных литер (кратными друг другу будем называть четные, либо нечетные литеры) спектральные составляющие с разномом 1кГц накладываются друг на друга. Подобное наложение приводит к ошибкам калибровки, которые затем создают ошибки в навигационно-временных определениях. Возникает вопрос о теоретическом обосновании описанного выше взаимодействия и способах его избежать, в частности, при проведении калибровке модулей, принимающих сигналы ГЛОНАСС, чтобы можно было ускорить данный процесс.

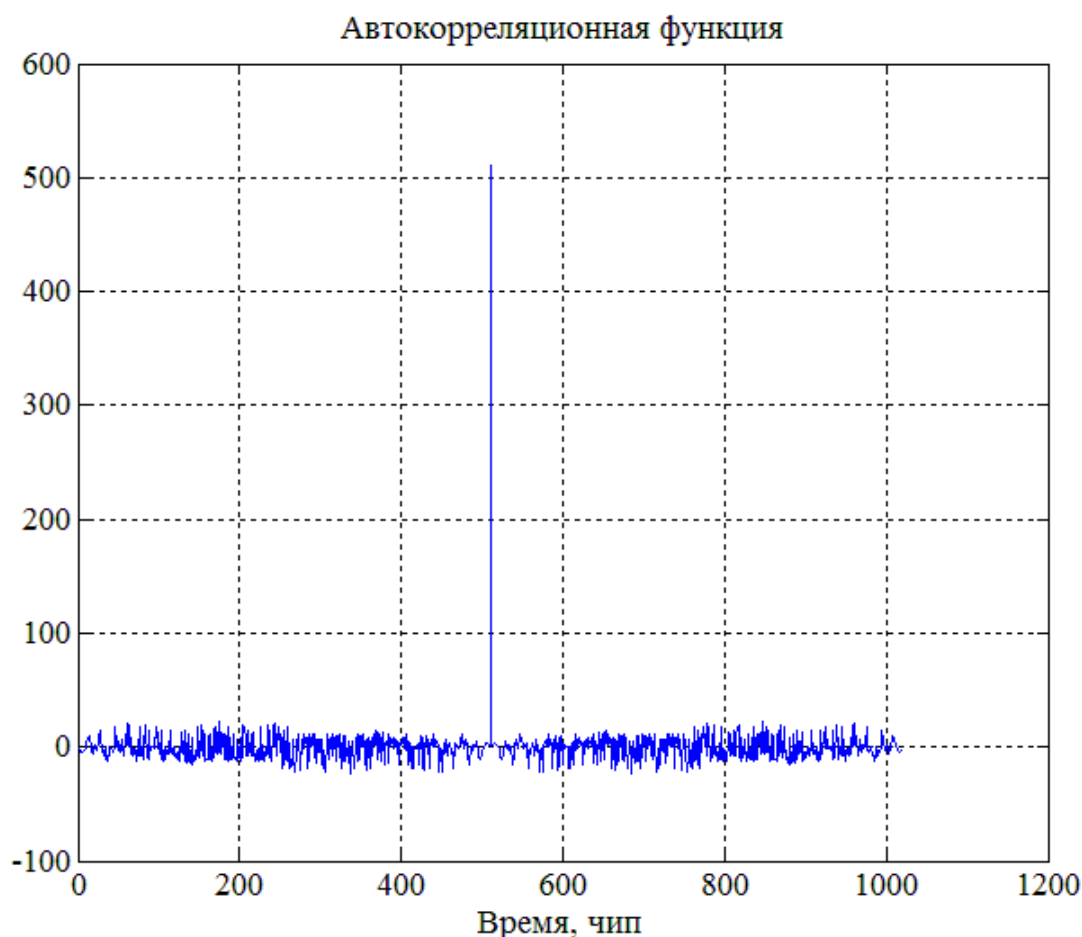
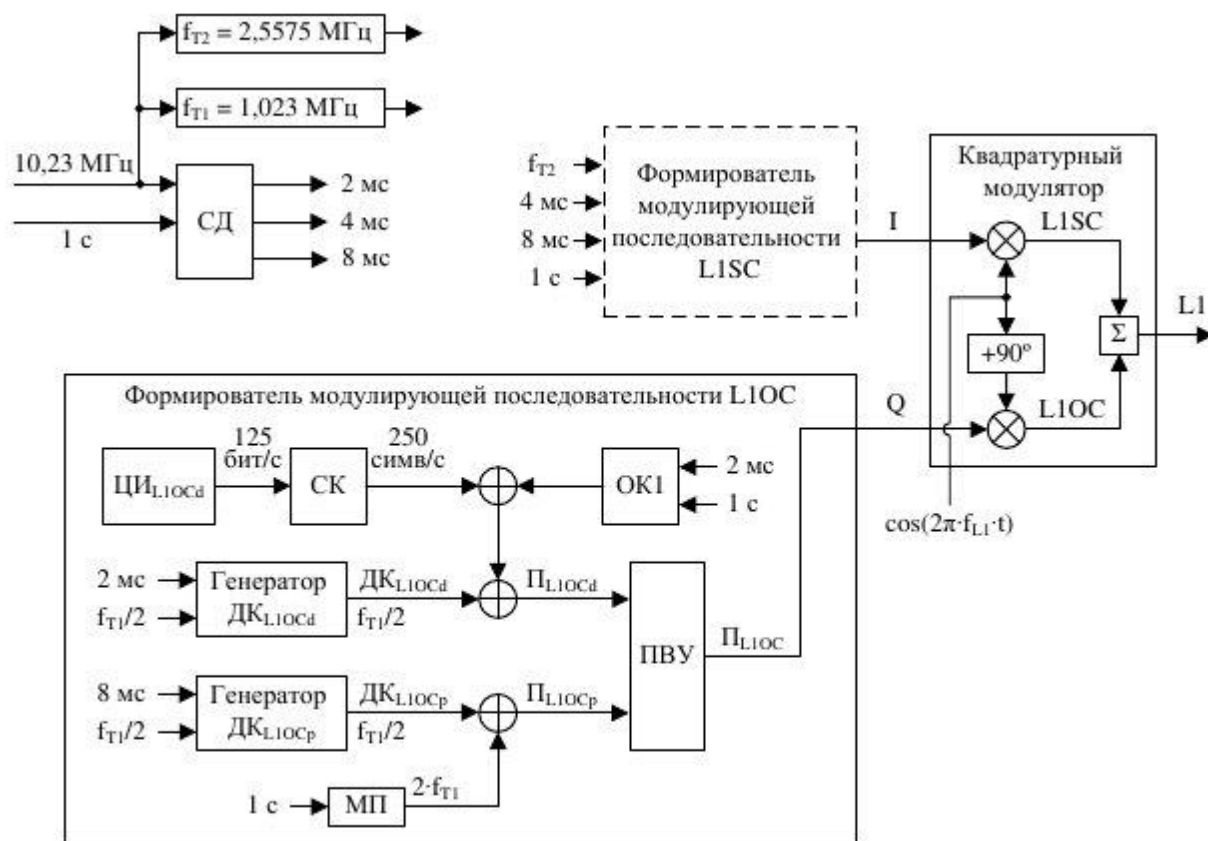


Рисунок 5 Автокорреляционная функция М-последовательности сигнала L1OF

Благодаря достаточно простому методу формирования и малому уровню боковых лепестков, М-последовательности находят широкое применение в радиотехнических системах. В частности использование М-последовательностей в спутниковых каналах связи обусловлено требованиями по ограничению доступа и повышению помехозащищенности в канале связи. Подобные требования удастся удовлетворить путем использования сигналов сложной структуры и специальных методов кодирования. Для этого широко используются сложные сигналы, основанные на фазовой манипуляции гармонического несущего колебания псевдослучайными последовательностями, в частности М-последовательностями.

## 1.2 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L1 (L1OC)

Сигнал L1OC излучается на несущей частоте  $f_{L1} = 1600,995 \text{ МГц}$  и содержит информационную L1OCd и пилотную L1OCp компоненты равной мощности, которые уплотняются путем чередования чипов ДК этих компонент [3]. Схема формирования сигнала L1OC представлена на рисунке 6.



СД – синхронный делитель; ЦИ – цифровая информация; ОК – оверлейный код;  
ПВУ – почиповый временной уплотнитель; ДК – дальномерный код; П – последовательность

Рисунок 6 Схема формирования сигнала L1OC

Модулирующая последовательность символов  $\Pi_{L1OCd}$  сигнала L1OCd формируется путем суммирования по модулю 2 символов дальномерного кода  $ДК_{L1OCd}$ , символов оверлейного кода ОК1 и символов сверточного кода (СК).

Дальномерные коды  $ДК_{L1OCd}$  являются кодами Голда, имеют длину  $N=1023$ , период  $T=2\text{мс}$  и образуются суммированием по модулю 2 двоичных

символов (0 и 1), поступающих от цифровых автоматов ЦА1 и ЦА2 в соответствии с рисунком 7.

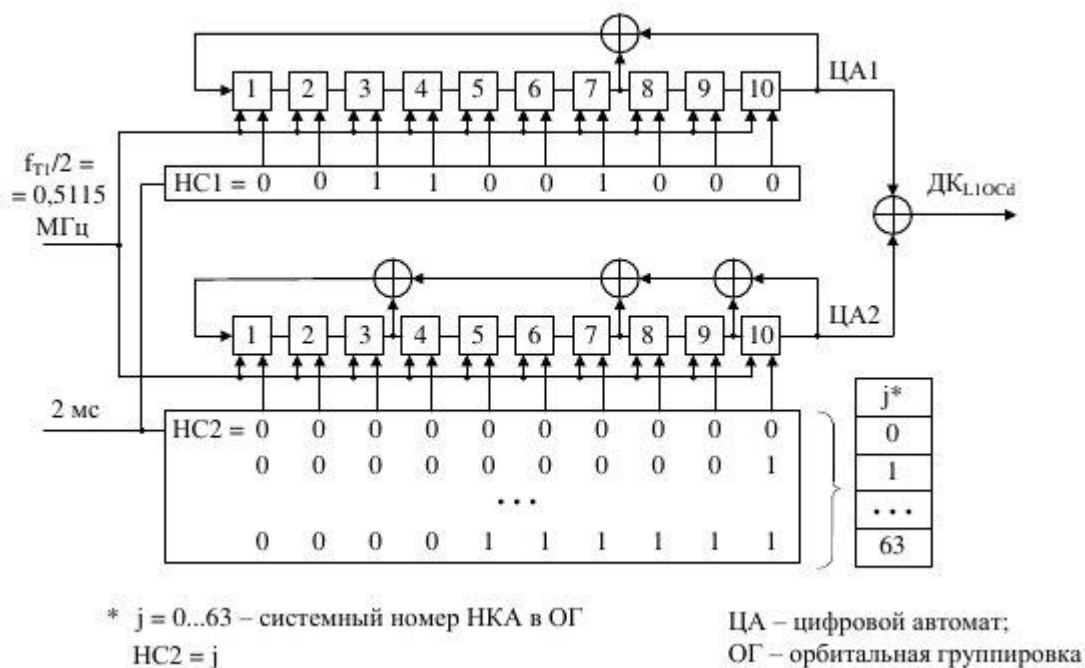


Рисунок 7 Структура генератора дальномерного кода L1OCd

Порождающие полиномы, соответствующие регистрам сдвига входящих в состав ЦА1 и ЦА2 выглядит следующим образом:

$$G1(x) = 1 + x^7 + x^{10},$$

$$G2(x) = 1 + x^3 + x^7 + x^9 + x^{10}.$$

Раз в период происходит установка следующих кодов начального состояния в регистры ЦА:

- в ЦА1 – 10011001000;
- в ЦА2 – 0000000000, 0000000001...0000111111.

Модулирующая последовательность символов  $\Pi_{L1OCp}$  сигнала L1OCp формируется путем суммирования по модулю 2 символов дальномерного кода  $ДК_{L1OCp}$  и меандровой последовательности (МП). МП представляет собой периодическую последовательность 0101, синхронизированную с символами дальномерного кода  $ДК_{L1OCp}$  и предназначена для формирования модуляции ВОС(1,1).

Дальномерные коды  $ДК_{L1OCp}$  являются усеченными последовательностями Касами, имеют длину  $N=4092$ , период  $T=8\text{мс}$  и образуются суммированием по модулю 2 двоичных символов (0 и 1), поступающих от ЦА1 и ЦА2 в соответствии с рисунком Рисунок 8.

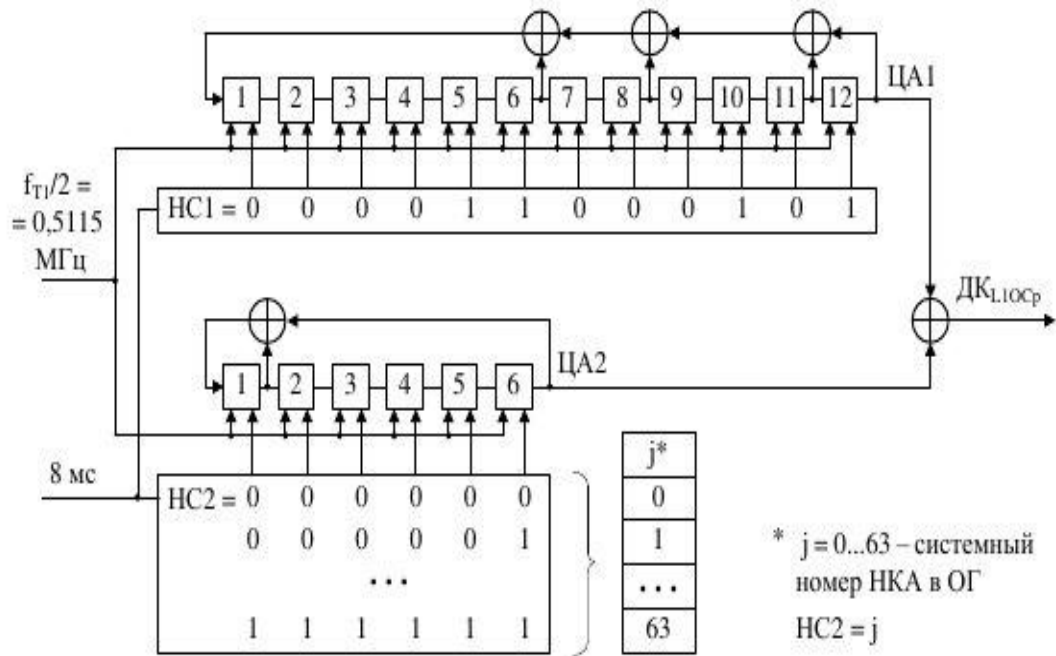


Рисунок 8 Структура генератора  $ДК_{L1OCp}$

Порождающие полиномы, соответствующие регистрам сдвига входящих в состав ЦА1 и ЦА2 выглядит следующим образом:

$$Z1(x) = 1 + x^6 + x^8 + x^{11} + x^{12},$$

$$Z2(x) = 1 + x + x^6.$$

Раз в период происходит установка следующих кодов начального состояния в регистры ЦА:

- в ЦА1 – 000011000101;
- в ЦА2 – 000000, 000001...111111.

Модулирующая последовательность символов сигнала  $L1OC$  формируется путем почипового временного уплотнения (ПВУ). Временные соотношения, поясняющие способ уплотнения, приведены на рисунке Рисунок 9. Как видно из рисунка, при формировании пилотной компоненты сигнала  $L1OC$  используется бинарная модуляция на поднесущих частотах (ВОС модуляция). Амплитудный спектр пилот сигнала  $L1OCp$  с ВОС

модуляцией изображен на рисунке Рисунок 11. Согласно [7], сигнал, имеющий форму спектра, у которой максимумы смещены к краям занимаемого диапазона частот, обладает более высокой точностью измерения задержки сигнала.

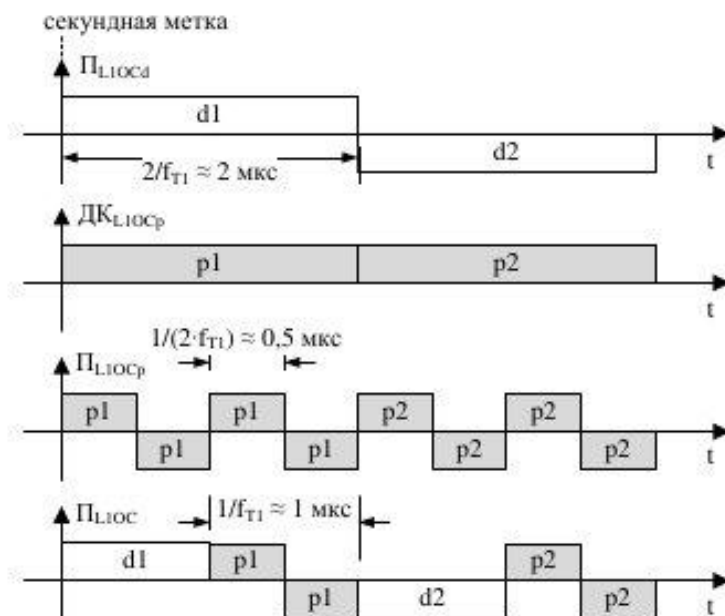


Рисунок 9 Временные соотношения, поясняющие принцип ПВУ формирователя сигнала L1OC

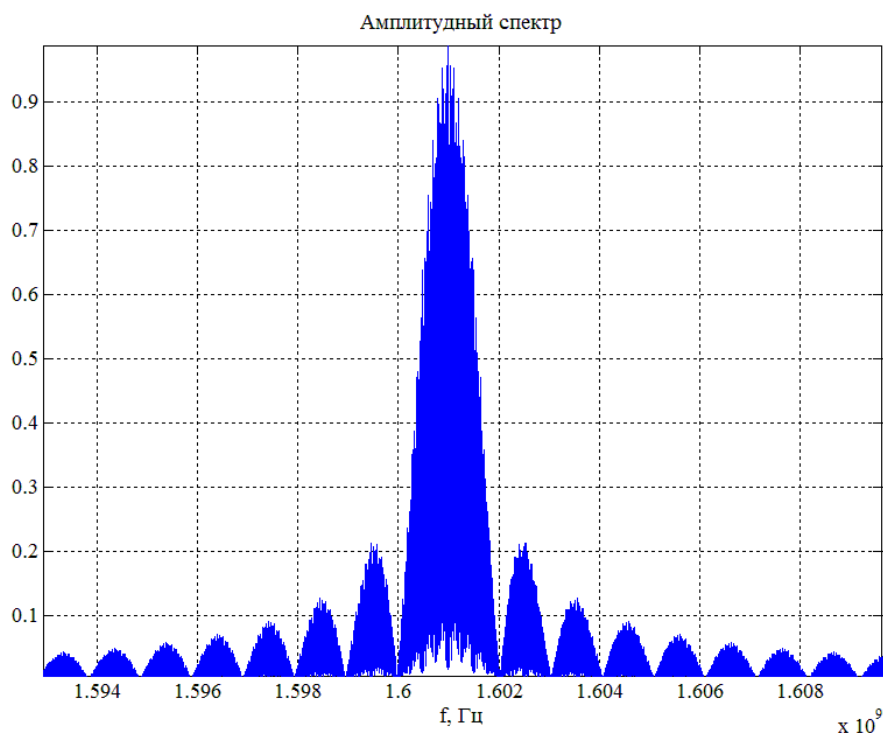


Рисунок 10 Амплитудный спектр сигнала L1OCd

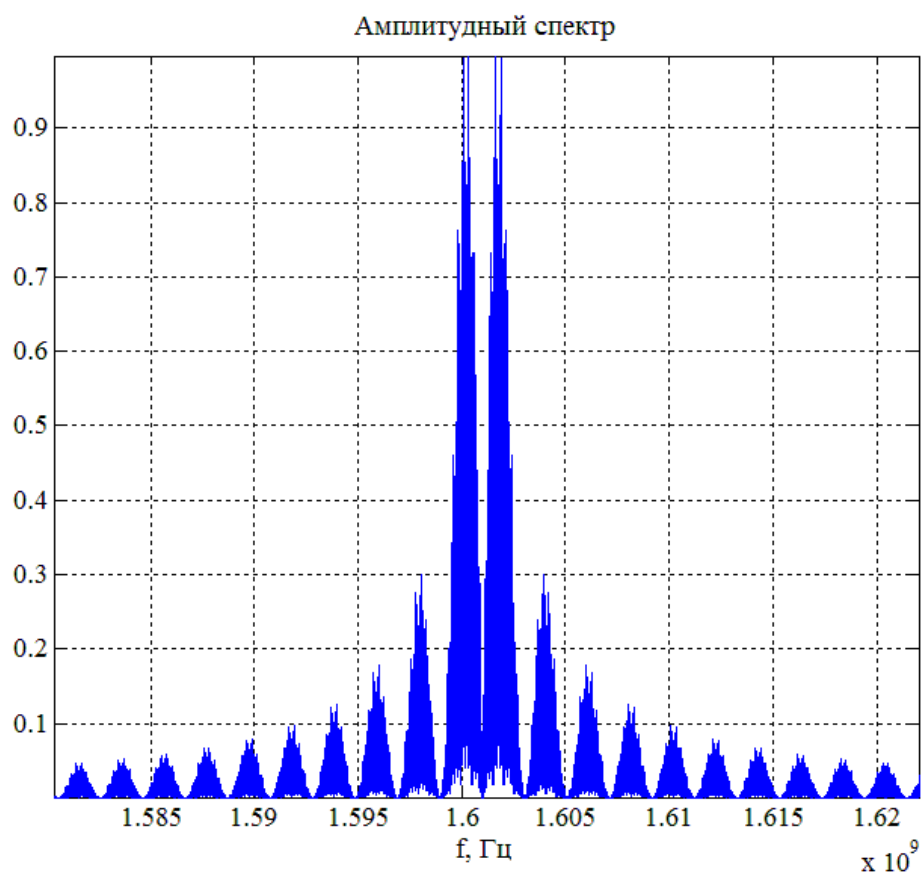


Рисунок 11 Амплитудный спектр сигнала L1OCp

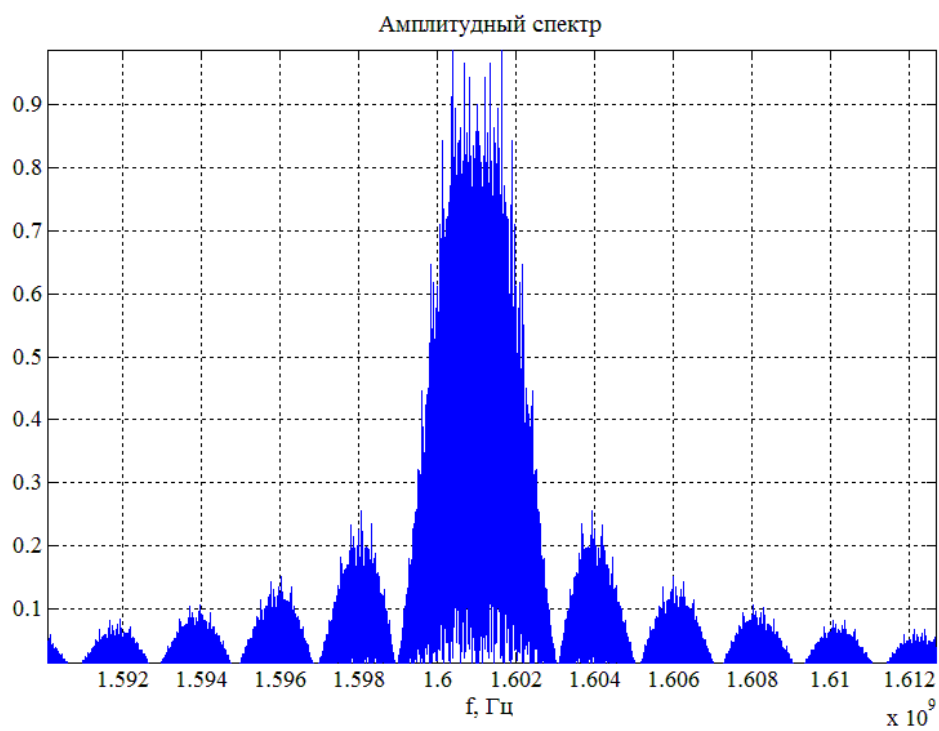


Рисунок 12 Амплитудный спектр сигнала L1OC

### 1.3 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L2 (L2OC)

Сигнал L2OC<sub>р</sub> излучается на несущей частоте  $f_{L2} = 1248,06 \text{ МГц}$  и уплотняется с сигналом L2 КСИ, предназначенным для передачи служебной информации, путем чередования чипов дальномерных кодов этих сигналов [4].

Схема формирования сигнала L2OC представлена на рисунке 13.

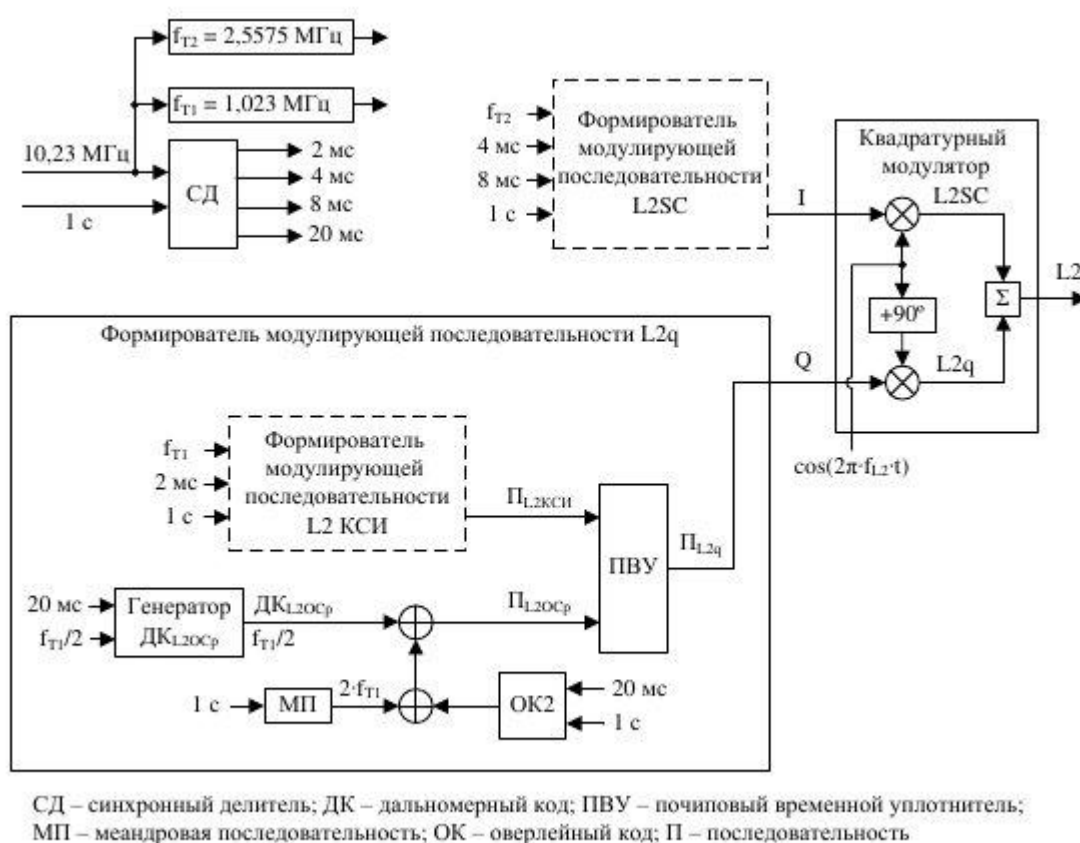


Рисунок 13 Схема формирования сигналов L2OC

Модулирующая последовательность символов  $\Pi_{L2OCp}$  сигнала L2OC<sub>р</sub> формируется путем суммирования по модулю 2 символов дальномерного кода  $ДК_{L2OCp}$  и меандровой последовательности (МП). МП представляет собой периодическую последовательность 0101, синхронизированную с символами дальномерного кода  $ДК_{L2OCp}$  и предназначена для формирования модуляции ВОС(1,1).

Дальномерные коды  $ДК_{L2OCp}$  являются усеченными последовательностями Касами, имеют длину  $N=10230$ , период  $T=20 \text{ мс}$  и



образуются суммированием по модулю 2 двоичных символов (0 и 1), поступающих от ЦА1 и ЦА2 в соответствии с рисунком 14.

Порождающие полиномы, соответствующие регистрам сдвига входящих в состав ЦА1 и ЦА2 выглядит следующим образом:

$$P1(x) = 1 + x^4 + x^8 + x^{13} + x^{14},$$

$$P2(x) = 1 + x^6 + x^7.$$

Раз в период происходит установка следующих кодов начального состояния в регистры ЦА:

- в ЦА1 – 00110100111000;
- в ЦА2 – 1000000, 1000001...1111111.

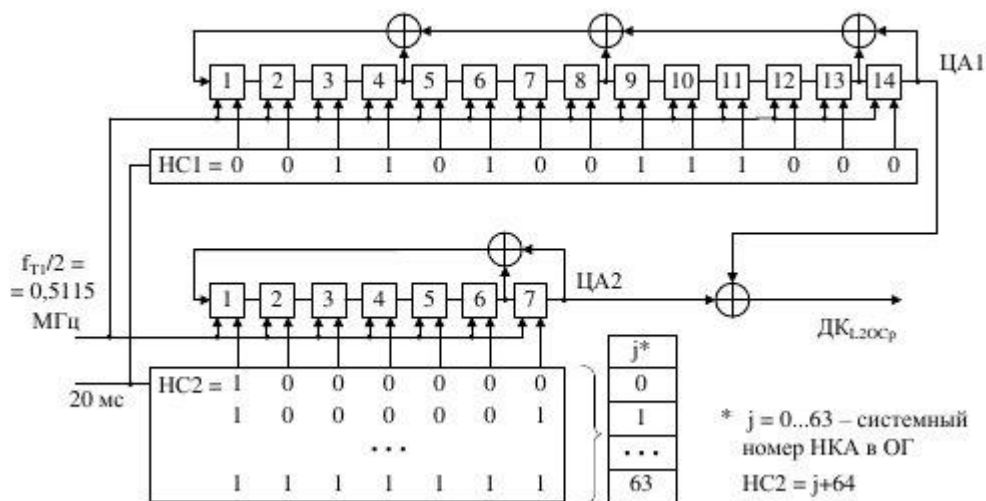


Рисунок 14 Схема формирования ДК сигнала L2OCp

Амплитудный спектр сигнала L2OCp представлен на рисунке 15. Сигнал с ВОС модуляцией потенциально имеет более высокую помехоустойчивость по отношению к узкополосной помехе и точность определения координат, то есть повышенную эффективность решения навигационных задач. Указанные достоинства связаны, прежде всего, с расширением полосы занимаемых частот и увеличением базы используемых сигналов, а также с изменением вида самого спектра сигнала. В отличие от сигналов с модуляцией ФМ-2, у которых спектр сосредоточен в области несущей частоты, сигналы с ВОС модуляцией имеют форму спектра, у которой максимумы смещены к краям занимаемого диапазона. За счет этого,

в частности, достигается более высокая точность измерения задержки сигнала.

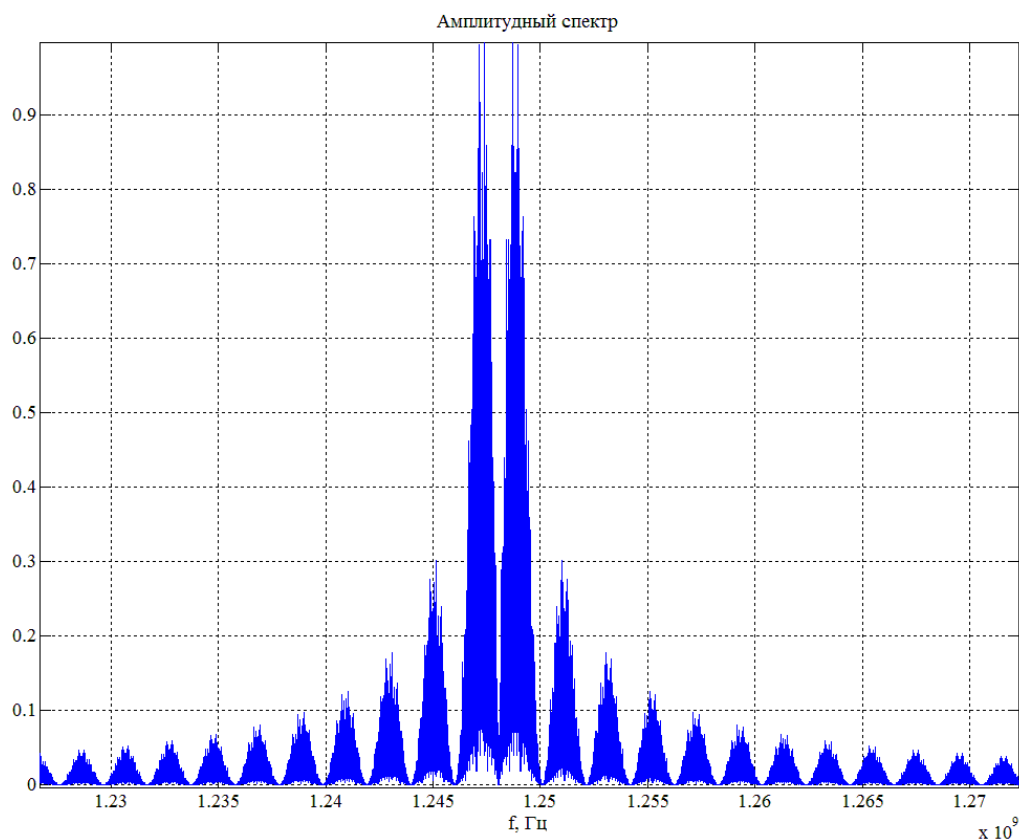


Рисунок 15 Амплитудный спектр сигнала L2OCp

#### 1.4 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L3 (L3OC)

Сигнал L3OC излучается на несущей частоте  $f_{L3} = 1202,025\text{МГц}$  и содержит информационную и пилотную компоненты, которые передаются в квадратуре в соответствии с рисунком Рисунок 16 [5]. Обе компоненты равноможны и имеют модуляцию BPSK(10).

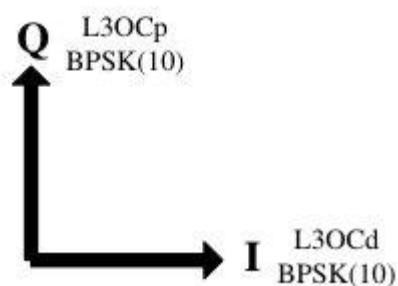


Рисунок 16 Структура сигнала L3OC

Схема формирования сигнала L3OC представлена на рисунке 17.

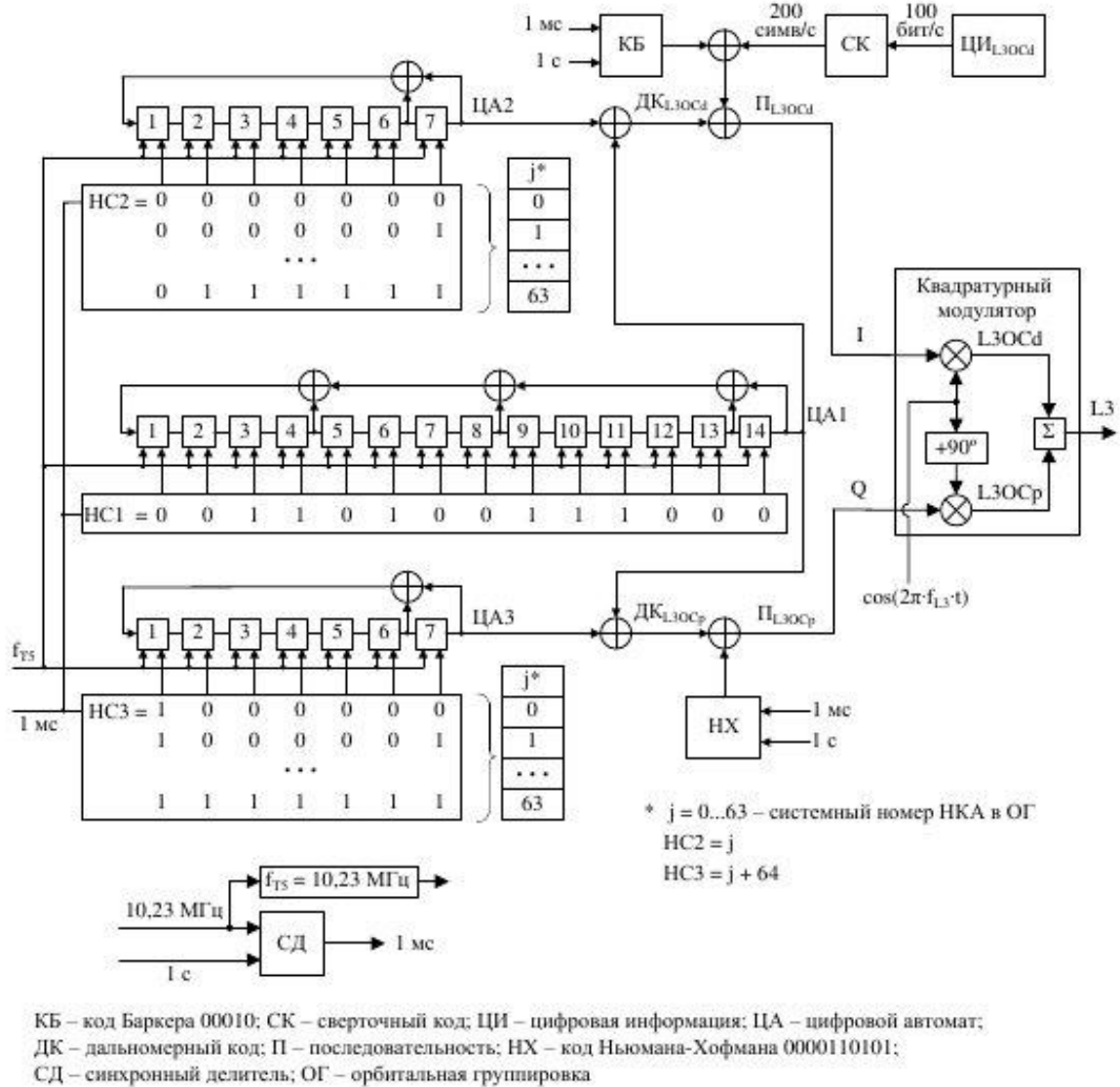


Рисунок 17 Схема формирования сигнала L3OC

Модулирующая последовательность символов  $\Pi_{L3OCd}$  сигнала L3OCd формируется путем суммирования по модулю 2 символов дальномерного кода  $ДК_{L3OCd}$  и символов кода Баркера и манипулирует по фазе компоненту I несущего колебания. Код Баркера представляет собой периодический код вида 00010.

Модулирующая последовательность символов  $\Pi_{L3OCp}$  сигнала L3OCp формируется путем суммирования по модулю 2 символов дальномерного кода  $ДК_{L3OCp}$  и символов кода Ньюмана-Хофмана и манипулирует по фазе

компоненту Q несущего колебания. Код Ньюмана-Хофмана представляет собой периодический код вида 0000110101.

Дальномерные коды  $ДК_{L3OCp}$  и  $ДК_{L3OCd}$  являются усеченными последовательностями Касами, имеют длину  $N=10230$ , период  $T=1\text{мс}$  и образуются суммированием по модулю 2 двоичных символов (0 и 1), поступающих от ЦА1, ЦА2 и ЦА3 в соответствии с рисунком 18.

Порождающие полиномы, соответствующие регистрам сдвига входящих в состав ЦА1, ЦА2 и ЦА3 выглядит следующим образом:

$$Q1(x) = 1 + x^4 + x^8 + x^{13} + x^{14},$$

$$Q2(x) = 1 + x^6 + x^7,$$

$$Q3(x) = 1 + x^6 + x^7.$$

Раз в период происходит установка следующих кодов начального состояния в регистры ЦА:

- в ЦА1 – 00110100111000;
- в ЦА2 – 0000000, 0000001...01111111;
- в ЦА3 – 1000000, 1000001...1111111.

Амплитудный спектр сигнала L3OC представлен на рисунке 18.

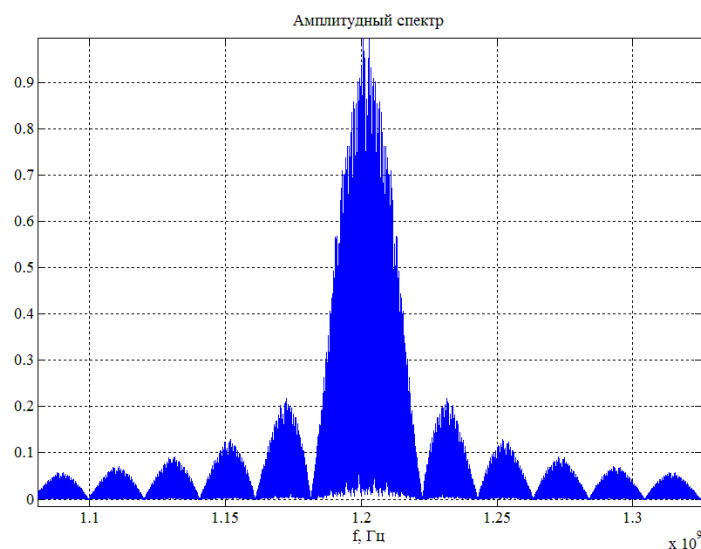


Рисунок 18 Амплитудный спектр сигнала L3OC

## **2. ОТКРЫТЫЙ СИГНАЛ GPS С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В ДИАПАЗОНЕ L1 (C/A КОД)**

История создания Global Positioning System (GPS) ведёт своё начало с 1973 года, когда Управление совместных программ, входящее в состав Центра космических и ракетных исследований США, получило указание Министерства обороны США разработать, испытать и развернуть навигационную систему космического базирования. Результатом данной работы стала система, получившая первоначальное название NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging), из которого прямо следовало, что система предназначена для решения двух главных задач – навигации, то есть определения мгновенного положения и скорости потребителей, и синхронизации шкал времени. Поскольку инициатором создания GPS являлось Министерство обороны США, то в качестве первоочередных задач предусматривалось решение задач обороны и национальной безопасности. Отсюда ещё одно раннее название системы – оборонительная система спутниковой навигации (Defense Navigation Satellite System – DNSS).

Разработка концепции построения и архитектуры GPS заняла примерно 5 лет, и уже в 1974 году фирма Rockwell получила заказ на изготовление первых восьми космических аппаратов (КА) Block I для создания демонстрационной системы. Первый КА был запущен 22 февраля 1978, и в том же году Rockwell получила контракт на создание ещё четырёх КА.

Выделяют два важных этапа развёртывания системы GPS – фазу первоначальной работоспособности (IOC) и фазу полной работоспособности (FOC). Этап IOC начался в 1993 году, когда в составе орбитальной группировки насчитывалось 24 КА различных модификаций (Block I/II/IIA), готовых к использованию по целевому назначению. Переход в режим FOC состоялся в июле 1995, после завершения всех лётных испытаний, хотя фактически система начала предоставлять услуги в полном объеме с марта 1994 года. Таким образом, GPS является полностью работоспособной уже в течение более чем двух десятилетий, при этом на протяжении всей своей

истории GPS постоянно модернизировалась с целью удовлетворения требований различных категорий как гражданских, так и военных потребителей.

При проектировании GPS предполагалось, что точность навигационных определений при использовании C/A-кода будет в пределах 400 м. Реальная точность измерений по C/A-коду оказалась в 10 и более раз выше – 15-40 м по координатам и доли метра в секунду по скорости. Возможность получения такой точности измерений с помощью несложной коммерческой АП вызвала в США опасения, что сигналы GPS могут быть использованы потенциальным противником, в том числе в системах высокоточного оружия. В качестве защитной меры, начиная с космического аппарата Block II, в GPS были реализованы два метода преднамеренной деградации (загрубления) точности навигационно-временного обеспечения гражданских потребителей – селективный доступ и одновременно принятые меры по защите от так называемых уводящих помех. Деактивация режима селективного доступа была осуществлена 2 мая 2000 г. около 4:00 (UT). Точность автономной навигации возросла почти в 10 раз, что дало гигантский импульс к развитию прикладных навигационных технологий.

Текущий третий этап модернизации GPS предполагает разработку и производство космических аппаратов следующего поколения [Block III](#), которые в сочетании с усовершенствованным наземным комплексом управления и навигационной аппаратурой потребителей обеспечат улучшенные характеристики в части помехозащищённости, точности, доступности и целостности координатно-временного и навигационного обеспечения.

Система GPS предоставляет два вида услуг:

- услугу стандартного позиционирования (Standard Positioning Service - SPS), доступную для всех потребителей,
- услугу точного позиционирования (Precise Positioning Service - PPS), доступную для санкционированных пользователей.

Таблица 2 Характеристики навигационных радиосигналов системы GPS

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Длительность кода ПСП, символы	Тактовая частота, МГц	Вид модуляции
L1	1575,42	C/A P M L1Cd L1Cp	1023 ~7 дней Нет данных 10230 10230·1800	1,023 10,23 5,115 1,023 1,023	BPSK BPSK BOC(10,5) BOC(1,1) TMBOC(6,1,1/11)
L2	1227,6	P L2C M	~7 дней M: 10230 L: 767250 Нет данных	10,23 1,023 5,115	BPSK BPSK BOC(10,5)
L5	1176,45	L5I L5Q	10230·10 10230·20	10,23 10,23	BPSK BPSK

Сигнал излучается на несущей частоте  $f_{L1} = 1575,52 \text{ МГц}$  с модуляцией BPSK и имеет период  $T=1 \text{ мс}$  [6].

Дальномерный C/A код  $G_i$  представляет собой 1023 элементный код Голда, который получается путем суммирования по модулю два двух псевдослучайных последовательностей  $G1$  и  $G2_i$ . Последовательность  $G2_i$  представляет собой задержанную на целое число чипов последовательность  $G2$ .

Псевдослучайные последовательности  $G1$  и  $G2$  генерируется регистрами сдвига с линейными обратными связями, описываемыми следующими полиномами:

$$G1(x) = 1 + x^3 + x^{10},$$

$$G2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10}.$$

Структура регистров пояснена на рисунках 19 и 20. Начальные состояния обоих регистров 1111111111.

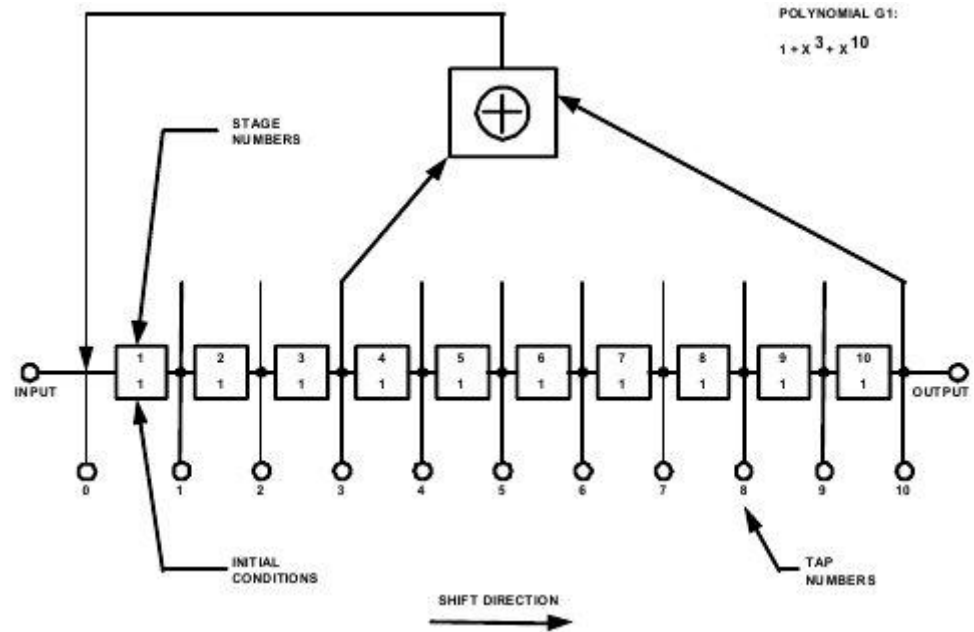


Рисунок 19 РСЛОС формирующий последовательность G1

Величина задержки, определяющая  $G2_i$  и соответственно номер сигнала, табулирована и находится в интерфейсном контрольном документе GPS [6].

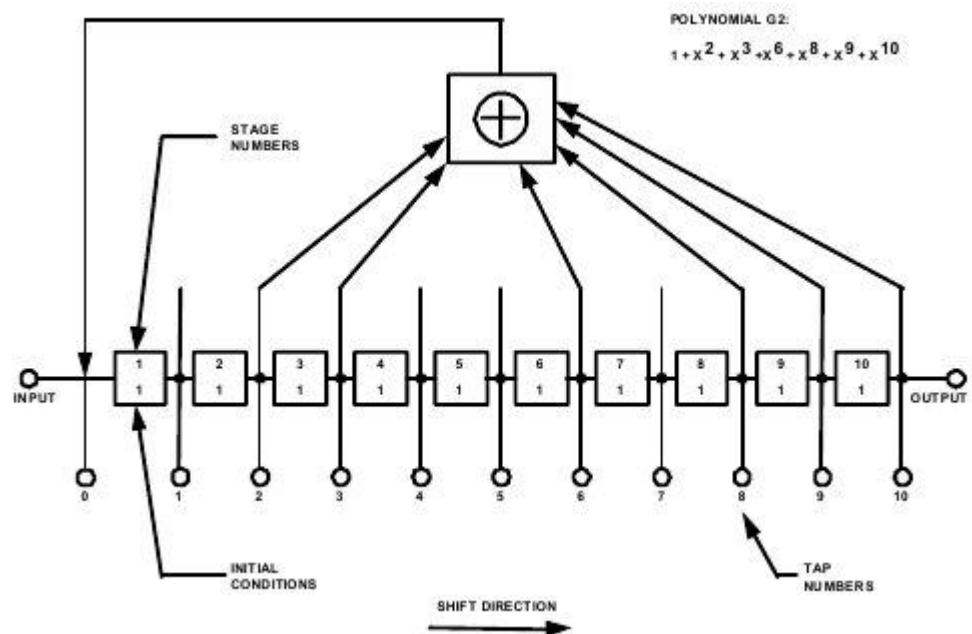


Рисунок 20 РСЛОС формирующий последовательность G2



Огибающая амплитудного спектра сигнала С/А в диапазоне L1 представлен на рисунке 21.

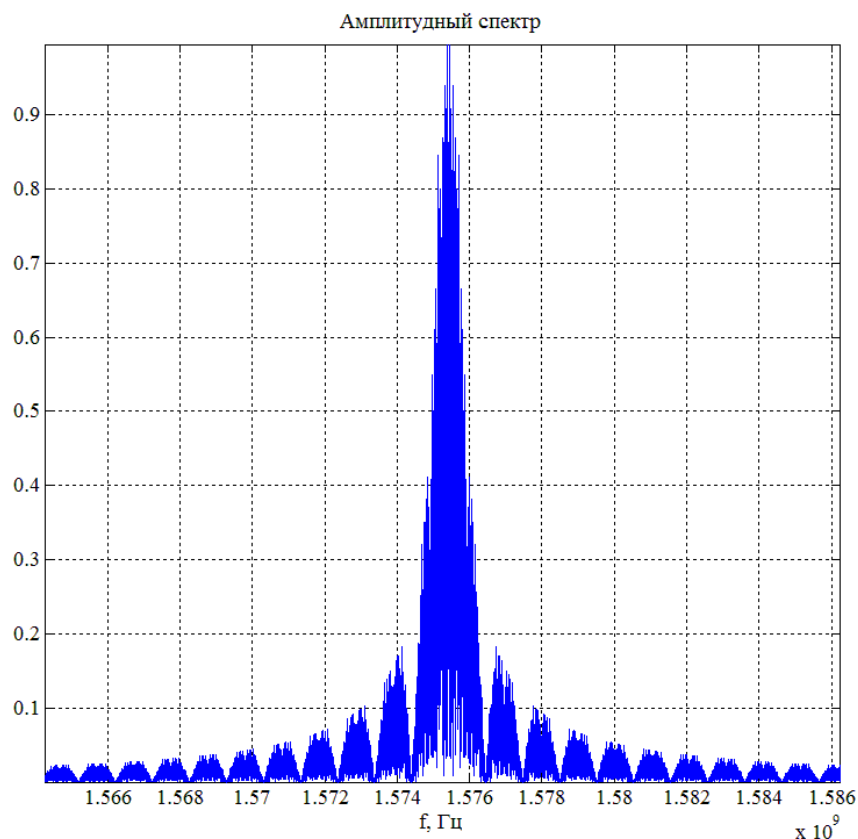


Рисунок 21 Амплитудный спектр С/А сигнала в диапазоне L1

Коды Голда, использующиеся в качестве дальномерного кода в С/А сигнале обладают низким уровнем взаимной корреляции. Графики автокорреляционной и взаимной корреляционной функций приведены на рисунке 19.

Периодическая взаимная корреляционная функция кодов Голда имеет не более трех уровней. Коды Голда формируются из двух различных М-последовательностей одинаковой длины. В ансамбль добавляются как оригинальные копии М-последовательностей, так и побитовое сложение их по модулю 2, с дальнейшим циклическим сдвигом одной из последовательностей.

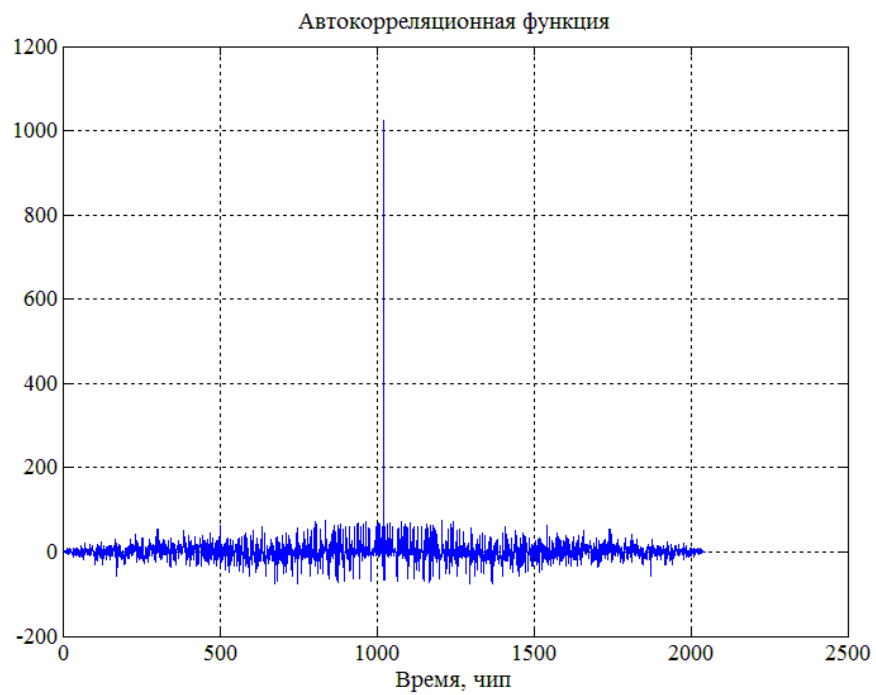


Рисунок 22 График автокорреляционной функции С/А кода

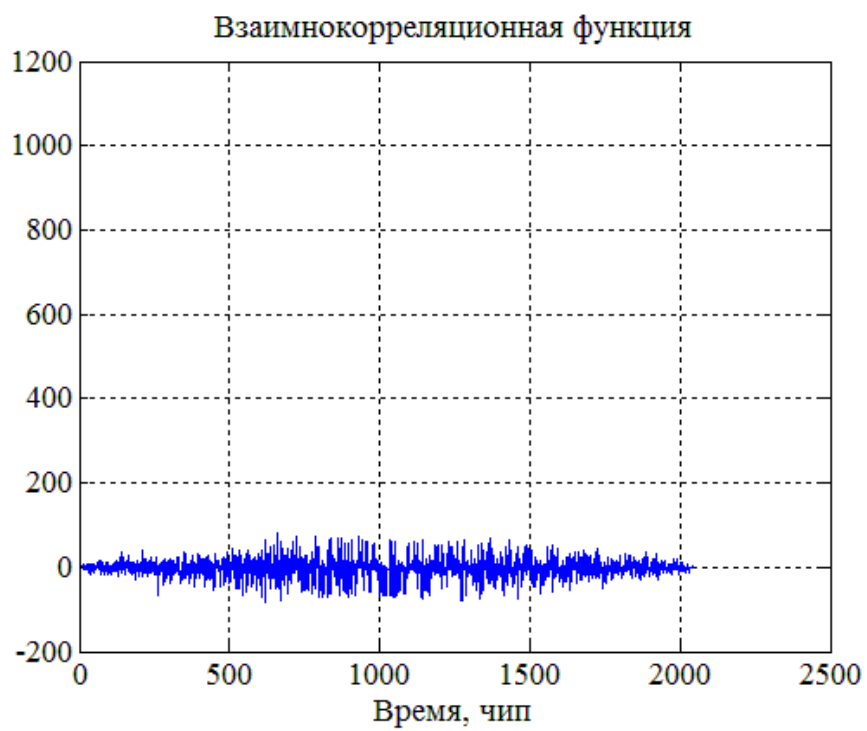


Рисунок 23 График взаимной корреляционной функции С/А кода

### **3. СИГНАЛ E1 СИСТЕМЫ GALILEO С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В ДИАПАЗОНЕ L1**

В 1994 году по требованиям Европейского совета была утверждена программа по созданию европейской ГНСС. Система начала развиваться в двух направлениях: создание систем функциональных дополнений GPS и ГЛОНАСС и создание собственной ГНСС, предназначенной для гражданского применения.

Первые экспериментальные спутники были запущены на орбиту в 2005 году. Основная задача состояла в оценке точностных характеристик навигационных радиосигналов Galileo во всех частотных диапазонах и тестировании навигационной нагрузки. Спутники создавались в расчёте на 2 года активного использования, которое и было успешно завершено.

Первое мини-созвездие Galileo было создано запусками на орбиты четырёх спутников Galileo IOV в 2011 году. Запуски состоялись в рамках программы «Союз на Куру». В декабре 2011 года Galileo передала на Землю первый навигационный сигнал L – диапазона. Принятый сигнал соответствовал всем спецификациям, а также был совместим с американской системой GPS.

В 2016 году система Galileo официально введена в эксплуатацию Европейской комиссией и стала доступной пользователям в режиме «начальной эксплуатационной производительности». На начальном этапе для обеспечения круглосуточного глобального покрытия будет производиться компенсация данных спутников системы GPS.

В середине февраля 2017 года появилась информация о недостаточной защищенности сигналов Galileo от хакерских атак. Для решения этой проблемы на спутниках будет установлена система подлинности электронных подписей. В составе навигационной аппаратуры пользователей также должна входить подобная система. Galileo, в отличие от GPS и ГЛОНАСС, не контролируется военными ведомствами, однако в 2008 году парламент ЕС принял резолюцию, согласно которой допускается

использование системы для проведения военных операций в рамках европейской политики безопасности.

Полностью развёрнутая орбитальная группировка Galileo обеспечит работу трёх режимов навигационного обслуживания и предоставит следующие виды навигационных услуг:

- открытая услуга – открытые сигналы, доступные всем видам потребителей;
- коммерческая услуга – зашифрованный сигнал, доступ к двум дополнительным сигналам, более высокая скорость передачи данных, глобальная высокоточная навигация;
- услуга с регулируемым государством доступом – для координатно-временного обеспечения специальных пользователей (два сигнала с зашифрованными дальномерными кодами).

Таблица 3 Характеристики навигационных радиосигналов системы Galileo

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Длительность кода, символы	Тактовая частота, МГц	Вид модуляции
E1	1575,42	E1-B E1-C	4092 4092	1,023 40,92	СВОС
E5	1191,79	E5a-I E5a-Q E5b-I E5b-Q	10230/20 10230/100 10230/4 10230/100	10,23 10,23 10,23 10,23	AltBOC(15,10)

В последнее время всё больше производителей систем спутниковой навигации реализуют в своём оборудовании возможность принимать и обрабатывать сигналы со спутников Galileo, этому способствует достигнутая договорённость о совместимости и взаимодополнении с системой GPS третьего поколения. Частотный план системы Galileo проиллюстрирован на рисунке 24.

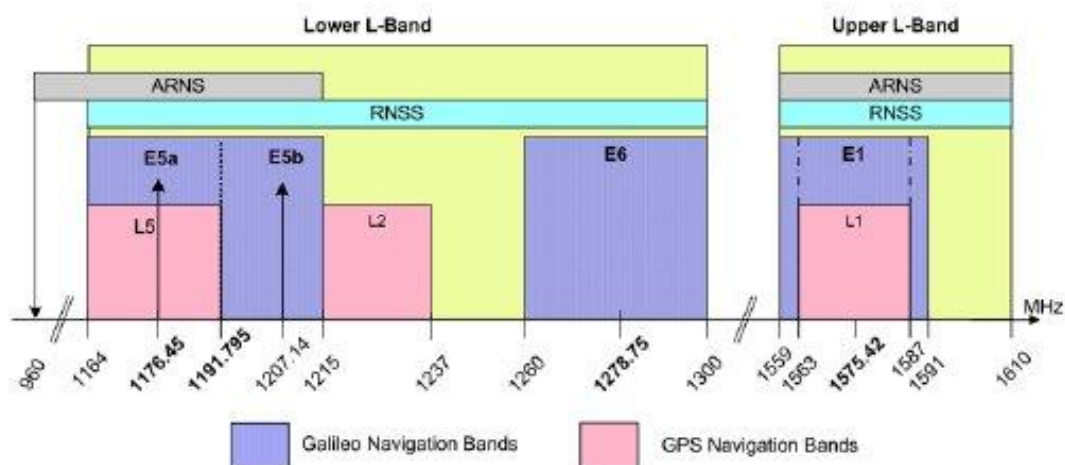


Рисунок 24 Частотный план системы Galileo

Сигнал E1 излучается на несущей частоте  $f_{E1} = 1575,42\text{МГц}$  и содержит информационную (E1-B) и пилотную (E1-C) компоненты с СВОС модуляцией (модуляция с составной двоичной смещенной несущей) [7]. Модуляция осуществляется согласно схеме, изображенной на рисунке 25.

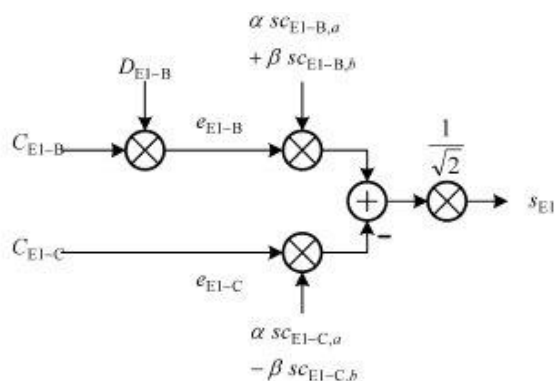


Рисунок 25 Схема модуляции сигнала E1

Обозначения, использующиеся в схеме, пояснены в таблице 4

Таблица 4 Параметры СВОС

Параметр	Расшифровка
$C_{E1-X}$	Бинарный (NRZ модулированный) дальномерный код
$D_{E1-B}$	Бинарное (NRZ модулированное) навигационное сообщение
$sc_{E1-X,Y}$	Бинарная (NRZ модулированная) поднесущая
$\alpha, \beta$	Параметры, определяющие мощность поднесущих

В сигнале E1-B навигационное сообщение  $D_{E1-B}$  передается со скоростью 250 бит/с и объединяется с дальномерным кодом  $C_{E1-B}$  длины 4092 бит, передаваемым со скоростью 1,023 Мбит/с. Дальномерный код  $C_{E1-C}$  пилот-сигнала E1-C объединяется с дополнительным кодом, который представляет собой фиксированную 25-битовую последовательность, одинаковую для всех НКА и передаваемую со скоростью 250 бит/с. Результирующий сигнал формируется посредством объединения составляющей ВОС(1) – прямоугольного импульсного сигнала 1,023 МГц, с составляющей ВОС(6) – прямоугольным импульсным сигналом 6,138 МГц. Их уровни масштабируются так, чтобы на составляющую ВОС(1) приходилось 10/11, а составляющую ВОС(6) – 1/11 мощности.

Дальномерный код сигнала E1 представляет собой многоуровневую кодовую конструкцию (tiered ranging code), в которой вторичный код (secondary code) используется для манипуляции первичного кода (primary code) так, как показано на рисунке 26.

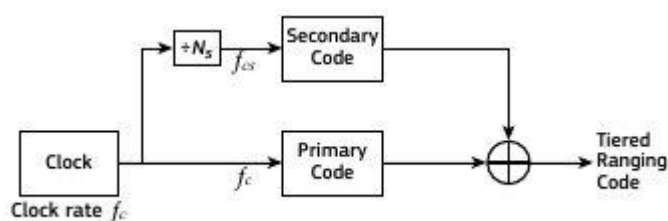


Рисунок 26 Схема генерации дальномерного кода сигнала E1

Первичный код сигнала Е1 формируется на базе двух М-последовательностей согласно рисунку 27.

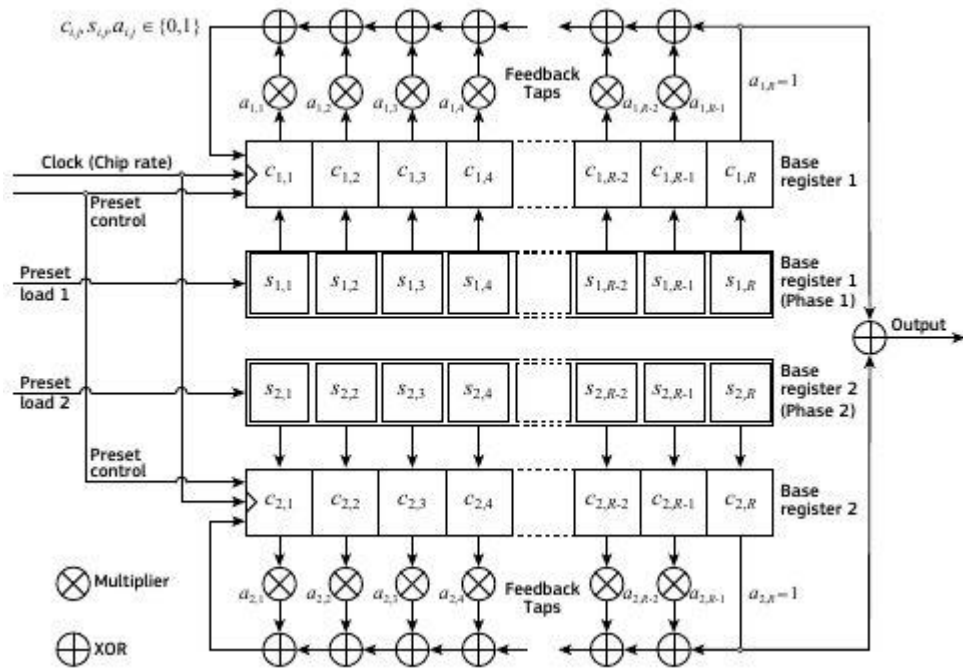


Рисунок 27 Схема формирования первичного кода сигнала Е1

Выходная последовательность формируется путем суммирования по модулю два М-последовательностей, генерируемых регистрами сдвига с одинаковыми начальными состояниями. Каждый регистр сдвига имеет длину  $R$ , номера отводов обратной связи  $[a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,R}]$  и вектор начального состояния  $[c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,R}]$ . Для усеечения первичного кода длины  $N$ , раз в период происходит ре-инициализация содержимого регистров сдвига стартовыми значениями  $[s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,R}]$ .

Огибающая амплитудного спектра сигнала Е1 с параметрами поднесущих  $\alpha = \sqrt{\frac{10}{11}}, \beta = \sqrt{\frac{1}{11}}$  представлен на рисунке 28.

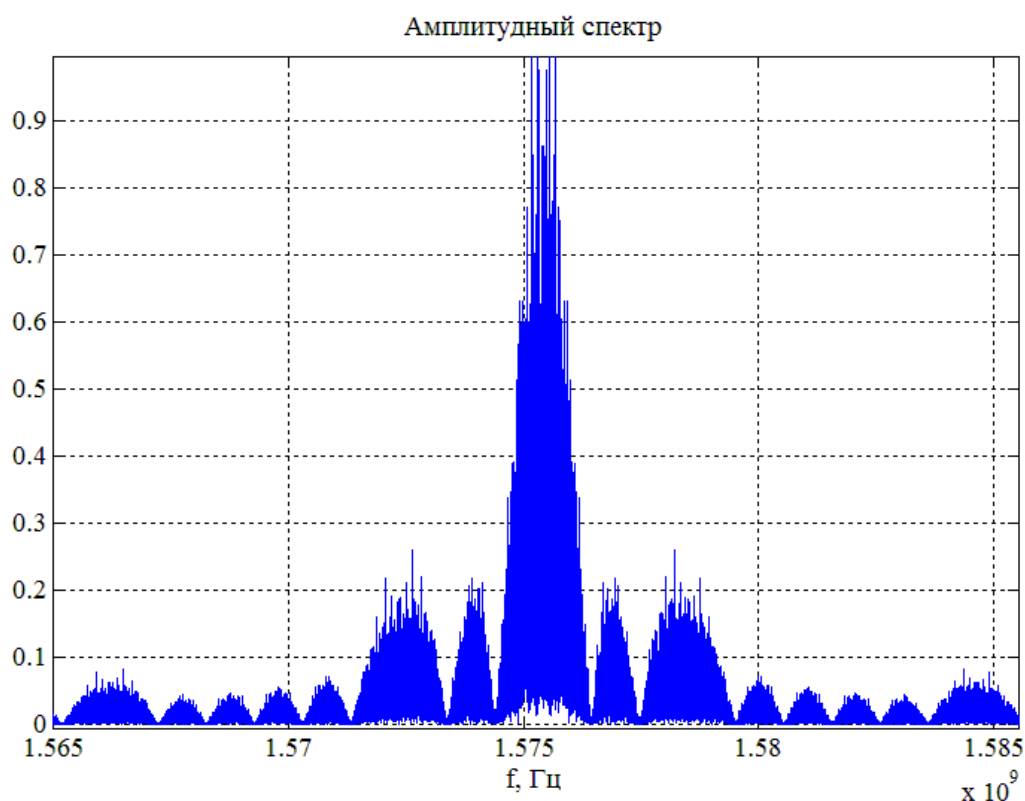


Рисунок 28 Амплитудный спектр сигнала E1

Сигнал открытого доступа E1 системы Galileo, состоящий из каналов управления E1-C и передачи данных E1-B, модулируется с использованием CBOC модуляции (модуляция с составной двоичной смещенной несущей). Модулированный сигнал передается на той же частоте, что и сигнал GPS в диапазоне L1. Но GPS использует модуляцию BPSK, поэтому форма спектра соответствует графику функции sinc с главным лепестком на центральной частоте.

Как видно на рисунке 25, модуляция CBOC приводит к расширению спектра и получению двух боковых составляющих с нулевой энергией на центральной частоте, что позволяет минимизировать помехи для системы GPS.

В сигнале с CBOC узкополосный сигнал с модуляцией BOC(1,1) суммируется с широкополосным сигналом BOC(6,1), чтобы минимизировать влияние многолучевого распространения.

На рисунках 26 и 27 приведены графики автокорреляционной функции и взаимной корреляционной функции дальномерного кода сигнала E1-B



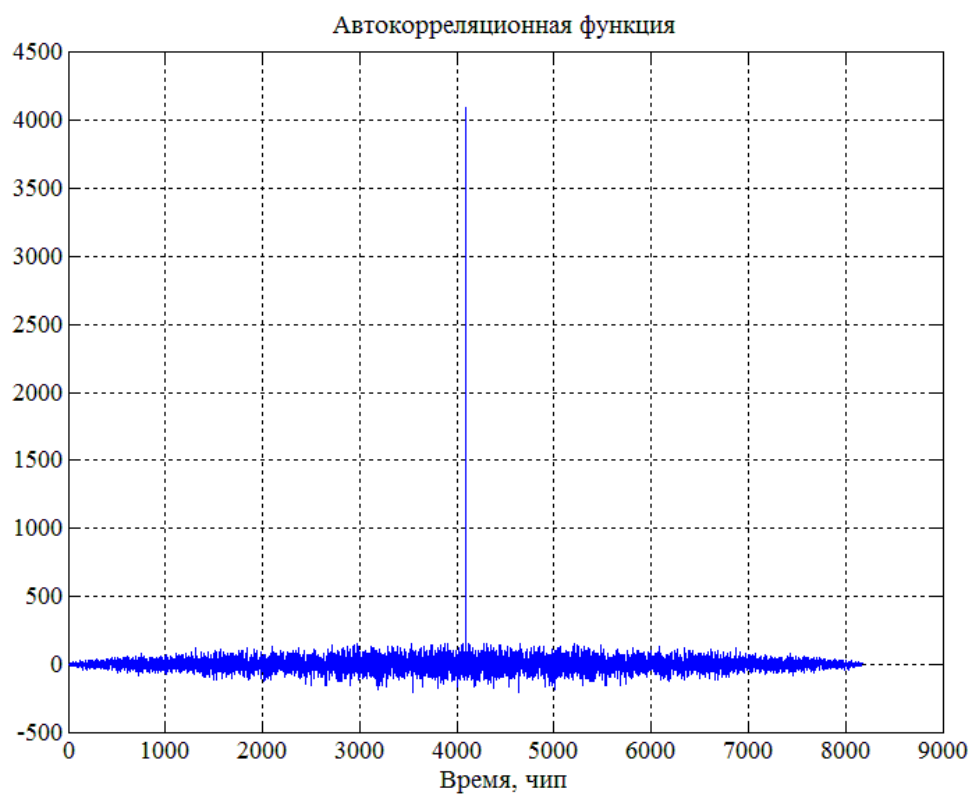


Рисунок 29 График автокорреляционной функции ДК сигнала Е1-В

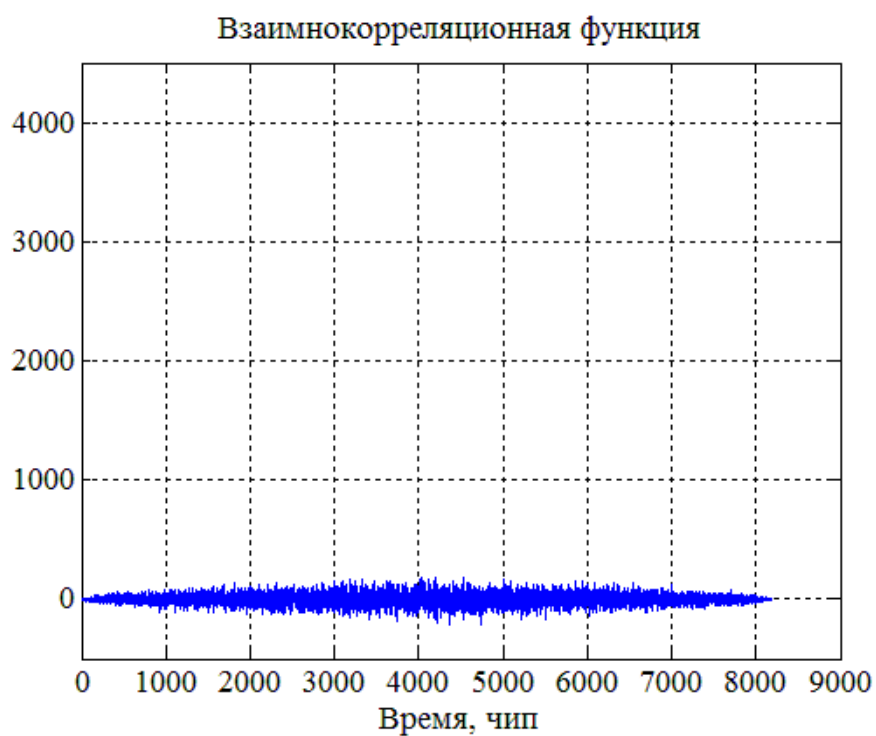


Рисунок 30 График взаимокорреляционной функции ДК сигнала Е1-В

#### **4. СИГНАЛЫ B1I, B2I СИСТЕМЫ BEIDOU С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ**

История китайской навигационной системы Beidou берет свое начало в 1994 году. В 2000 году было запущено два геостационарных спутника Beidou-1A и Beidou-1B. Аппараты системы Beidou-1 построены на базе связной геостационарной платформы DFH-3 и в декабре 2003 года Beidou первого поколения была сдана в эксплуатацию. Позднее запущенный геостационарный спутник Beidou-1C позволил улучшить эксплуатационные характеристики системы.

Развитие системы Beidou второго поколения началось в 2004 году, а к концу 2012 года было запущено 5 геостационарных спутников, 5 спутников на наклонной геосинхронной орбите и 4 спутника на средних орбитах. Система второго поколения была разработана по принципу совместимости с первой, что позволило ей обеспечивать пользователей в странах Азиатско-тихоокеанского региона услугами определения местоположения, скорости, времени, широкодиапазонных дифференциальных поправок и отправки коротких сообщений.

Создание системы третьего поколения, начатое в 2009 году, должно завершиться к 2018 году. Beidou 3 должна обеспечивать основные услуги пользователям, находящимся на территории и акватории Шелковых путей, а также соседних регионов. Глобально система должна заработать к 2020 году. Главным конструктором систем является Сунь Цзядун, закончивший Академию имени Жуковского в 1958 году.

После запуска в 2015 году космических аппаратов нового поколения руководство программой сообщило об изменении структуры навигационного сигнала B1: смещение центральной частоты (стало как у гражданских сигналов GPS L1 и Galileo E1) и изменение модуляции QPSK на BOC. Это направлено на обеспечение взаимодополняемости системы Beidou с ГНСС Galileo и GPS.

Таблица 5 Характеристики навигационных радиосигналов системы Beidou

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Длительность кода, символы	Тактовая частота, МГц	Вид модуляции
B1	1575,42	B1-CD B1-CP B1D B1P	2046	1,023 1,023 2,046	BPSK BPSK BOC(14,2)
B2	1191,79	B2aD B2aP	2046	10,23 10,23	AltBOC(15,10) AltBOC(15,10)
B3	1268,52	B3		10,23	QPSK(10)

Сигналы B1I, B2I излучаются на несущей частоте  $f_{B1} = 1561,098$  МГц и  $f_{B2} = 1207,14$  МГц с квадратурной фазовой модуляцией (QPSK) [8].

Дальномерные коды  $C_{B1I}$  и  $C_{B2I}$  представляют собой укороченные на один чип коды Голда длины  $N = 2046$ . Код Голда формируется путём сложения по модулю два последовательностей G1 и G2, сгенерированных регистрами сдвига так, как показано на рисунке 31.

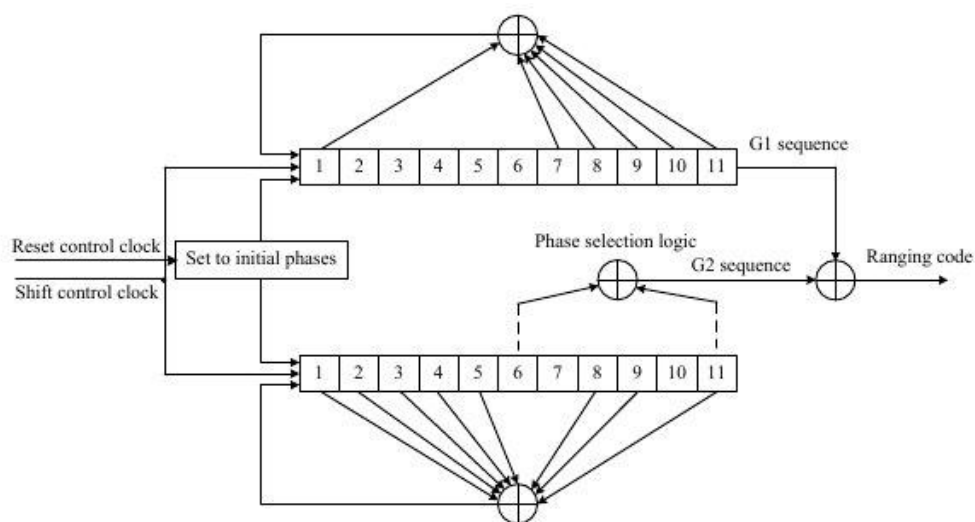


Рисунок 31 Схема генерации дальномерного кода сигнала B1I

Порождающие полиномы, соответствующие регистрам сдвига G1 и G2:

$$G1(x) = 1 + x + x^7 + x^8 + x^9 + x^{10} + x^{11}$$

$$G2(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^8 + x^9 + x^{11}$$

Начальные состояния регистров сдвига идентичны (01010101010). Различные последовательности G2 получаются посредством переключения отводов регистра, с которых снимаются выходные биты. Для каждого

сигнала номера отводов табулированы и содержатся в интерфейсном контрольном документе системы Beidou.

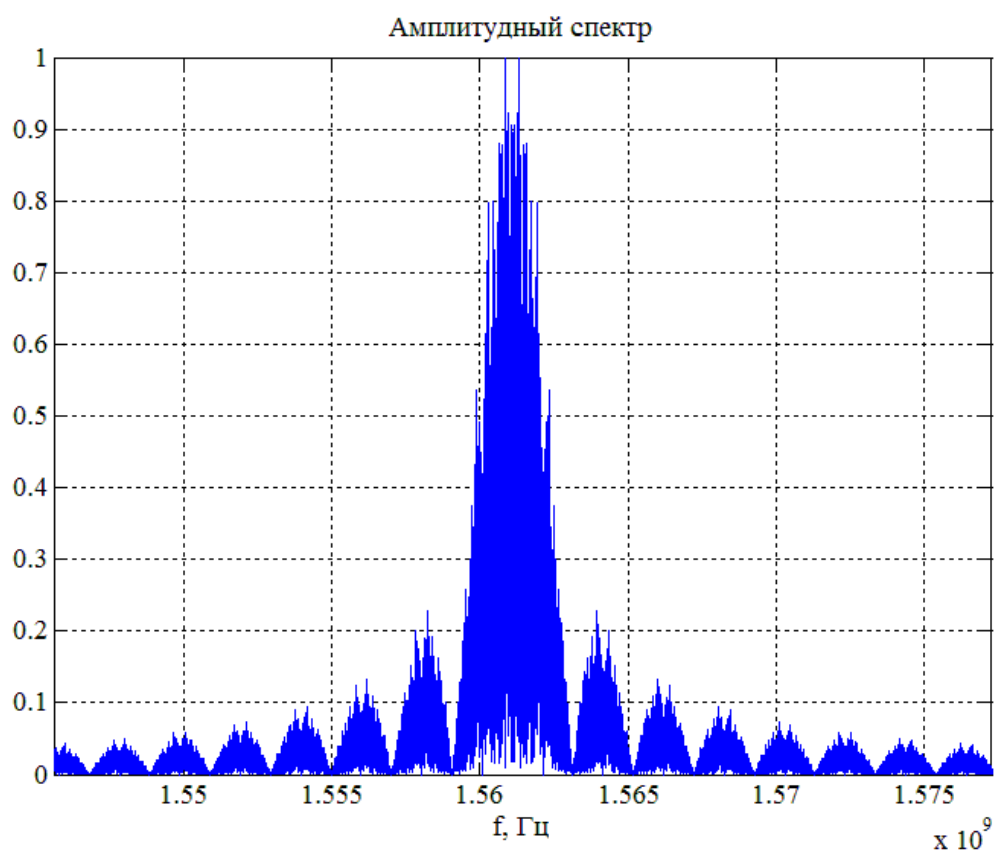


Рисунок 32 Амплитудный спектр сигнала B1I

## 5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБРАБОТКЕ НАВИГАЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В аппаратуре спутниковой радионавигационной системы (СРНС) используется псевдодальномерный метод определения координат потребителя. Этот метод заключается в измерении псевдо задержек  $\tau_i$  радиосигнала при его распространении от  $i$ -го навигационного спутника до потребителя [9].



Рисунок 33 Временная диаграмма излучения и приема навигационного сигнала

Ввиду большого разноса передающей и приемной стороны, момент излучения сигнала и его прием не может выполняться в единой шкале времени, как это полагается при дальномерном методе (рисунок Рисунок 33). Таким образом, псевдо задержка представляет собой задержку радиосигнала, измеренную с учетом бортовой шкалы времени  $t^{\text{БШВ}}$  и шкалы времени потребителя  $t^{\text{ШВП}}$ . Вычисленная подобным образом величина  $D = c\tau$ , где  $c$  – скорость света, не является дальностью, то есть расстоянием между двумя точками в пространстве, поэтому для неё принят термин псевдо дальность.

В приемнике сигналов СРНС реализована двухэтапная обработка радиосигнала, функциональная схема которой представлена на рисунке 34.

На первом этапе измеряют псевдо задержки, псевдо доплеровское смещение частот принятых сигналов и извлекается навигационная информация о характеристиках движения всех навигационных спутников.



Рисунок 34 Функциональная схема приемника с двухэтапной обработкой сигналов

На втором этапе вычисляют координаты и компоненты вектора скорости потребителя.

Величины псевдо задержек  $\tau_i$  изменяются во времени вследствие движения потребителя и навигационного спутника, поэтому для формирования оценок интересующих параметров используют теорию оптимальной фильтрации.

Суть теории оптимальной фильтрации состоит в оценке апостериорной плотности вероятности наблюдаемого процесса при заданном априорном описании динамики процесса. В случае гауссовского приближения апостериорной плотности вероятности квазиоптимальная оценка процесса  $\check{\lambda}_j$  формируется следящей системой, схема которой изображена на рисунке .

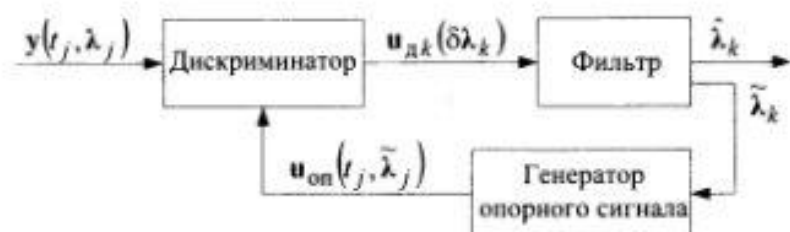


Рисунок 35 Обобщенная схема следящей системы

Дискриминатор – это устройство, сигнал на выходе которого пропорционален разнице между значениями оцениваемого параметра  $\lambda$  и сигнала опорного генератора. Основной характеристикой дискриминатора является дискриминационная характеристика (ДХ), которая в значительной степени определяет свойства следящей системы в целом.

Дискриминационная характеристика представляет собой зависимость среднего значения сигнала ошибки на выходе дискриминатора от ошибки слежения.

Нормированная дискриминационная характеристика оптимального дискриминатора задержки огибающей (ДЗО) при большом отношении сигнал/шум [9] описывается следующим выражением [8]:

$$U(\varepsilon_\tau) = \rho(\varepsilon | \tau - \Delta\tau/2) - \rho(\varepsilon | \tau + \Delta\tau/2), \quad (1)$$

где  $\rho$  – взаимная корреляционная функция между огибающей реплики и принятого сигнала.

Компоненты  $\rho(\varepsilon | \tau \mp \Delta\tau/2)$  соответствуют опережающему (early) и запаздывающему (late) дальномерному коду реплики, сформированной на приемной стороне. Величина задержки реплики в чипах называется апертурой дискриминатора -  $\Delta$ . График нормированной дискриминационной характеристики при  $\Delta=0,25$  изображен на рисунке 36.

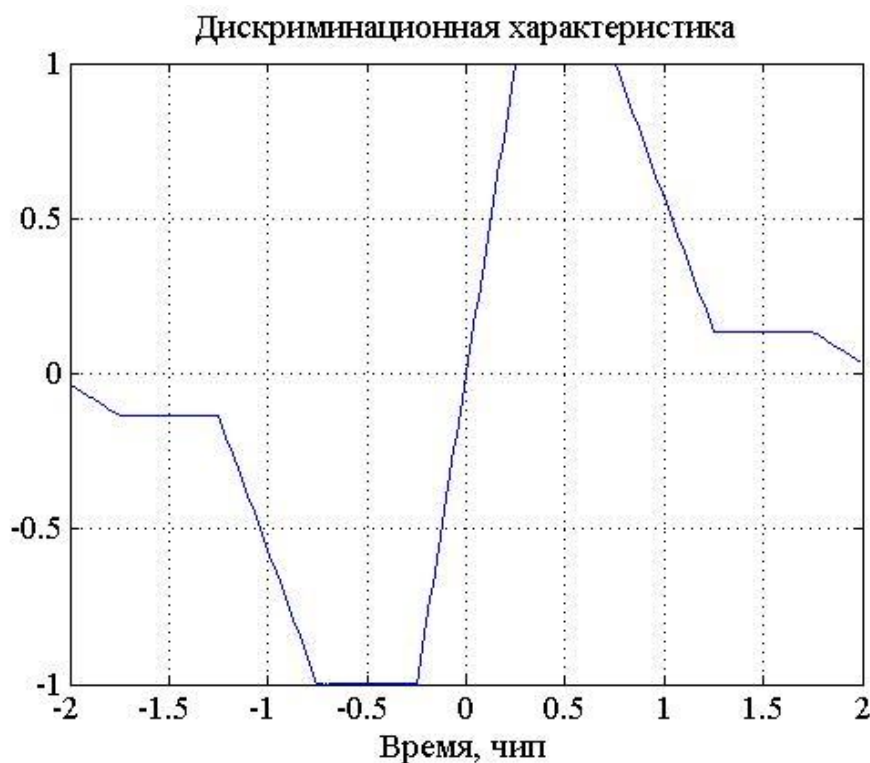


Рисунок 36 График нормированной ДХ при  $\Delta=0,25$

## 6. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для сигналов ГНСС необходимо определить условия возникновения и величину искажения псевдодальности по дальномерному коду (ДК) за счет взаимного влияния сигналов ГНСС одного радиочастотного диапазона друг на друга.

При обработке сигналы ГНСС друг для друга являются имитационной помехой множественного доступа.

Необходимо построить идеальную модель обработки и определить условия возникновения (или практического отсутствия) взаимных помех различных сигналов при требованиях по допустимой величине квазисистематической погрешности порядка 0,1 нс.

Рассматриваемые сигналы:

### 1. ГНСС ГЛОНАСС:

- 1) сигналы СТ с частотным разделением в диапазонах L1 и L2 — L1OF, L2OF; L1SF, L2SF;
- 2) открытые сигналы с кодовым разделением с модуляцией BPSK и BOC L1OC, L2OC, L3OC.

### 2. ГНСС GPS: L1\_C/A

### 3. ГНСС Galileo: L1\_E1

### 4. ГНСС Beidou: L1\_B1I, L3\_B2I.

Для рассматриваемых сигналов определить влияние на величину погрешностей следующих параметров:

1. Апертура разностного дискриминатора (1 ... 0,05 символа ДК)
2. Обрабатываемая ширина спектра обрабатываемого сигнала
3. Сдвиг по задержке
4. Сдвиг по несущей частоте (линейный и доплеровский)
5. Соотношение ЭП обрабатываемого и мешающего сигналов



На основе выполненной работы:

1. Представить рекомендации по процедуре калибровки модулей с допустимой погрешностью.
2. Представить рекомендации по обнаружению и предотвращению неприемлемых по величине исследованных погрешностей при штатной эксплуатации МПВ.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ ведется в частотной и временной области с использованием амплитудно-частотного и фазо-частотного спектров принимаемого и эталонного разностного сигналов с целью оценки смещения нуля ДХ. При этом предполагается, что тракт не вносит искажений, а интервал корреляции бесконечный. Последовательность действий вычисления нуля ДХ:

1. Вычисляется последовательность символов дальномерного кода с количеством точек на символ  $N_{\text{samp}}=100$ .
2. Вычисляется спектр видеосигнала с количеством боковых лепестков  $N_{\text{sl}}=17$ .
3. Формируется спектр радиосигнала вокруг каждой несущей частоты (амплитудный спектр – симметричное отображение относительно заданной частоты с сохранением модуля и знака; фазовый спектр – симметричное отображение фазы с сохранением модуля и со сменой знака).
4. Для заданного сигнала формируется спектр раннего сигнала с заданным опережением по фазе дальномерного кода (доли символа).
5. Для заданного сигнала формируется спектр позднего сигнала с заданным запаздыванием по фазе дальномерного кода (доли символа).
6. На каждой литерной частоте формируется спектр разностного сигнала с заданной апертурой.
7. Обратным преобразованием Фурье выполняется восстановление во временной области входного сигнала и разностного эталонного.
8. Осуществляется корреляция во временной области между входным сигналом и разностным эталонным.
9. Фиксируется величина смещения нуля дискриминационной характеристики.

## **7.1 Сигналы с частотным разделением**

Несмотря на то, что в настоящее время в системах множественного доступа доминирует идеология кодового разделения сигналов, тем не менее, сигналы ГЛОНАСС с частотным разделением находят применение и по сей день. Высокая степень различимости, устойчивость к узкополосным помехам - те достоинства, которые обращают на себя внимание исследователей в сфере систем множественного доступа.

### **7.1.1 Сигналы ГНСС ГЛОНАСС стандартной точности с частотным разделением**

Считается, что при частотном разнесении сигналов ГЛОНАСС, когда сигналы излучаются каждый на своей литерной частоте, эти сигналы ортогональны и не влияют друг на друга. Однако, при выборе методики проведения калибровки с допустимой погрешностью порядка 0,1 нс, были заданы условия, когда сигналы стандартной точности (с периодом повторения дальномерного кода 1 мс и с длительностью символа дальномерного кода 1/511 мс) с частотным разнесением синхронно излучаются из одной точки пространства (все спутники расположены в одном месте), что приводит к одинаковому доплеровскому сдвигу частот для всех сигналов. В этом случае оказывается, что у сигналов кратных литер (кратными друг другу будем называть четные, либо нечетные литеры) спектральные составляющие с разносом 1 кГц накладываются друг на друга. В ходе экспериментов было доказано, что есть межлитерное взаимодействие, приводящее к ошибкам, в данном случае, ошибкам калибровки, которые затем создают ошибки в навигационно-временных определениях. По этой причине калибровка проводилась по парам литер «четная+нечетная» (7 пар), что занимало более двух часов на калибровку одного модуля. Возникает вопрос о теоретическом обосновании описанного выше взаимодействия и способах его избежать, в частности, при проведении калибровке модулей, принимающих сигналы ГЛОНАСС, чтобы можно было ускорить данный процесс.

На рисунке 37 представлены амплитудные спектры сигналов (-7) и (-5) литер в диапазоне L1. Как видно из рисунка, на котором изображён спектр суммы этих сигналов, спектральные составляющие сигналов кратных литер накладываются друг на друга, что приводит к искажению формы спектра.

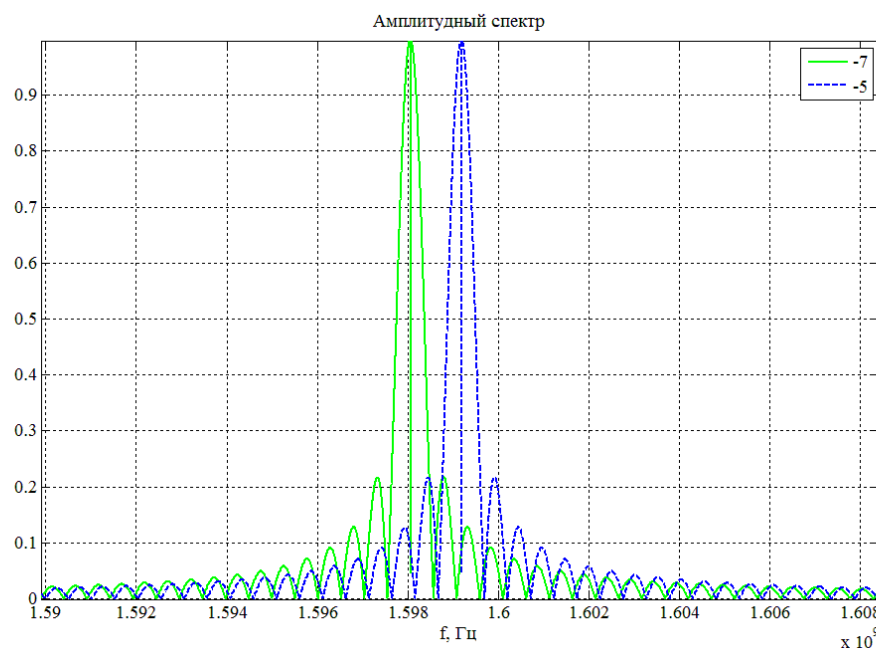


Рисунок 37 Амплитудные спектры сигналов СТ (-7) и (-5) литер

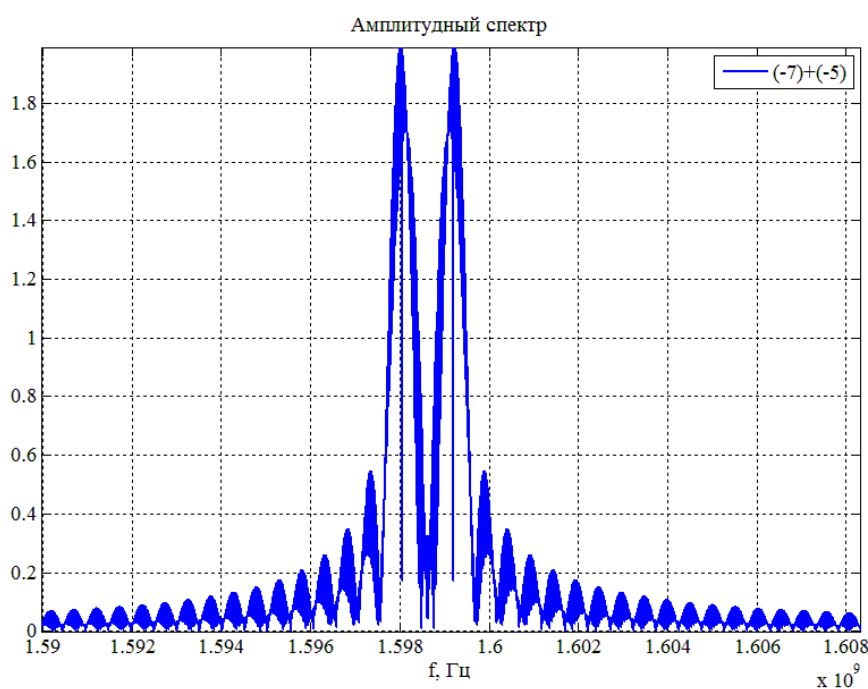


Рисунок 38 Амплитудный спектр суммарного сигнала при излучении сигналов СТ (-7) и (-5) литер

В связи с искажением спектра принимаемого сигнала (сигнал (-7) литеры), наблюдается смещение нуля дискриминационной характеристики. Величина смещения нуля ДХ в случае приёма сигнала (-7) литеры при апертуре разностного дискриминатора  $\Delta=0,1\tau$  и  $\Delta=0,25\tau$  представлены в таблице и соответственно. Вид дискриминационных характеристик изображён на рисунке 39.

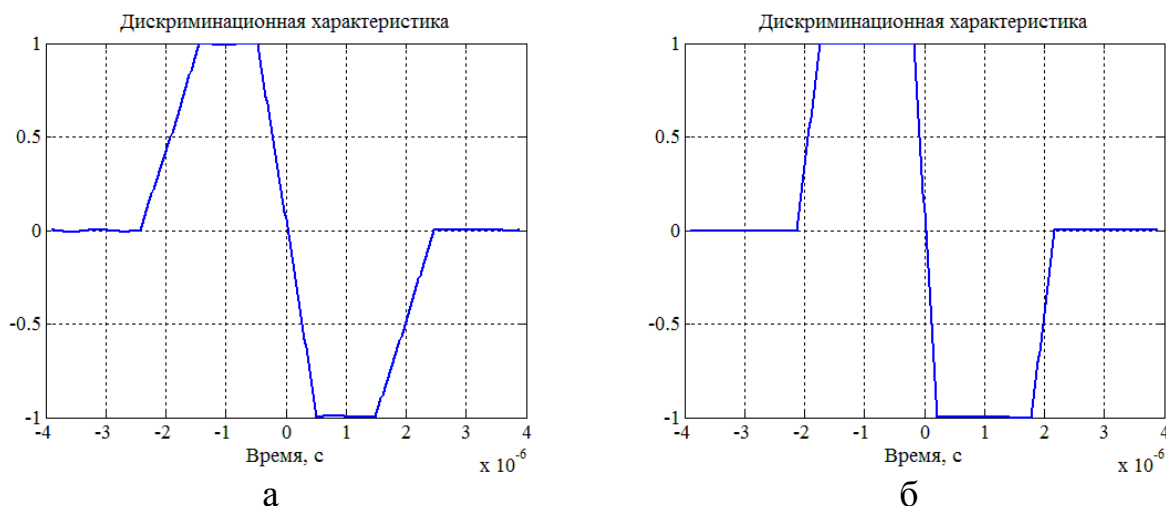


Рисунок 39 ДХ с апертурами: а -  $\Delta=0,25\tau$ , б -  $\Delta=0,1\tau$

С уменьшением аперттуры разностного дискриминатора возрастает крутизна ДХ, что с одной стороны приводит к увеличению точности слежения, а с другой стороны к уменьшению помехозащищенности.

Таблица 6 Смещение нуля ДХ в нс при  $\Delta=0,1\tau$

Излучаемые литеры		(-7,-5)	(-7,-3)	(-7,-1)	(-7,1)	(-7,3)	(-7,5)	(-7,7)
Диапазон	L1	4,1	5,1	3,2	0,4	-0,06	1,5	0,25
	L2	-1,5	-2,5	-5	-1,4	-0,6	0	-0,7

Таблица 7 Смещение нуля ДХ в нс при  $\Delta=0,25\tau$

Излучаемые литеры		(-7,-5)	(-7,-3)	(-7,-1)	(-7,1)	(-7,3)	(-7,5)	(-7,7)
Диапазон	L1	10,5	0,5	3,3	1	-0,6	1,4	-0,08
	L2	-5,2	-0,6	-3	-1,2	-0,6	-2,2	0

Как было сказано выше, уменьшение аперттуры разностного дискриминатора приводит к увеличению точности слежения, то есть к уменьшению величины смещения нуля ДХ. Тем не менее, данные,

представленные в таблицах и ,показывают нерегулярность этого свойства в рамках данной модели. Это связано со значением полосы тракта обработки, выбранной таким образом, чтобы в неё вошли все боковые лепестки принимаемого сигнала ( $N_{sl}=17$ ).

Дальнейшие результаты вычислений приведены для значения апертуры разностного дискриминатора  $\Delta=0,1\tau$ .

На основании данных, приведённых в таблицах выше, не удалось сделать вывод о том, в каком диапазоне степень влияния сигналов кратных литер оказывается выше. В связи с этим была промоделирована ситуация, в которой излучаются сигналы всех литер (-7..7) одновременно. Величина смещения нуля ДХ фиксировалась поочерёдно для всех сигналов, согласно их порядковому номеру. Результат моделирования представлен на рисунке 40.

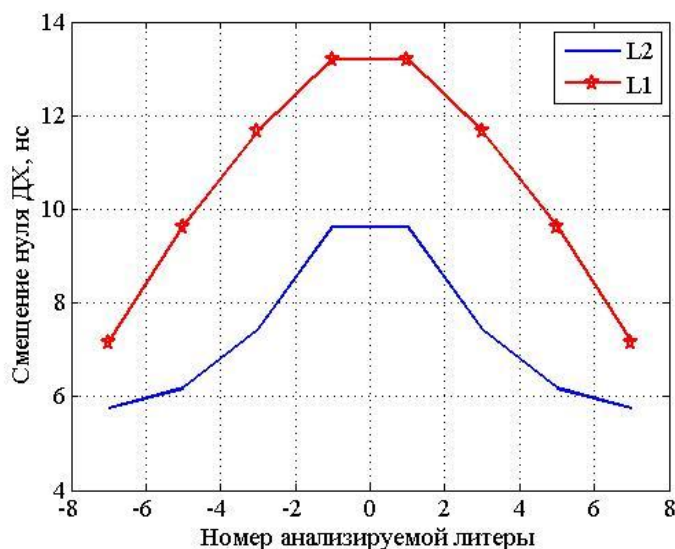


Рисунок 40 Зависимость смещения нуля ДХ при одновременном излучении всех литер

На основании зависимостей, представленных на рисунке 40, можно сделать вывод о том, что в диапазоне L2 степень влияния сигналов кратных литер ниже, чем в диапазоне L1. Это связано с различным литерным разнесом по частоте: в диапазоне L1 он составляет 562,5 кГц, а в L2 437,5 кГц.

Далее приведены результаты исследования на предмет уменьшения взаимного влияния сигналов кратных литер за счет введения принудительного сдвига мешающей литеры на целое число чипов дальномерного кода. Величины смещения нуля ДХ приведены для сигналов диапазона L1, апертура разностного дискриминатора  $\Delta=0,1\tau$ .

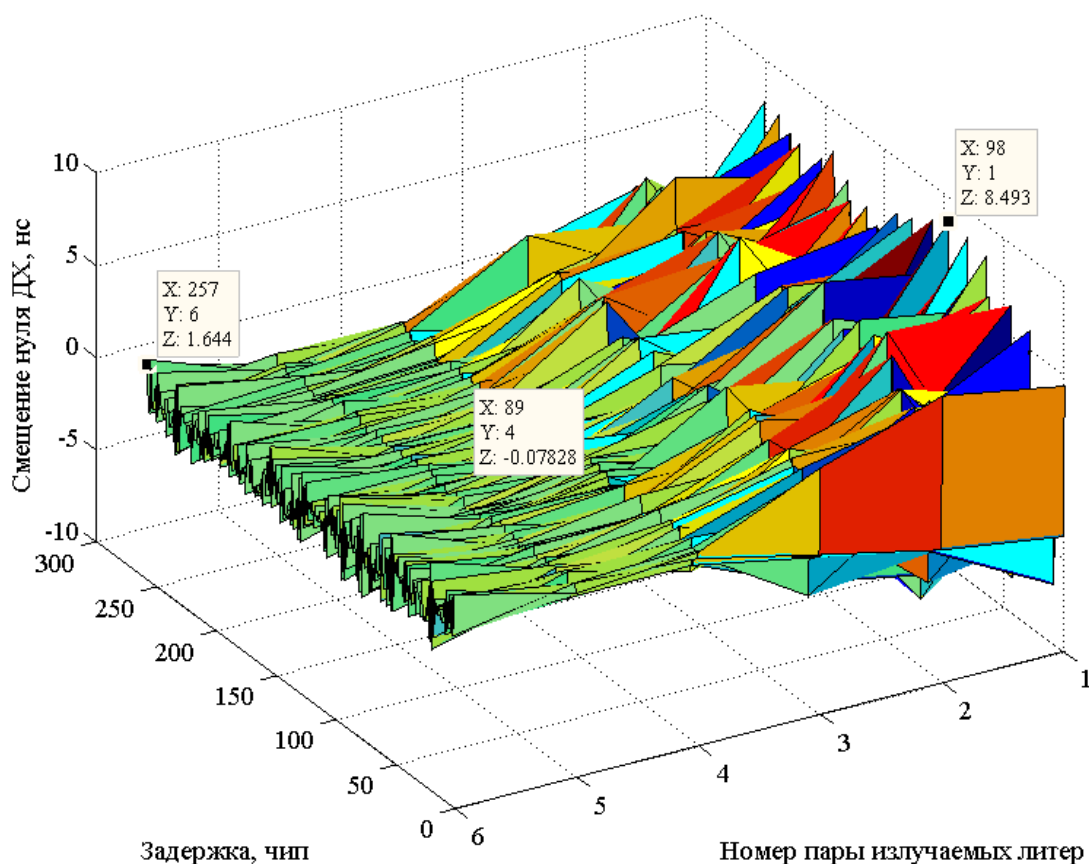


Рисунок 41 Зависимость смещения нуля ДХ от величины задержки мешающего сигнала в диапазоне L1

Если для взаимодействующих литер ввести дополнительную задержку дальномерного кода на величину, большую длительности чипа, то влияние от мешающей литеры должно уменьшиться, т.к. будет происходить сложение корреляционной функции (КФ) полезного сигнала с боковым лепестком его КФ.

В модели вводится принудительный разнос по коду на целое число чипов между излучаемыми сигналами. На рисунке 41 полезным считается

сигнал (-7) литеры. Излучаемые мешающие литеры перебираются по очереди, согласно их порядковому номеру.

Как видно из рисунка 41, с увеличением литерного разноса, степень взаимного влияния сигналов оказывается ниже. Также существуют величины задержек мешающего сигнала, нивелирующие взаимное влияние сигналов кратных литер.

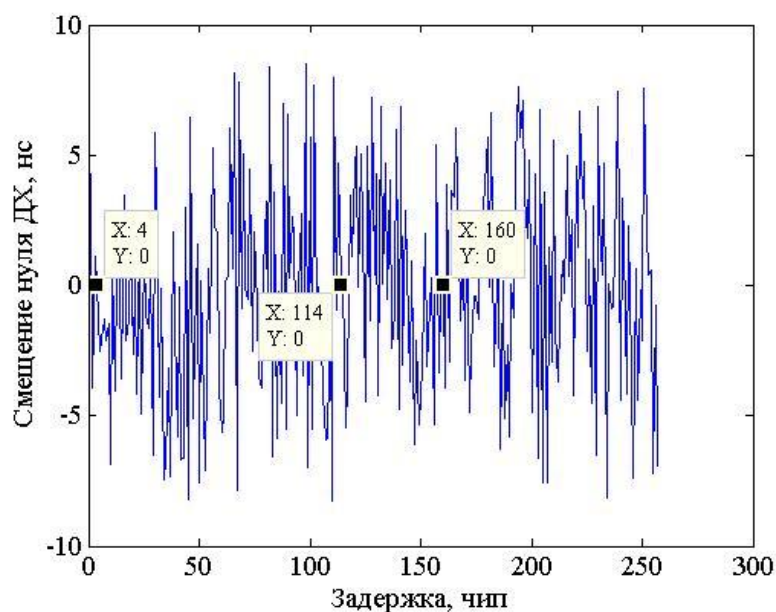


Рисунок 42 Зависимость смещения нуля ДХ при излучении полезной (-7) и мешающей (-5) литер от величины задержки мешающего сигнала

На рисунках 42, 43, 44 приведены зависимости смещения нуля ДХ для первой, третьей и пятой пар литер, соответствующие рисунку 41.

С увеличением литерного разноса уменьшается величина смещения нуля ДХ. Так для первой пары величина смещения колеблется от -8 нс до 8 нс, для второй от -4,9 нс до 4,7 нс, а для третьей от -0,06 нс до 0,08 нс.

На представленных зависимостях выделены все величины задержек сигнала мешающей литеры, приводящие к устранению взаимного влияния сигналов. Как показали результаты моделирования, количество задержек, устраняющих взаимное влияние сигналов, не зависит от величины литерного разноса между сигналами. Максимальное количество задержек, приводящих



к нулевому смещению ДХ, соответствует пятой паре литер  $((-7)+(-5)) - 9$ , а минимальное для третьей пары  $((-7)+(-1))$ .

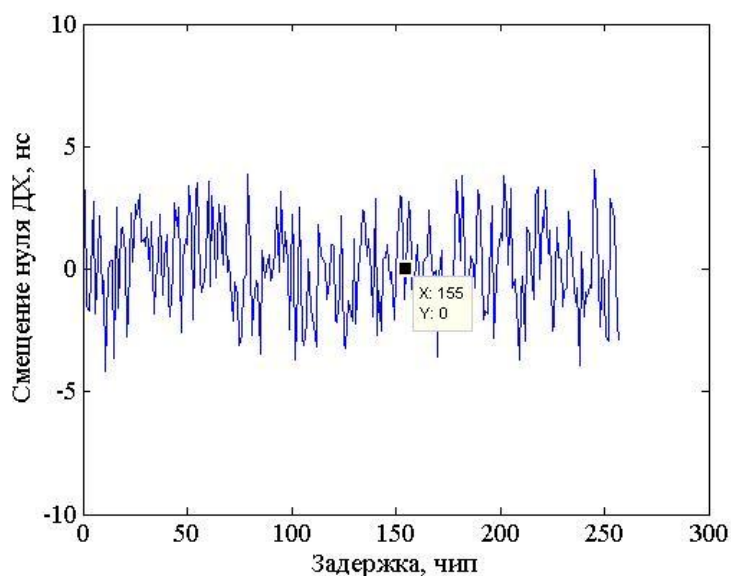


Рисунок 43 Зависимость смещения нуля ДХ при излучении полезной (-7) и мешающей (-1) литер от величины задержки мешающего сигнала

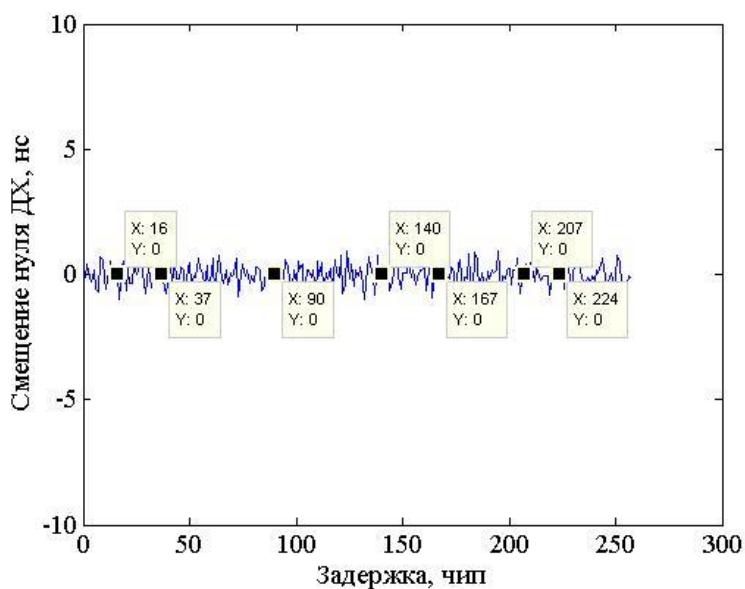


Рисунок 44 Зависимость смещения нуля ДХ при излучении полезной (-7) и мешающей (3) литер от величины задержки мешающего сигнала

С точки зрения штатной эксплуатации навигационной аппаратуры потребителей интересным оказывается вопрос о дробной величине задержки по коду между принимаемыми сигналами.

На рисунках 45 и 46 изображены зависимости смещения нуля ДХ от величины задержки мешающего сигнала. Величина смещения нуля ДХ фиксировалась для дробной величины задержки мешающего сигнала, шаг приращения задержки составляет 0,1 чипа (рисунок 45) и 0,01 чипа (рисунок 46) дальномерного кода.

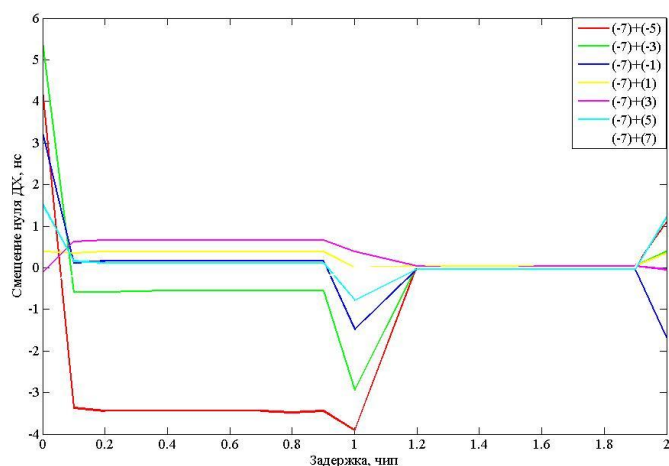


Рисунок 45 Зависимость смещения величины нуля ДХ от задержки мешающих сигналов (-5...+7) сигналов для литеры (-7) в диапазоне L1

В пределах длительности чипа дальномерного кода, величина смещения нуля ДХ не меняется. Изменения происходят в точках расположенных на границе длительности чипа, что соответствует величинам задержки 0,1 и 0,9 в долях длительности чипа.

Далее приведены результаты исследования на предмет зависимости взаимного влияния сигналов кратных литер от энергopotенциала взаимодействующих сигналов. Апертура разностного дискриминатора фиксирована и равняется  $\Delta=0,1\tau$ .

На рисунке 50 изображены дискриминационные характеристики при различных отношениях энергopotенциала полезного и мешающего сигналов.

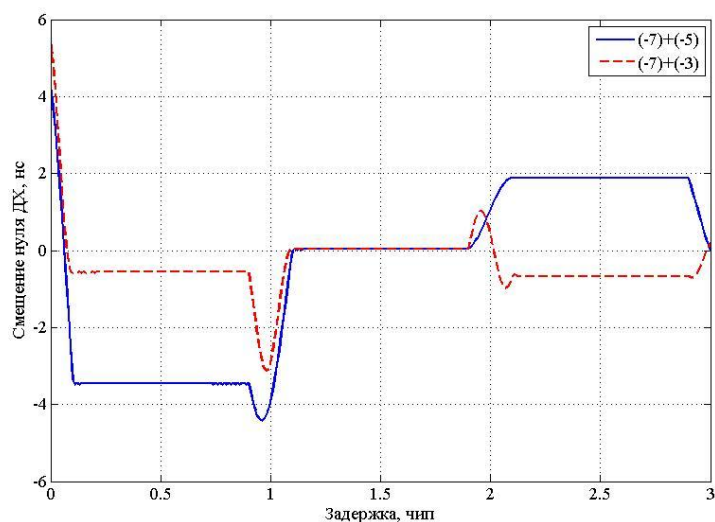


Рисунок 46 Зависимость смещения величины нуля ДХ от задержки мешающих сигналов ((-5) и (-3)) сигналов для литеры (-7) в диапазоне L1

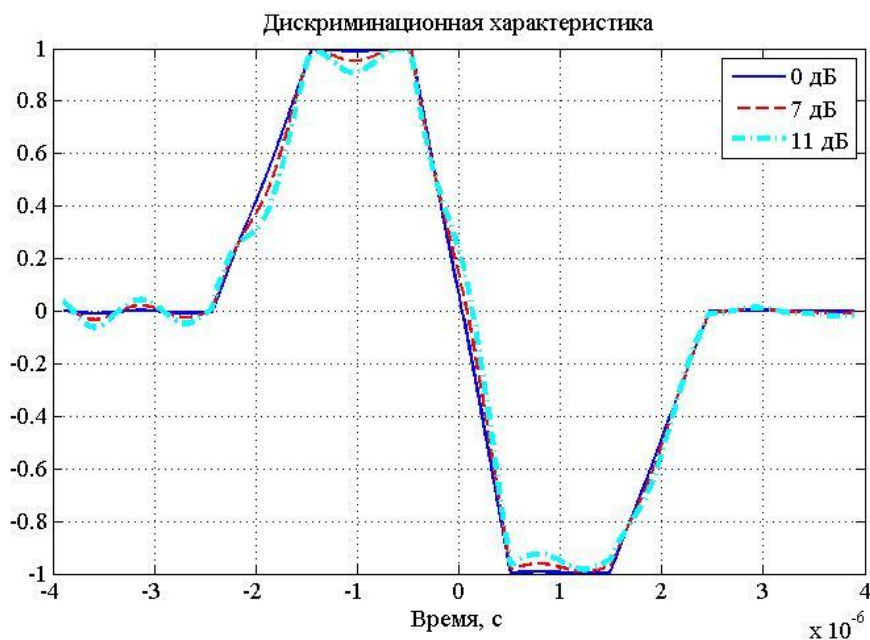


Рисунок 47 Вид ДХ при различных отношениях энергopotенциала полезного и мешающего сигналов

При увеличении энергopotенциала мешающего сигнала, происходит не только смещение нуля дискриминационной характеристики, но и изменение её формы. Величина крутизны ДХ при этом остается неизменной.

На рисунках 48, 49, 50 изображена зависимость смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного и мешающего сигнала в диапазоне L1. По скорости возрастания смещения нуля ДХ можно сделать вывод о степени взаимного влияния сигналов. На рисунках 51, 52 изображена зависимость

смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного и мешающего сигнала в диапазоне L2.

Как видно из представленных зависимостей, сигналы одинаковых литер, но находящиеся в разных диапазонах влияют по-разному.

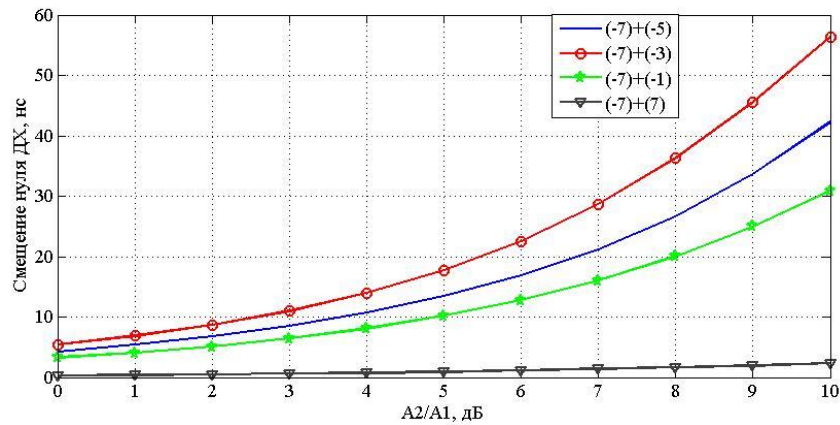


Рисунок 48 Зависимость смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного (-7) и мешающего сигналов (диапазон L1)

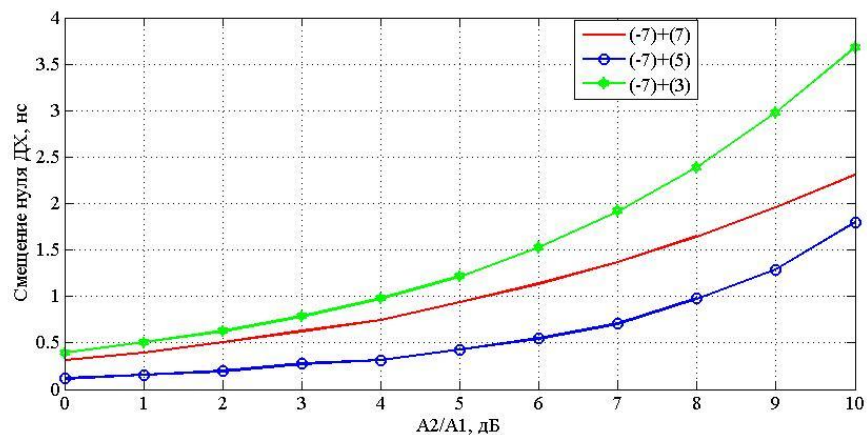


Рисунок 49 Зависимость смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного (-7) и мешающего сигналов (диапазон L2)

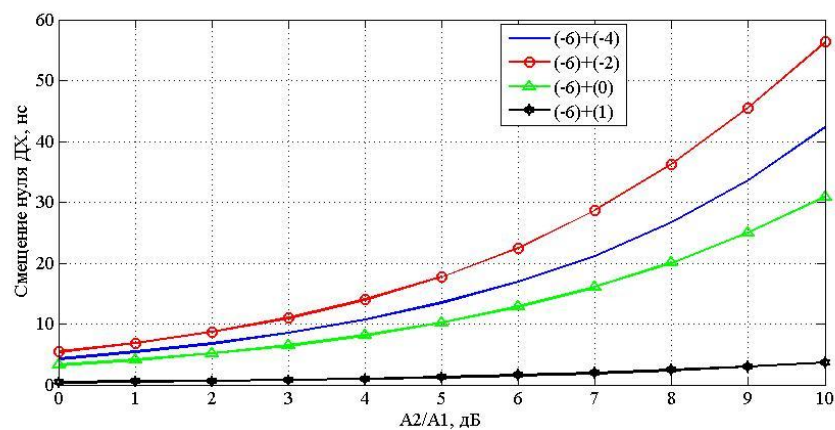


Рисунок 50 Зависимость смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного (-6) и мешающего сигналов (диапазон L1)

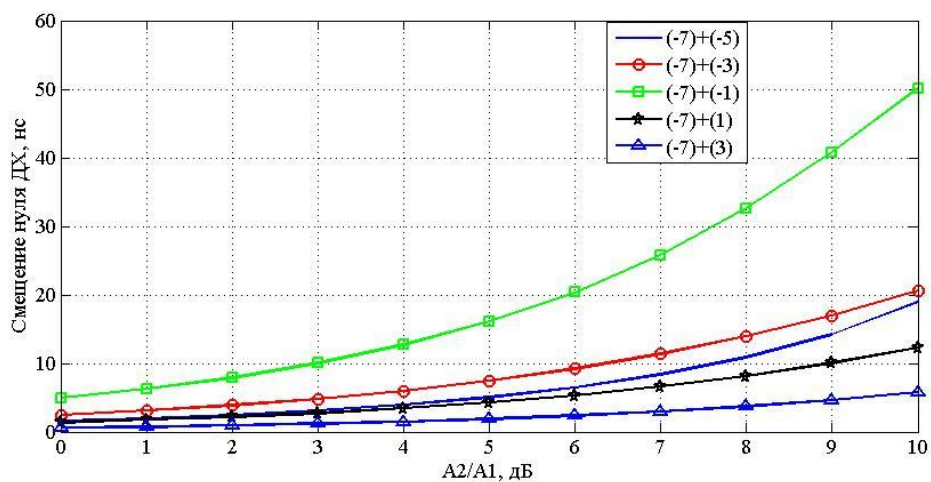


Рисунок 51 Зависимость смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного (-7) и мешающего сигналов (диапазон L2)

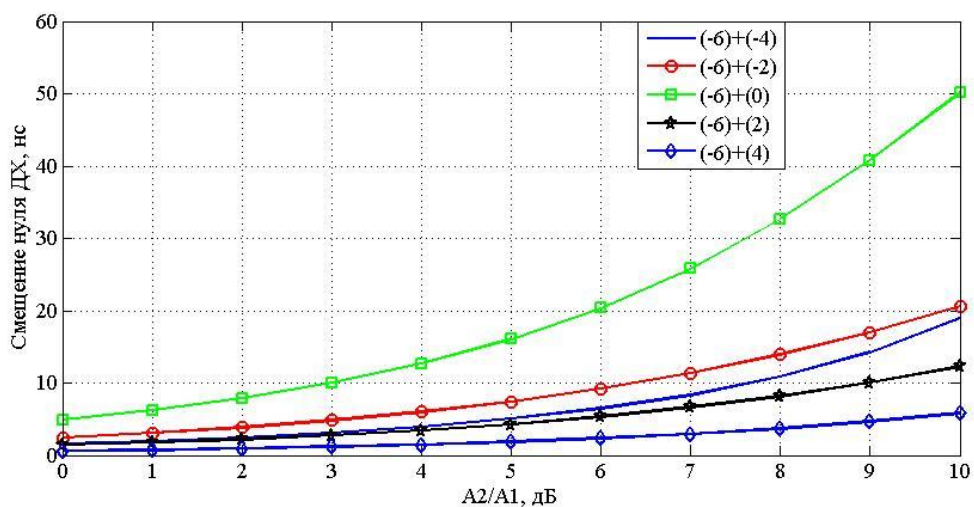


Рисунок 52 Зависимость смещения нуля ДХ от энергopotенциала полезного (-6) и мешающего сигналов (диапазон L2)

Степень зависимости для сигналов четных литер и нечетных сохраняется вне зависимости от диапазона.

### 7.1.2 Сигналы ГНСС ГЛОНАСС высокой точности с частотным разделением

У сигналов ГЛОНАСС высокой точности (ВТ) ширина лепестков в спектре в 10 раз больше, чем у сигнала СТ. Спектральные составляющие идут с частотой 1 Гц. Отличие в спектрах СТ и ВТ сигналов может привести к различному межлитерному взаимодействию.

При моделировании для учета межлитерного взаимодействия сигналов ВТ будет учитываться, что ширина лепестка в спектре сигнала 4 МГц, но длина ПСП составляет 2047 чип, что связано с вычислительными ограничениями. Чиповая скорость для этого сигнала равна 2 Мчип/с. Моделирование для ВТ сигналов производилось в диапазоне L1, апертура разностного дискриминатора  $\Delta=0,1\tau$ .

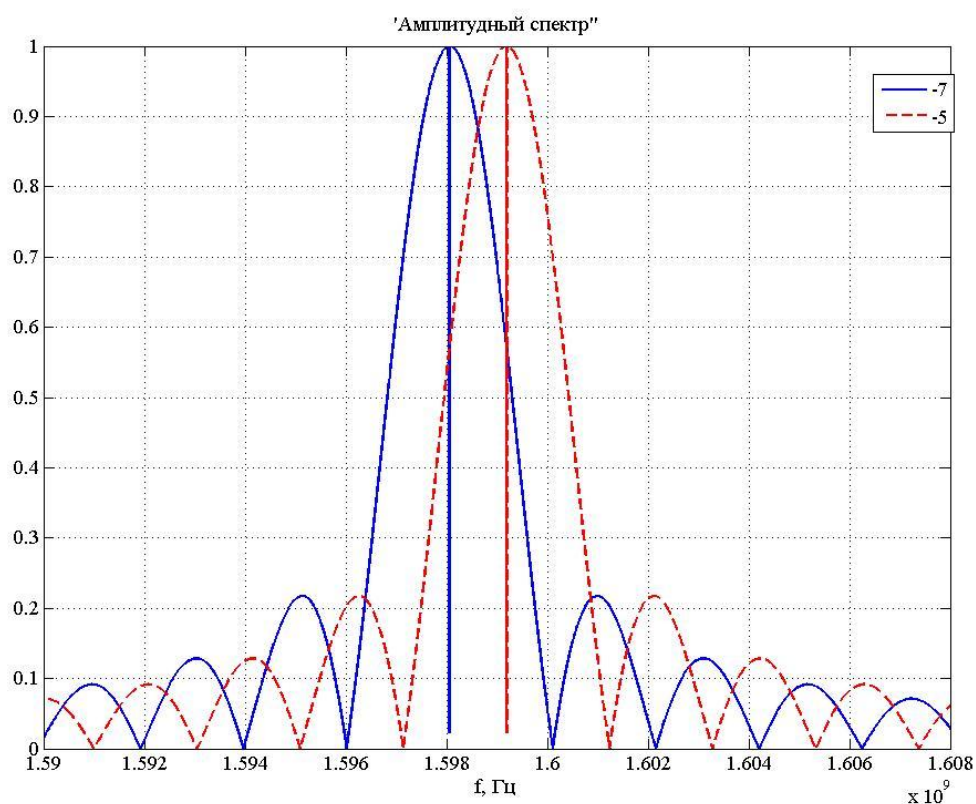


Рисунок 53 Амплитудные спектры сигналов ВТ (-7) и (-5) литер



На рисунке 53 представлены амплитудные спектры сигналов ВТ (-7) и (-5) литер в диапазоне L1. Как видно из рисунка, степень перекрытия спектров больше, в сравнении с сигналами стандартной точности (рисунок 37). Вследствие этого, амплитудный спектр суммы сигналов ВТ, изображенный на рисунке 54, приобретает другую форму, в сравнении с суммарным спектром сигналов СТ (рисунок 38).

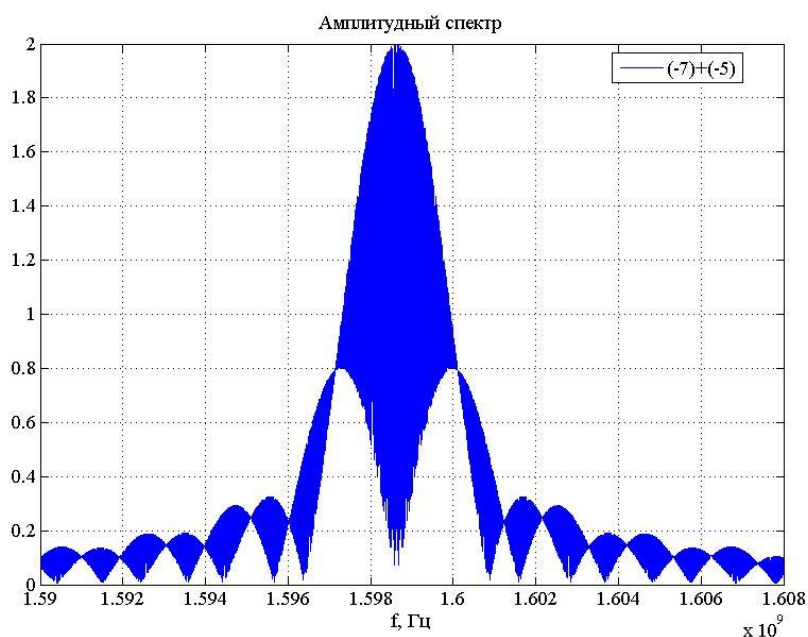


Рисунок 54 Амплитудный спектр суммарного сигнала при излучении сигналов ВТ (-7) и (-5) литер

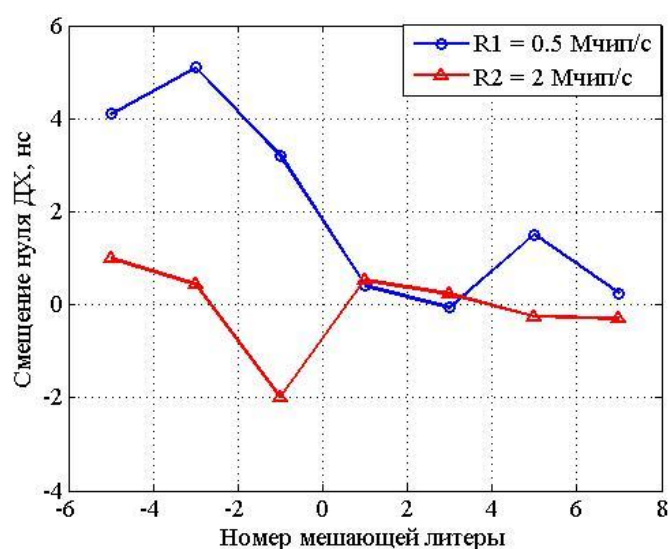


Рисунок 55 Зависимость величины смещения нуля ДХ при приеме сигнала (-7) литеры сигналов СТ и ВТ

На рисунке 55 изображены зависимости смещения нуля ДХ при приеме сигнала (-7) литеры сигналов СТ ( $R_1=0,5$  Мчип/с) и ВТ ( $R_2=2$  Мчип/с). Межлитерное взаимодействие сказывается на ВТ сигналах иначе из-за различий в спектральном представлении. Отсюда напрашивается вывод, что нельзя делать калибровку сигналами одной точности, а работать по сигналам другой точности.

## **7.2 Сигналы с кодовым разделением**

Основой технологии кодового разделения (CDMA) сигналов является передача шумоподобных сигналов (ШПС). В качестве ШПС применяются фазоманипулированные сигналы, сформированные на базе псевдослучайных последовательностей с хорошими корреляционными свойствами.

Использование различных псевдослучайных последовательностей позволяет абонентам систем CDMA работать в общей полосе. И хотя сигналы разных абонентов накладываются друг на друга, создавая при этом помеху множественного доступа (ПМД), их легко можно выделить из общего спектра.

Тем не менее, изложенные ниже результаты моделирования показывают, что при решении навигационной задачи, сигналы с кодовым разделением оказывают заметное влияние друг на друга.

### **7.2.1 Сигналы ГНСС GPS стандартной точности (C/A) в диапазоне L1**

При моделировании использовались сигналы системы GPS с номерами с 1 по 32, согласно интерфейсному контрольному документу [6].

На рисунке 53 показана зависимость среднего смещения нуля ДХ для ансамбля C/A сигналов.

Поочередно для каждого принимаемого сигнала, выбранного из исходного ансамбля, ставился в пару мешающий сигнал. Затем для каждой пары фиксировалось соответствующее смещение нуля ДХ. Величина среднего смещения нуля ДХ для каждого принимаемого сигнала вычислялось путем усреднения по количеству пар.



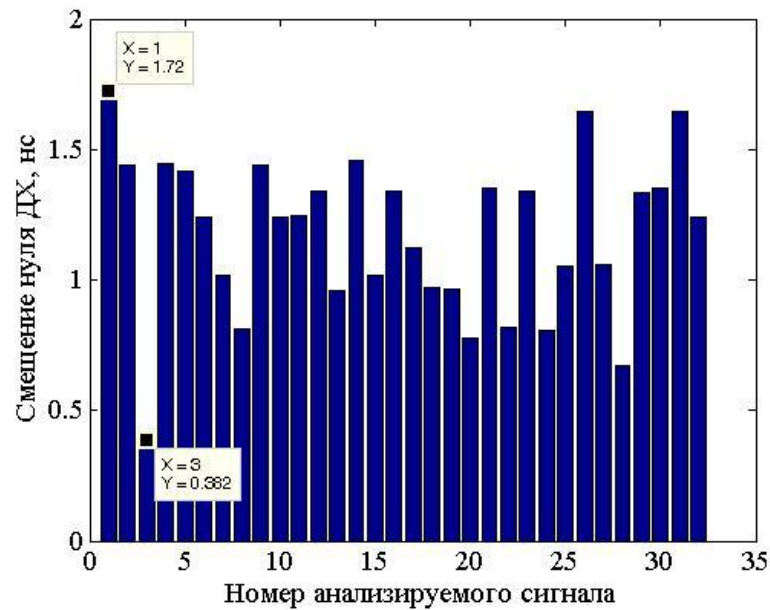


Рисунок 56 Величина среднего смещения нуля ДХ для ансамбля С/А сигналов

Представленная зависимость позволяет выделить из исходного ансамбля сигналы, более устойчивые (№3) и менее (№1) устойчивые к помехе множественного доступа. На рисунке 54, а видно, что при приеме сигнала №3 ошибка оценки псевдодальности будет иметь место лишь при совместной работе с сигналами №5, 21, 24, 25 и будет составлять не более 1,1 м.

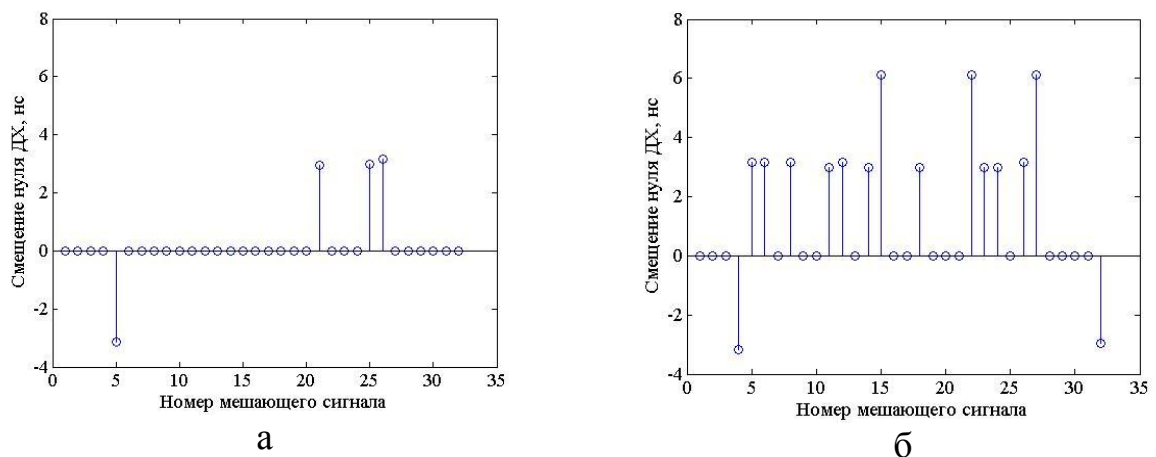


Рисунок 57 Смещение нуля ДХ для сигналов: а - №3, б - №1

При приеме сигнала №1 ошибка определения псевдодальности более вероятна и может достигать 1,8 м.

На рисунке 58 представлена зависимость смещения нуля ДХ при приеме сигнала №11 от величины задержки мешающих сигналов (№ 1..10).

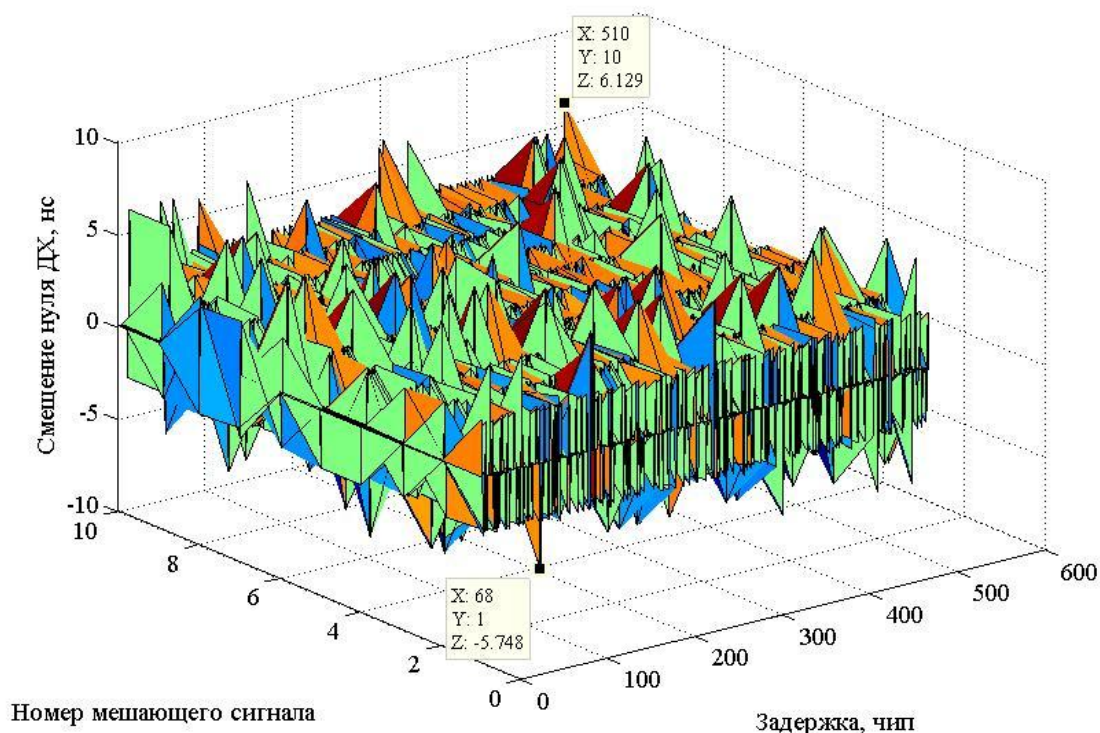


Рисунок 58 Зависимость смещения нуля ДХ при приеме сигнала №11 от величины задержки мешающего сигналов

Как видно из представленной зависимости, при приеме сигнала №11 и различных величинах задержки мешающего сигнала, в пределах полупериода ДК, максимальная величина погрешности оценки псевдодальности составляет 1,8 м.

### 7.2.2 Сигналы B1I, B2I ГНСС Beidou

При моделировании использовались сигналы системы Beidou с номерами с 1 по 30, согласно интерфейсному контрольному документу [7].

Результаты моделирования представлены для сигнала B1I. На рисунке 55 показана зависимость среднего смещения нуля ДХ для ансамбля сигналов B1I.

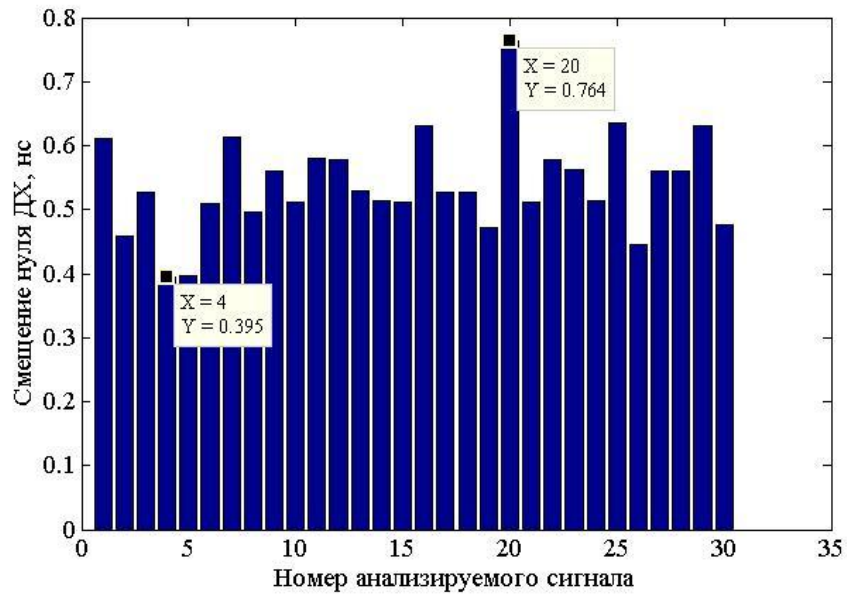


Рисунок 59 Величина среднего смещения нуля DX для ансамбля сигналов В11

Поочередно для каждого принимаемого сигнала, выбранного из исходного ансамбля, ставился в пару мешающий сигнал. Затем для каждой пары фиксировалось соответствующее смещение нуля DX. Величина среднего смещения нуля DX для каждого принимаемого сигнала вычислялось путем усреднения по количеству пар.

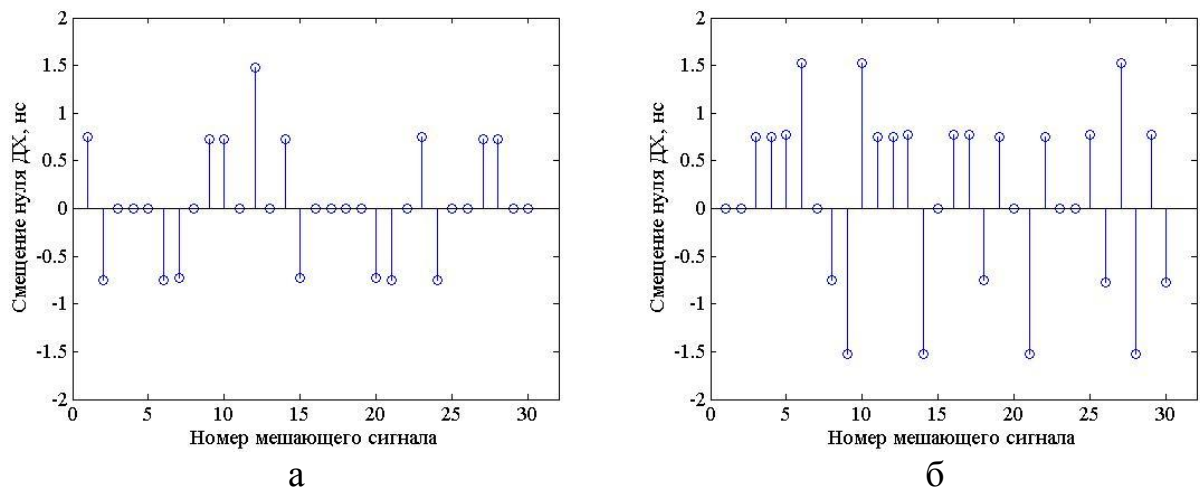


Рисунок 60 Смещение нуля DX для сигналов: а - №4, б - №20

Представленная зависимость позволяет выделить из исходного ансамбля сигналы, более устойчивые (№4) и менее (№20) устойчивые к помехе множественного доступа. На рисунке 57, а видно, что при приеме

сигнала №4 ошибка оценки псевдодальности будет составлять не более 0,5 м.

На рисунке 58 представлена зависимость смещения нуля ДХ при приеме сигнала №20 от величины задержки мешающих сигналов (№ 1..10).

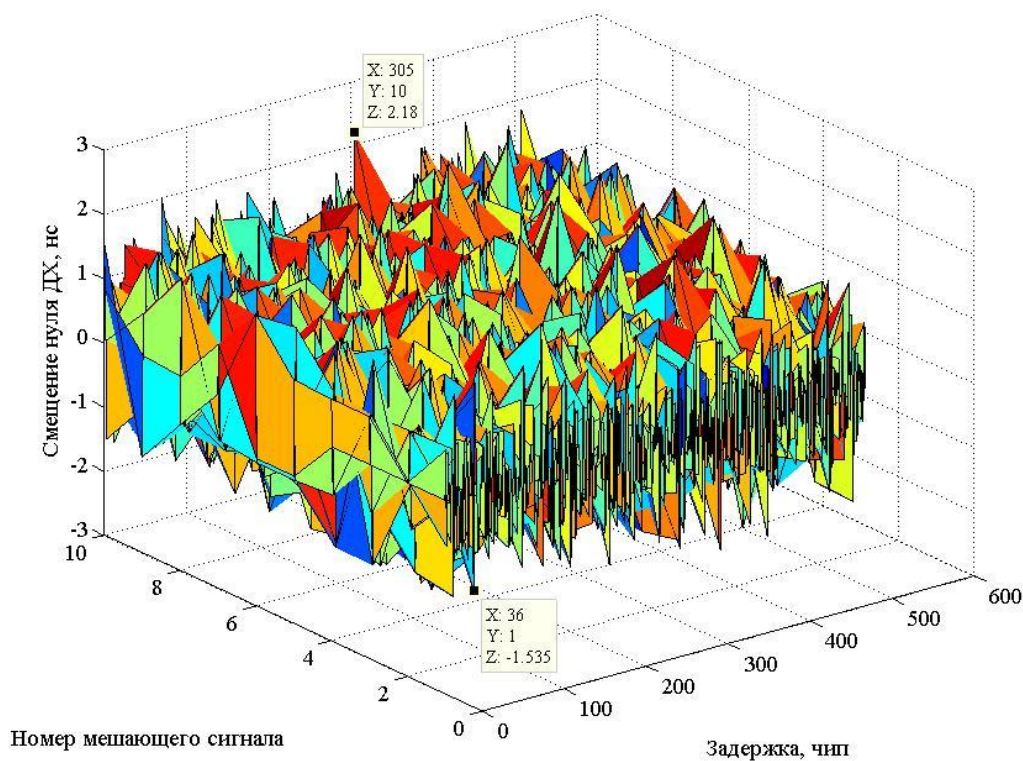


Рисунок 61 Зависимость смещения нуля ДХ при приеме сигнала №20 от величины задержки мешающего сигналов

Как видно из представленной зависимости, при приеме сигнала №20 и различных величинах задержки мешающего сигнала, в пределах четверти периода ДК, максимальна величина погрешности оценки псевдодальности составляет 0,6 м.

### 7.2.3 Сигнал E1 ГНСС Galileo

При моделировании использовались сигналы системы Galileo с номерами с 1 по 30, согласно интерфейсному контрольному документу [8].

Результаты моделирования представлены для сигнала E1-B. На рисунке 59 показана зависимость среднего смещения нуля ДХ для ансамбля сигналов E1-B.

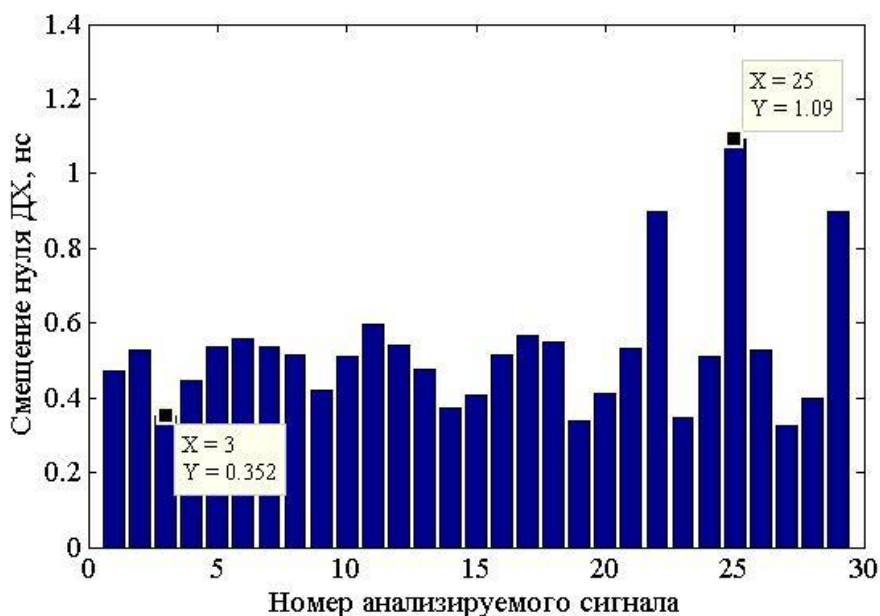


Рисунок 62 Величина среднего смещения нуля ДХ для ансамбля сигналов E1-B

Поочередно для каждого принимаемого сигнала, выбранного из исходного ансамбля, ставился в пару мешающий сигнал. Затем для каждой пары фиксировалось соответствующее смещение нуля ДХ. Величина среднего смещения нуля ДХ для каждого принимаемого сигнала вычислялось путем усреднения по количеству пар.

Представленная зависимость позволяет выделить из исходного ансамбля сигналы, более устойчивые (№3) и менее (№25) устойчивые к помехе множественного доступа.

На рисунке 60, а видно, что при приеме сигнала №3 ошибка оценки псевдодальности будет составлять не более 0,3 м.



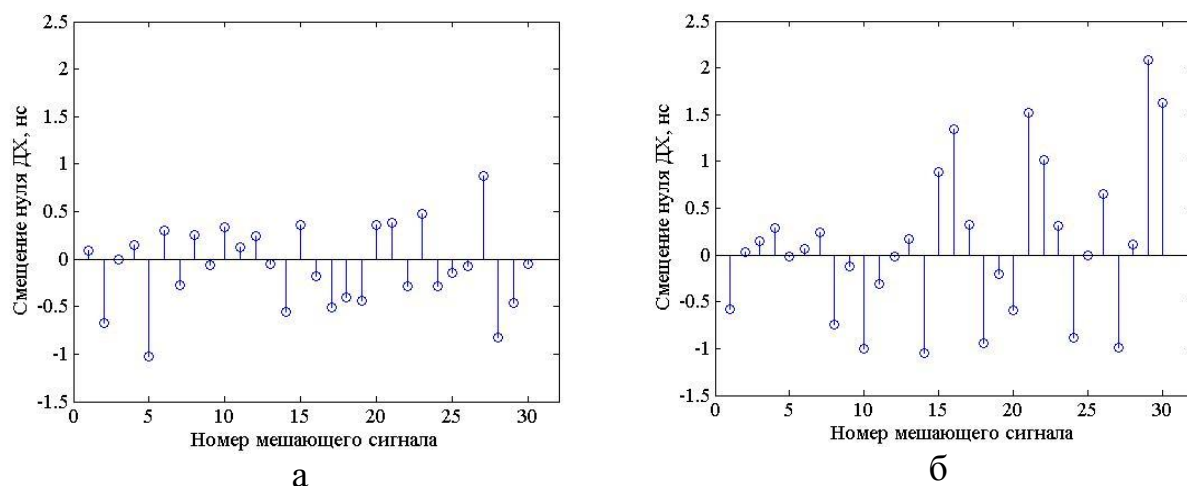


Рисунок 63 Смещение нуля ДХ для сигналов: а - №3, б - №25

При приеме сигнала №25 ошибка определения псевдодальности более вероятна и может достигать 0,6 м.

На рисунке 61 представлена зависимость смещения нуля ДХ при приеме сигнала №25 от величины задержки мешающих сигналов (№ 1..10).

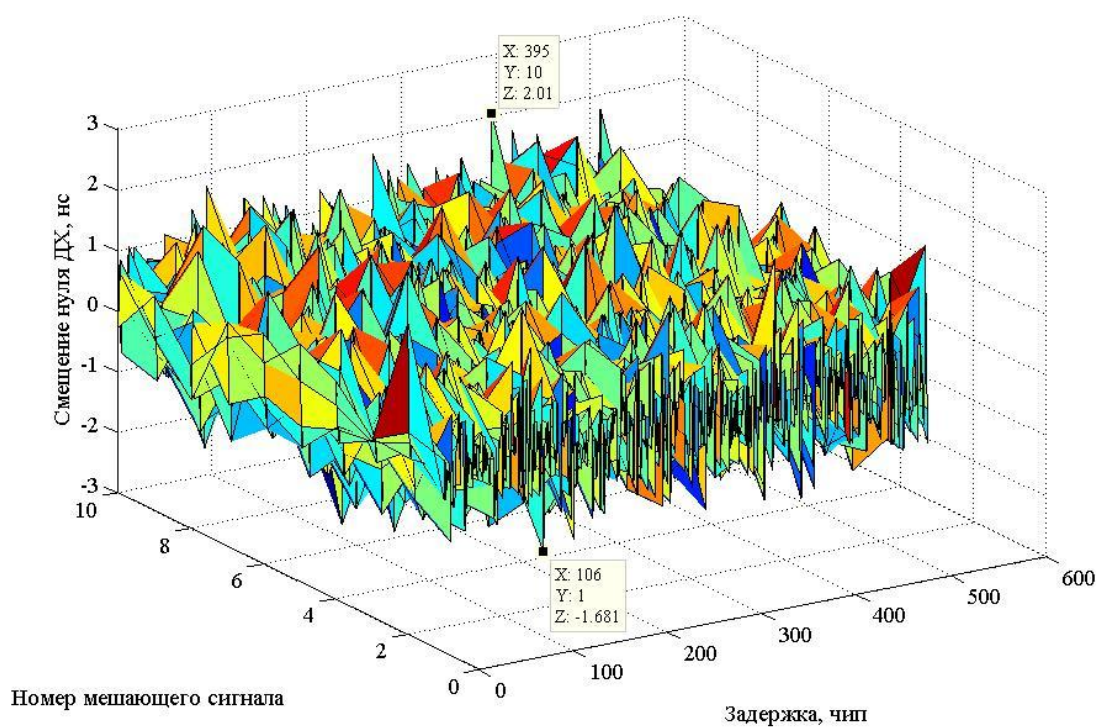


Рисунок 64 Зависимость смещения нуля ДХ при приеме сигнала №25 от величины задержки мешающего сигналов

## **8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ**

За неимением достаточного временного ресурса, в рамках данной работы не была разработана оболочка графического интерфейса пользователя. Дальнейшее усовершенствование и неоднократное тестирование синтезированного программного кода с целью выявления и устранения возможных идеологических ошибок, позволит в будущем создать удобный инструмент для дальнейших исследований в рамках темы представленной работы. Для этого необходимо обладать навыками в области разработки программного обеспечения. В данной главе будут изложены аспекты эргономики программного обеспечения.

В настоящее время ЭВМ и программное обеспечение (ПО) заняли ведущее место как инструмент технологических производственных процессов во всех отраслях промышленности, в частности в сфере радиотехники. Исключением не стал процесс создания и оформления этой работы: иллюстративные материалы были получены с использованием пакета прикладных программ Matlab.

Человеческий организм – сложная динамическая система, которой свойственно управление с обратной связью, осуществляемое на основе переработки поступающей информации с использованием накапливающегося опыта (знаний). Некорректно спроектированные пользовательские интерфейсы без учета рекомендаций стандартов эргономики являются источником стресса и психологического дискомфорта, возникающими вследствие неоптимального распределения функций между человеком и машиной в результате навязывания неудобных алгоритмов или темпа деятельности. В некорректно спроектированных графических интерфейсах не учитываются возможности человека при решении конкретных задач, зачастую отсутствуют индикаторы процесса их выполнения. Эффективность, качество и удовлетворенность от выполнения работы при использовании таких интерфейсов значительно снижаются.

Принятие человеко-ориентированного подхода к проектированию и разработке несет существенную экономическую и социальную выгоду для пользователей, работодателей и поставщиков [ГОСТ Р ИСО 9241-210-2016]. Продукция и системы с высокой пригодностью использования имеют тенденцию быть более совершенными с технической точки зрения и коммерчески более успешными. В некоторых случаях, например, в случае потребительской продукции, покупатели готовы заплатить больше денег за хорошо спроектированную продукцию или систему. Стоимость технической поддержки снижается, когда пользователи могут понять и использовать продукцию без дополнительной помощи. В большинстве стран работодатели и поставщики имеют установленные законом обязательства по защите пользователей от риска ухудшения здоровья. Человеко-ориентированные методы и методы обеспечения безопасности могут снизить такой риск (например, риск опасного воздействия на костно-мышечную систему). Системы, разработанные с использованием человеко-ориентированных методов, обладают более высоким качеством, например, за счет:

- увеличения производительности пользователей и производительности труда в организациях;
- простоты понимания и использования, в результате чего снижается стоимость обучения и поддержки;
- повышения пригодности использования для широкого диапазона пользователей, в результате чего увеличивается доступность;
- учета опыта пользователей;
- снижения у пользователя дискомфорта и стресса;
- обеспечения конкурентного преимущества, например, в результате улучшения образа торговой марки;
- содействия достижению целей устойчивого развития организации.

Общие преимущества применения человеко-ориентированного проектирования могут быть определены с учетом стоимости всего



жизненного цикла продукции, системы или услуги, включая стадии концепции, проектирования, осуществления, использования, технического обслуживания и вывода из эксплуатации. Принятие человеко-ориентированного подхода к проектированию благотворно влияет на другие аспекты проектирования системы, например, упрощая идентификацию функциональных требований. Принятие человеко-ориентированного подхода также увеличивает вероятность успешного завершения проекта в срок и в рамках установленного бюджета. Использование подходящих человеко-ориентированных методов может снизить риск несоответствия продукции требованиям причастных сторон и пользователей.

Как советуют авторы книги [10], обеспечение оптимального взаимодействия пользователя с программным изделием проектирования пользовательского интерфейса можно разделить на следующие этапы:

- начало работы над проектом;
- постановка задачи;
- высокоуровневое проектирование;
- низкоуровневое проектирование.

Предложенные этапы схожи с основными этапами жизненного цикла ПО. Общепринятая модель жизненного цикла является идеальной, она состоит из нескольких итераций и логически не предполагает возвращение на любую предыдущую стадию после завершения очередного этапа разработки.

При кодировании уже спроектированного программного продукта может обнаружиться, что реализация некоторой функции очень громоздка, неэффективна и вступает в противоречие с требуемой от системы производительностью. В таком случае требуется перепроектирование, а может быть, и переделка спецификаций. При разработке больших нетрадиционных систем необходимость в итерациях возникает регулярно на любом этапе жизненного цикла как из-за допущенных на предыдущих шагах ошибок и неточностей, так и из-за изменений внешних требований к условиям эксплуатации системы. Поэтому классическая итерационная

модель предполагает возврат на предыдущие этапы при разработке, но, тем не менее, она абсолютизирует возможность возвратов на предыдущие этапы. Классическая модель является верной, если вся информация, полученная на предыдущем этапе, сохраняется.

Данная модель представляет процесс проектирования и разработки ПО как фазовое наполнение, отражающее этапы выполнения проекта и сопутствующие им события, и функциональное, показывающее, какие организационные функции выполняются в ходе развития проекта и какова их интенсивность на каждом из этапов.

Как рекомендует стандарт ГОСТ Р ИСО 14915-1, проектирование и разработка информационного наполнения, взаимодействий и форм представления информации обеспечивают структурированный подход к определению, проектированию и разработке различных компонентов приложения. Разработка информационного наполнения должна предшествовать разработке взаимодействий и проектированию форм представления информации.

Обобщая все вышесказанное, применительно к проектированию графического пользовательского интерфейса можно также выделить следующие стадии:

- проведение необходимых исследований среды применения разрабатываемого графического пользовательского интерфейса приложения, определение требований, исходных данных;
- анализ, формализация требований, решения по проектированию архитектуры и стратегия проектирования, разработка информационного наполнения и форм представления;
- составление спецификаций, функциональных возможностей интерфейса, взаимодействия, навигации;
- проектирование, конструирование графического пользовательского интерфейса, управляющих элементов.

На начальном этапе разработки любого проекта, как графического пользовательского интерфейса, так и полностью программного продукта, необходимо выяснить целевую аудиторию, а также исходные требования.

Чем более полная информация о разрабатываемом ПО будет собрана, тем более четкое и правильное представление о его назначении и качествах будет сформировано, а значит, тем лучше будет проходить процесс разработки на всех последующих стадиях.

Как рекомендует стандарт ГОСТ 9241-210, на начальном этапе проектирования графического пользовательского интерфейса должно появиться понимание сферы применения программного изделия на основе точного определения пользователей, задач и среды. Помимо исследований, необходимо общение с пользователем и выявление, как его потребностей, так и возможностей по использованию. Программное приложение, его графический пользовательский интерфейс должны быть разработаны таким образом, чтобы учитывать влияние (прямое или косвенное), которое они могут оказать на все причастные стороны. Следовательно, все важные группы пользователей и причастных сторон должны быть определены. Построение систем на основе неверного или неполного понимания потребностей пользователей является одним из главных источников отказа системы.

Такое проектирование характеризуется действиями, направленными на получение четкого представления о предполагаемом пользователе и достижение понимания требований производственного задания. Как описывалось ранее, при таком методе используют процессы итеративной разработки с активным вовлечением пользователей, включая оценку соответствующих этапов проекта, например, стадию разработки прототипа. При таком проектировании необходимо использовать знания экспертов в области или дисциплинах, относящихся к области проектирования (ГОСТ Р ИСО 14915-1).

Начальный этап проектирования пользовательского интерфейса авиационного программного изделия предполагает беседы со специалистами, которые будут использовать разрабатываемое приложение, – пилотами, пилотами-инструкторами, обучающими самолетовождению, техническим персоналом. В результате взаимодействия с будущими пользователями, анализа полученной информации и исследований применения опыта другими разработчиками появляются необходимые исходные данные, которые на следующем этапе трансформируются в информационное наполнение.

После этапа исследований, а также анализа полученной информации, как правило, формируется информационное наполнение.

В графическом пользовательском интерфейсе информационное наполнение должно быть упорядочено таким образом, чтобы учесть возможности человека по обработке информации, а также так, чтобы пользователи могли легко идентифицировать отдельные части информационного наполнения и их взаимосвязи.

Структурирование и размещение информационного наполнения должно быть спроектировано таким образом, чтобы не допустить перегрузки, вызванной дополнительными действиями.

Важным аспектом при проектировании графического пользовательского интерфейса является пригодность для изучения. Приложение пригодно для изучения, если разработано таким образом, что пользователь может без затруднения найти важную, необходимую информацию, заранее ничего практически не зная о типе, объеме или структуре этой информации и о функциональных возможностях, обеспечиваемых приложением.

Основные эргономические аспекты представления информации на экране приложения:

- различимость;
- понятность;
- удобочитаемость;

- согласованность;
- краткость;
- понятность.

Пользователь не должен быть перегружен слишком большим количеством информации, представляемой одновременно с помощью одной или нескольких форм представления информации. Формы представления информации должны быть выбраны так, чтобы у пользователя было время для восприятия и понимания необходимой информации.

На следующем этапе на основе выявленных сценариев работы осуществляется разработка структуры экранов или информационных кадров, то есть определяется количество экранов, функциональность каждого из них, навигационные связи между ними, формируется структура меню и других навигационных элементов.

Целью проектирования навигационных структур является минимизация количества вводов пользователя, которое ему необходимо совершить для обнаружения сегментов, а также усилий пользователя по обнаружению требуемой информации.

Связь между информационным наполнением между элементами, сегментами и частями представления информационного наполнения является главным вопросом для рассмотрения во время детальной разработки. Основная проблема – обеспечение пользователей возможностью навигации к нужному информационному наполнению максимально эффективным образом.

Сложность навигационной структуры должна быть спроектирована соответственно выполняемым производственным задачам и целям пользователя. То есть при проектировании необходимо учитывать тип процесса производственного задания. В зависимости от типа выполняемых пользователем действий можно определить структуру навигации.

Если ожидание пользователя или выполнение задания носит последовательный характер, то наилучшим применением будет линейная

навигационная структура. Как рекомендует стандарт ГОСТ Р ИСО 14915-2, линейные структуры в большей мере подходят для создания логического прямого пути через приложение, по которому пользователь следует естественным образом, а не принудительно.

Линейные структуры следует разрабатывать на основе одного или нескольких принципов структурирования: по задачам, по целям использования, по времени, по информационным моделям.

При применении такой навигационной структуры в графическом пользовательском приложении оператор должен иметь возможность перемещения в структуре вперед и назад, в начало или конец структуры, прямого доступа к определенному местоположению в пределах структуры.

Для сложного информационного наполнения наиболее подходят древовидные структуры. Их следует использовать, когда информационное наполнение может быть иерархически сгруппировано в логические единицы с учетом наличия информации и/или объектов, для которых могут существовать различные уровни детализации.

Древовидные структуры следует разрабатывать на основе одного или более из нижеприведенных логических принципов:

- разделение информационного наполнения;
- разделение задач пользователей;
- разделение временных отношений;
- наличие дополнительных потребностей у различных групп пользователей.

Навигация в древовидных структурах должна предоставлять возможности перемещения:

- вперед и назад в пределах уровня структуры;
- вверх и вниз по уровням структуры;
- на первый или основной уровень;
- к началу или к концу структуры.

Если у отдельных частей информационного наполнения существует большое количество связей, следует использовать сетевые структуры.

Разрабатывать структуру информационного наполнения и навигацию при сетевом подходе следует, опираясь на одно или несколько логических оснований:

- потребности различных задач;
- потребности различных групп пользователей;
- потребности организации информационного наполнения.

Чаще всего при взаимодействии пользователя с программным приложением возникает диалог.

В стандарте ГОСТ Р ИСО 9241-110-2009 дано следующее определение диалога: «взаимодействие между пользователем и интерактивной системой, рассматриваемое как последовательность действий пользователя (входы) и ответных реакций системы (выходы) с целью достижения установленных целей».

Рекомендации, данные в стандарте для организации диалога, служат общими указаниями для:

- помощи в установлении требований к организации диалога, основанных на области применения;
- руководства для идентификации и определения требований к организации диалога, основанных на методиках диалога, описанных в ИСО 9241-14 - ИСО 9241-17;
- помощи в выборе проектных решений в соответствии с ИСО 9241-12–ИСО 9241-17;
- помощи в оценке существующих проектных решений относительно выполнения требований к организации
- диалога.

Рекомендации по определению требований к организации диалога для конкретного приложения могут быть определены функциональными характеристиками на основании предполагаемых потребностей пользователя

в рамках выполнения производственного задания. То есть для эффективного проектирования графического пользовательского интерфейса приложения первоначально необходимо понять предметную область и основные функции применения разрабатываемого программного продукта.

Основными принципами проектирования диалога, рассматриваемыми как набор общих целей при проектировании и критериев оценки диалога, являются следующие:

- приемлемость диалога для выполнения производственного задания;
- информативность;
- соответствие ожиданиям пользователей;
- пригодность для обучения;
- контролируемость;
- устойчивость к ошибкам;
- адаптируемость к индивидуальным особенностям пользователя.

В рамках моей квалификационной работы была разработана программа в среде MATLAB, запускаемая на ПК с интерфейсом, отображаемым на его видеодисплейном модуле. Поэтому, при разработке интерфейса программы было необходимо учитывать требования к визуальному отображению информации. Безусловно, интерфейс должен быть максимально простым и лаконичным, но также важно и расположение элементов друг относительно друга, удобные для восприятия глазом шрифты и оптимальный размер каждого из элементов. Соблюдение этих требований основывается на ГОСТ Р ИСО 9241-3–2003. Ключевые параметры, оговорённые этим стандартом, учитывавшиеся при разработке были следующими: интервал между знаками, интервал между строками, интервал между словами, формат знаков, интервал между словами, высота знаков, постоянство размеров знаков, ширина знаков, отношение ширины знака к высоте, проектное расстояние наблюдения, коэффициент заполнения, полярность изображения (в основном, для графиков), разборчивость, удобочитаемость.



Таким образом, основными эргономическими аспектами при проектировании графического пользовательского интерфейса будут являться

- человеко-ориентированный подход;
- цветовые схемы интерфейса;
- взаимосвязь функциональных возможностей (диалоги, экранные формы, навигация);
- удобство использования и информативность (пиктограммы, кнопки, значки).

При следовании рекомендациям стандартов эргономики, созданных при накоплении опыта разработки, можно получить качественный программный продукт, способствующий эффективному выполнению работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках ВКР было исследовано взаимное влияния сигналов ГНСС одного радиочастотного диапазона друг на друга, определены условия возникновения взаимного влияния.

В рамках поставленной задачи, результаты моделирования сигналов с частотным разделением показали следующее:

1. Уменьшение апертутры разностного дискриминатора ведет к уменьшению погрешности оценки псевдодальности.
2. Степень взаимного влияния сигналов в диапазоне L1 оказывается выше, чем в диапазоне L2. Разница между погрешностями оценки псевдодальности составляет при этом 0,5 м.
3. Зависимость смещения нуля ДХ от отношения энергopotенциала полезного и мешающего сигналов носит экспоненциальный характер. Чем выше скорость возрастания экспоненты, тем больше величина погрешности оценки псевдодальности.
4. Для каждой пары литер существует взаимный сдвиг по дальномерному коду, устраняющий взаимное влияние.
5. Модельное приближение к сигналам высокой точности показало, что с увлечением ширины полосы сигналов, величина погрешности оценки псевдодальности в среднем уменьшается. Однако, в силу различного характера перекрытия спектров, положения экстремумов величины смещения нуля ДХ становится другим в сравнении с сигналами стандартной точности.

Для сигналов с кодовым разделением в рамках предложенной работы не удалось выстроить систематического анализа исследуемого вопроса.

Тем не менее, с уверенностью можно сказать, что более широкополосные сигналы, например сигналы системы Beidou относительно сигналов GPS, оказываются предпочтительнее с точки зрения величины погрешности оценки псевдодальности. Также применение сигналов с новыми

видами модуляции, например сигналы системы Galileo, ведут к уменьшению величины погрешности оценки псевдодальности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шебшаевич В.С. Развитие теоретических основ спутниковой радионавигации ленинградской радиокосмической школой// Радионавигация и время, РИРВ, 1992, №1.
2. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС, Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2, редакция 5.1, 2008г.
3. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС, Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L1 редакция 1.0, 2016г.
4. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС, Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L2 редакция 1.0, 2016г.
5. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС, Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3 редакция 1.0, 2016г.
6. Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200, IRN-IS-200H-003, 9<sup>th</sup> December, 2015.
7. European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document, 2016.
8. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document, Open Service Signal (Version 2.1), China Satellite Navigation Office, 2016.
9. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2005.
- 10.Сергеев С.Ф., Падерно П.И., Назаренко Н.А. Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2011. 108 с
11. ГОСТ Р ИСО 9241-110-2016, Эргономика взаимодействия человек-система, 2017.

12.ГОСТ Р ИСО 9421-129-2014, Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 129. Руководство по индивидуализации программного обеспечения, 2014.