



## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о магистерской диссертации Белянушкина А.С.

«Прием навигационного сообщения в некогерентном режиме»

Белянушкин А. С. начал работу на кафедре РТС свыше 2-х лет тому назад с выполнения бакалаврской работы. В рамках бакалаврской работы он провел разработку программного модуля, реализующего протокол BINR обмена навигационной аппаратуры.

В магистерской диссертации Белянушкин А. С. разрабатывает и исследует алгоритм приема навигационного сообщения в некогерентном режиме. Для этого проводится синтез алгоритма. Создается имитационная модель, с помощью которой выявляются характеристики алгоритма, и производится его сравнение с традиционным когерентным алгоритмом.

Выгодно отличает работу Александра Сергеевича апробация результатов на опытном образце навигационного приемника. Разработанный алгоритм реализован в специальном программном обеспечении, проведен комплекс экспериментов, подтверждающих работоспособность и выявляющих характеристики. Проведено сравнение алгоритма с когерентным алгоритмом.

За время работы над диссертацией Белянушкин А. С. проявил себя как настойчивый исследователь.

Считаю, что магистерская диссертация Белянушкина А. С. заслуживает оценки хорошо или отлично, а диссертант – присвоения ему квалификации магистра техники и технологии.

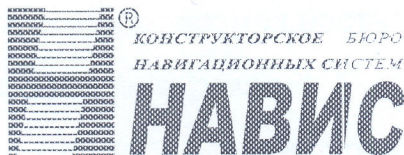
Научный руководитель, к.т.н.



Корогодин И.В.

16.06.16





ЗАО «КБ НАВИС»  
ул. Кульнева, д.3, стр.1, г. Москва, 121170  
Почтовый адрес: а/я 11, г. Москва, 127411  
Тел. +7 (495) 665-61-48  
факс +7 (495) 665-61-49  
E-mail: [navis@navis.ru](mailto:navis@navis.ru)  
<http://www.navis.ru>  
ОКПО 44473627, ОГРН 1027700456024  
ИНН/КПП 7725075060/773001001

УТВЕРЖДАЮ

Зам. Генерального директора

ЗАО «КБ НАВИС»



А.А. Шанин

2016 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

студента группы ЭР-25-10 Белянушкина А.С.

на тему: «Прием навигационного сообщения в некогерентном режиме»

Магистерская диссертация Белянушкина А.С. посвящена разработке и исследованию алгоритма приема навигационного сообщения в некогерентном режиме. Для решения данной задачи в работе синтезируется необходимый алгоритм, а также проводится его исследование при работе с сигналами ГЛОНАСС СТ и GPS L1 C/A.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основная часть работы содержит 64 страницы, приложения – 19 страниц.

Во введении указывается объект данной работы - НАП, формулируется цель и обосновывается актуальность работы, ставятся задачи, решение которых необходимо для достижения цели.

В первой главе приводится описание структур навигационных сигналов и навигационных сообщений сигналов ГЛОНАСС СТ и GPS L1 C/A. Описываются известные способы демодуляции сигнала в когерентном режиме и декодирования навигационного сообщения. Проводится



обоснование возможности демодуляции навигационного сообщения в некогерентном режиме.

Во второй главе производится постановка и решается задача синтеза алгоритма принятия навигационного сообщения в некогерентном режиме методами теории статистической радиотехники.

В третьей главе описывается имитационное моделирование синтезированного алгоритма на примере приема сигналов ГЛОНАСС СТ и GPS L1 C/A, приводятся результаты. Производится сравнение с традиционным когерентным алгоритмом.

В четвертой главе описывается процесс переноса алгоритма на язык программирования C++ с последующей реализацией в СПМО навигационного приемника. Описывается методика проведения натурального эксперимента по выявлению характеристик созданного алгоритма, а также приводятся результаты эксперимента. Производится сравнение характеристик когерентного и некогерентного алгоритмов.

В заключении приведены основные результаты работы. В приложении приведены тексты программ, используемых при выполнении работы.

К главным практическим результатам работы можно отнести:

1. Экспериментально показана возможность выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме.
2. Выявлены статистические характеристики приема навигационного сообщения в некогерентном режиме.

В процессе работы над диссертацией Белянушкин А.С. продемонстрировал навыки работы с лабораторным оборудованием, умение пользоваться аппаратом статистической радиотехники, освоил создание имитационных моделей в среде MATLAB и СПМО навигационного приемника.

К недостаткам данной работы можно отнести:



1. Проведенный в работе обзор литературы недостаточно обширен, в основном автор ограничивается использованием интерфейсных контрольных документов навигационных систем.

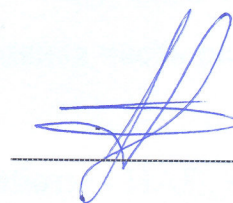
2. При проведении имитационного моделирования автор учитывает только флуктуационные ошибки слежения за частотой и фазой. Динамические ошибки, вызванные, например, нестабильностью опорного генератора, опускаются из рассмотрения. Как следствие, полученные при имитационном моделировании характеристики следует рассматривать как оценки сверху, приблизиться к которым можно при использовании высокостабильного опорного генератора и неподвижном потребителе.

3. Кривые вероятности верного выделения сообщения в некогерентном режиме по результатам имитационного моделирования и натурального эксперимента значительно отличаются. Можно предположить, что это следствие недостатков имитационной модели, описанных выше. Автор не объясняет полученного расхождения результатов.

Считаю, что магистерская диссертация Беянушкина А.С. соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным работам магистратуры. Она, в случае успешной защиты, заслуживает хорошей оценки, а диссертант – присвоения ему квалификации магистра техники и технологии.

РЕЦЕНЗЕНТ

Начальник лаборатории комплексированных систем ЗАО «КБ НАВИС», к.т.н.



И.А. Нагин

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

Институт ИРЭ Кафедра Радиотехнических систем

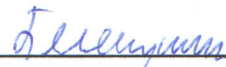
Направление 11.04.01 Радиотехника

**ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ  
ДИССЕРТАЦИЮ**

по программе подготовки магистров Радиотехнические системы связи  
и навигации

Тема Прием навигационного сообщения в некогерентном режиме

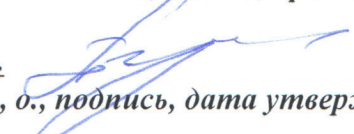
Время выполнения работы с 01.09.14 по 01.07.16

Студент Белянушкин А. С. ЭР -25 -10   
Фамилия, и., о. группа подпись

Научный руководитель доцент Корогодин И. В.  
должность, звание, фамилия, и., о.

Консультант \_\_\_\_\_  
должность, звание, фамилия, и., о.

Консультант \_\_\_\_\_  
должность, звание, фамилия, и., о.

Зав. кафедрой проф., Перов А.И.  08.09.14  
звание, фамилия, и., о., подпись, дата утверждения задания

Место выполнения научной работы кафедра Радиотехнических систем  
НИУ МЭИ

Москва

« 8 » сентября 20 14 г.



## 1.Обоснование выбора темы диссертационной работы

В последнее время широкое распространение получили приемники с повышенной чувствительностью и помехоустойчивостью, образующие класс High Sensivity приемников. Повышение характеристик обусловлено рядом технических решений, основное из которых — переход в некогерентному режиму приема сигнала. В некогерентном режиме не осуществляется слежение за фазой сигнала, за подстройку частоты опорного сигнала отвечает система слежения за частотой. В некогерентном режиме сохраняется возможность формировать кодовые измерения и осуществлять решение навигационной задачи, если ранее была выделена эфемеридная информация. Для приема навигационного сообщения, в частности эфемеридной информации, производится переключение в когерентный режим. Цель работы — исследование возможности выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме.

Научный руководитель \_\_\_\_\_ дата 08.09.2014

Студент Филиппов \_\_\_\_\_ дата 08.09.2014

## 2.Консультации по разделу

---

---

---

---

---

Подпись консультанта \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_

## 3.Консультации по разделу

---

---

---

---

---

Подпись консультанта \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_

#### 4. План работы над магистерской диссертацией

№ п/п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость в %
<b>I.</b>	<b>Теоретическая часть</b>		<b>30</b>
	Обзор литературы на тему приема навигационного сообщения и структуре сообщений ГНСС ГЛОНАСС и GPS		10
	Синтез алгоритма приема сообщения в некогерентном режиме		20
<b>II.</b>	<b>Экспериментальная часть</b>		<b>30</b>
	Моделирование приема сообщения в некогерентном режиме в среде MATLAB		10
	Разработка функции приема сообщения в некогерентном режиме на языке C++		10
	Оценка характеристик приема сообщения в некогерентном режиме с помощью натурального эксперимента		10
<b>III.</b>	<b>Публикации</b>		<b>10</b>
	Тезисы доклада на студенческой НТК	03.2015	5
	Тезисы доклада на студенческой НТК	03.2016	5
<b>IV.</b>	<b>Оформление диссертации</b>		<b>30</b>
	Подготовка введения, обзора литературы	11.2014	5
	Описание синтеза алгоритма приема НС	06.2014	5
	Описание модели и изложение результатов моделирования	11.2015	5
	Описание постановки эксперимента и его результатов	03.2016	5
	Подготовка презентации и предзащита	06.2016	10

#### 5. Рекомендуемая литература

5.1 Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003, 400 с., ил.

5.2 ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е переработанное и дополненное. — М.: Радиотехника, 2010, 800 с

5.3 Перов, А. И. Методы и алгоритмы оптимального приема сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем. — М.: Радиотехника, 2012. — 240 с.



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**6. Краткие сведения о студенте:**

**Домашний адрес** Московская область, Воскресенский район,

п.г.т. Белоозерский, ул. Молодежная, д.17, кв.85

**Телефон служебный** 8(916)038-27-21 **домашний** \_\_\_\_\_

***Примечание:*** задание брошюруется вместе с диссертацией и с отзывами  
руководителя и рецензентов.

## Аннотация

В работе исследована возможность выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме работы приемника на примере приема сигналов NAVSTAR GPS L1C/A, ГЛОНАСС L1 СТ, L2 СТ.

Проведен синтез алгоритма демодуляции для указанных навигационных сигналов.

С помощью компьютерного имитационного моделирования получены зависимости вероятности выделения структурного блока (слова для GPS, строки для ГЛОНАСС) сообщения от отношения сигнал/шум для синтезированного некогерентного алгоритма. Проведено сравнение с аналогичными результатами для традиционного алгоритма, работающего в когерентном режиме. При моделировании учитывалось влияние флуктуационных ошибок систем слежения за частотой и фазой.

Синтезированный алгоритм реализован в СПМО опытного образца навигационного приемника, разрабатываемого кафедрой в рамках ОКР. Для этого на языке C++ создана функция, принимающая в качестве входных аргументов корреляционные суммы. Составлен тест, показано, что работа C++-функции соответствует поведению аналогичной MATLAB-функции, использованной на этапе моделирования.

С помощью опытного образца НАП и имитатора навигационных сигналов проведено экспериментальное исследование характеристик разработанного алгоритма. Эксперименты проводились при использовании сигналов NAVSTAR GPS L1 C/A. В ходе эксперимента получены графики выборочной вероятности выделения слов GPS сообщения от отношения сигнал/шум при использовании традиционного когерентного алгоритма и синтезированного некогерентного.



## Оглавление

Введение.....	10
1 Особенности приёма навигационного сообщения сигналов глонасс и GPS13	
1.1 Прием навигационного сообщения сигналов ГЛОНАСС СТ.....	13
1.1.1 Структура навигационного сигнала .....	13
1.1.2 Способ демодуляции.....	14
1.1.3 Структура сообщения .....	16
1.1.4 Способ декодирования.....	19
1.2 Приём навигационного сообщения сигналов GPS C/A.....	21
1.2.1 Структура сигнала .....	21
1.2.2 Демодуляция в когерентном режиме, описанная в ИКД .....	21
1.2.3 Структура сообщения .....	22
1.2.4 Декодирование сообщения .....	23
1.2.5 Разбор навигационного сообщения .....	26
1.3 Обоснование возможности демодуляции сигналов ГЛОНАСС СТ и GPS C/A в некогерентном режиме .....	27
2 Синтез алгоритма приёма сообщения в некогерентном режиме.....	28
2.1 Постановка задачи.....	28
2.2 Вывод алгоритма .....	28
2.3 Анализ полученных результатов .....	32
2.4 Сравнение полученного алгоритма с алгоритмом приема сообщения в когерентном режиме .....	33
3 Моделирование приёма сообщения в некогерентном режиме в среде MATLAB .....	35
3.1 Постановка задачи.....	35
3.2 Математическая модель приёма навигационного сообщения.....	35
3.2.1 Условия моделирования .....	38
3.2.2 Расчет дисперсий флуктуационных ошибок оценок фазы и частоты .....	38
3.3 Результаты моделирования .....	41
3.3.1 Сигнал ГЛОНАСС СТ.....	41
3.3.2 Сигнал GPS L1 C/A .....	45
3.3.3 Выводы по главе .....	49
4 Экспериментальное исследование алгоритма .....	50
4.1 Реализация алгоритма некогерентного приема сообщения в НАП ...	50

4.2	Методика проведения натурального эксперимента .....	53
4.3	Результаты натурального эксперимента.....	57
	Заключение .....	61
	Список литературы .....	63
	Приложение А. Имитационная модель.....	65
	Приложение Б. Функция демодуляции сообщения в некогерентном режиме	70
	Приложение В. Исходные коды скрипта настройки имитатора сигнала.....	77
	Приложение Г. Исходные коды скрипта обработки пакета 0x0042 .....	78



## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АКФ	- автокорреляционная функция
АП	- аппаратура потребителя
АПВ	- апостериорная плотность вероятности
АЦП	- аналого-цифровое преобразование
БГШ	- белый гауссовский шум
ГДК	- генератор дальномерного кода
ГНСС	- глобальная навигационная спутниковая система
КА	- космический аппарат
НАП	- навигационная аппаратура потребителя
НКА	- навигационный космический аппарат
НС	- навигационный спутник
ОГ	- опорный генератор
ПСП	- псевдослучайная последовательность
СКО	- среднеквадратическая ошибка
СПМО	- специальное программно-математическое обеспечение
ССЗ	- схема слежения за задержкой
ССФ	- схема слежения за фазой
ССЧ	- схема слежения за частотой
СТ	- стандартная точность
ФАП	- фазовая автоподстройка
ЦИ	- цифровая информация
BPSK	- Binary Phase-Shift Keying
GPS	- Global Positioning System
SCPI	- Standard Commands for Programmable Instruments
SNR	- Signal to Noise Ratio (отношение сигнал/шум)
TTF	- Time To First Fix (время до получения первого решения)

## **ВВЕДЕНИЕ**

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) широко используются в хозяйственной деятельности, военном деле и т.д. для определения положения и уточнения времени. Распространение СРНС получили благодаря простоте использования, высокой точности абсолютного позиционирования, низких затрат со стороны потребителя.

В составе СРНС можно выделить три основных сегмента (подсистемы):  
космический сегмент, состоящий из навигационных спутников;  
сегмент управления (наземный командно-измерительный комплекс);  
сегмент потребителей (подсистема навигационной аппаратуры потребителей).

Объектом данной работы является навигационная аппаратура потребителей (НАП) и алгоритмы обработки навигационных радиосигналов, ею используемые. НАП предоставляет сервис СРНС конкретному конечному пользователю. Для этого она осуществляет прием сигналов навигационных космических аппаратов (НКА), оценивает задержку распространения этих сигналов, выделяет транслируемое сообщение и на основе полученных данных решает в том или ином виде навигационную задачу – определяет местоположение, скорость, время и ориентацию объекта размещения.

Для решения навигационной задачи НАП необходимы данные, передаваемые в навигационном сообщении. Носителем навигационного сообщения выступает всё тот же навигационный сигнал.

В состав навигационного сообщения входит оперативная и неоперативная информация.

Оперативная информация - это оцифровка меток времени НКА, сдвиг шкалы времени НКА относительно шкалы времени системы, относительное отличие несущей частоты излучаемого навигационного радиосигнала от номинального значения, эфемериды НКА и другие параметры. Оперативная информация относится к тому НКА, с которого был излучен данный сигнал.



Эта информация непосредственно используется для решения навигационной задачи.

Неоперативная информация – альманах, по которому НАП производит прогнозирование видимости НКА.

Широко известны, хорошо изучены и повсеместно используются алгоритмы выделения навигационного сообщения в когерентном режиме работы НАП. В этом режиме осуществляется слежение за фазами несущей частоты навигационных сигналов.

В последнее время широкое распространение получили приемники с повышенной чувствительностью и помехоустойчивостью, образующие класс High Sensivity приемников. Повышение характеристик обусловлено рядом технических решений, основное из которых — переход к некогерентному режиму приема сигнала. В некогерентном режиме не осуществляется слежение за фазой сигнала, за подстройку частоты опорного сигнала отвечает система слежения за частотой, поэтому традиционные алгоритмы выделения навигационного сообщения неприменимы. Цель работы — исследование возможности и характеристик выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме.

В качестве используемых навигационных сигналов полагаются сигналы NAVSTAR GPS L1 C/A и ГЛОНАСС L1СТ, L2СТ.

Для достижения поставленной цели требуется найти решение ряда задач:

1. Провести обзор особенностей выделения навигационного сообщения применительно к указанным навигационным сигналам.

2. Синтезировать алгоритм выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме. Провести аналитический расчет характеристик алгоритма.

3. Определить характеристики синтезированного алгоритма методом компьютерного имитационного моделирования. Сравнить результаты с характеристиками приема в когерентном режиме.

4. Реализовать разработанный алгоритм в виде соответствующей функции специального программно-математического обеспечения (СПМО) НАП.

5. Провести экспериментальное исследование вероятности верного выделения навигационного сообщения НАП в когерентном и некогерентном режиме.

# 1 ОСОБЕННОСТИ ПРИЁМА НАВИГАЦИОННОГО СООБЩЕНИЯ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS

## 1.1 Прием навигационного сообщения сигналов ГЛОНАСС СТ

### 1.1.1 Структура навигационного сигнала

Навигационный радиосигнал, передаваемый каждым НКА системы ГЛОНАСС на собственной несущей частоте в поддиапазонах L1 и L2, является многокомпонентным фазоманипулированным сигналом. Фазовая манипуляция несущей осуществляется на  $\pi$  радиан с максимальной погрешностью не более  $\pm 0,2$  радиана [1].

Математическая модель радиосигнала следующая:

$$s(t) = A \cos\left(\omega_0 t + \left(\mathcal{G}_{HC}(t) + \mathcal{G}_{DK}(t)\right)\pi + \varphi_0\right) \quad (1.1)$$

где  $A$  - амплитуда сигнала,  $\omega_0$  - несущая частота,  $\mathcal{G}_{HC}(t)$  - функция фазовой манипуляции сигнала навигационным сообщением,  $\mathcal{G}_{DK}(t)$  - функция фазовой манипуляции сигнала дальномерным кодом,  $\varphi_0$  - начальная фаза сигнала.

Фаза несущего колебания поддиапазона L1 передаваемого НКА «Глонасс» и фазы несущих колебаний поддиапазонов L1 и L2 передаваемого НКА «Глонасс-М» модулируется двоичной последовательностью, образованной суммированием по модулю два псевдослучайного (ПС) дальномерного кода, цифровой информации навигационного сообщения и вспомогательного колебания типа меандр.

Основой для формирования всех перечисленных компонентов сигнала является бортовой стандарт частоты.

Псевдослучайный дальномерный код представляет собой последовательность максимальной длины регистра сдвига (М-последовательность) с периодом 1 мс и скоростью передачи символов 511 кбит/с.



Цифровая информация навигационного сообщения подразделяется на оперативную и неоперативную информацию.

Оперативная информация относится к тому НКА, с борта которого передается данный навигационный радиосигнал. Неоперативная информация (альманах системы) относится ко всем НКА, входящим в состав ПКА.

Цифровая информация передается со скоростью 50 бит/с.

### 1.1.2 Способ демодуляции

Выделение символов  $\mathcal{S}_{НС}$  осуществляется в когерентном режиме работы приёмника.

Из общей теории оптимального приема следует, что в случае модуляции сигнала НС только символами навигационного сообщения (длительностью 20 мс) для оценки информационного символа необходимо сформировать сигнал, аналогичный синфазной компоненте коррелятора на длительности информационного символа (20 мс). Для формирования такого сигнала прежде всего необходимо осуществить синхронизацию по границам бит информационных символов (битовую синхронизацию).

В СРНС ГЛОНАСС навигационное сообщение (символы которого следуют с частотой 50 бит/с) складывается по mod 2 с символами М-кода, следующего с частотой 100 Гц. Поэтому, перед выделением навигационного сообщения, необходимо выделить символы М-кода, для чего следует также выполнять битовую синхронизацию М-кода.

Возьмем время накопления корреляторов АП  $T=1$  мс. Рассмотрим отсчеты синфазной компоненты коррелятора  $I_k$  (следующие с частотой 1 кГц).

Алгоритм выделения символов навигационного сообщения, основанный на обработке отсчетов  $I_k$ , условно представлен функциональной схемой на рисунке 1.1.

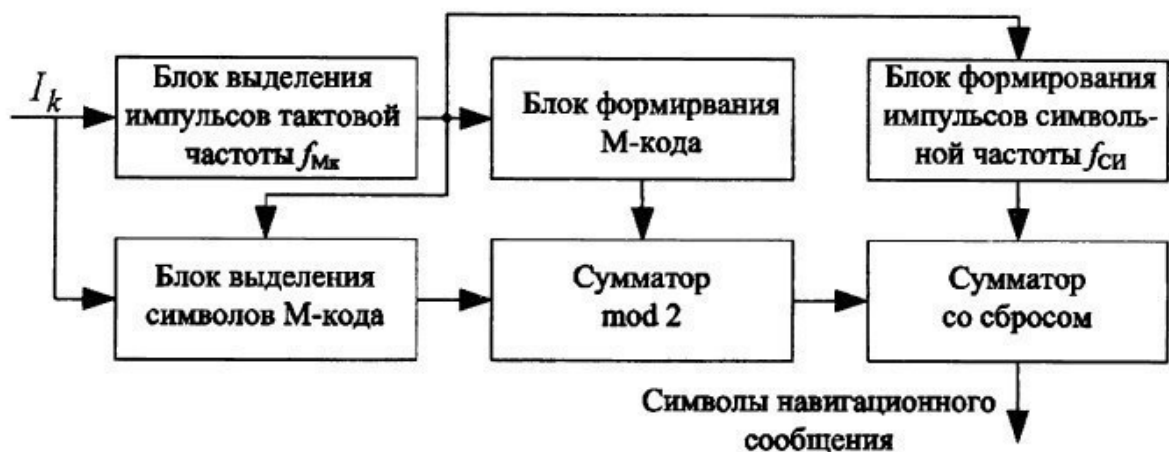


Рисунок 1.1 - Выделение символов навигационного сообщения

Отсчеты  $I_k$  с выхода коррелятора поступают в блок выделения импульсов тактовой частоты М-кода ( $f_{M-k} = 50$  Гц). Здесь фиксируются моменты смены знака отсчетов и после определенной статистической обработки формируются импульсы тактовой частоты 50 Гц, привязанные к моменту смены знака символов М-кода. Сформированные импульсы поступают:

в блок формирования М-кода («дискретный генератор» М-кода), который формирует последовательность  $+1$  или  $-1$ , чередующихся с частотой 50 Гц (т.е. в рассматриваемом варианте с  $T = 1$  мс формируется по десять  $+1$  или  $-1$ );

в блок формирования импульсов символьной частоты ( $f_{СИ} = 100$  Гц), которые соответствуют границам символов навигационного сообщения (синхронизация по символам навигационного сообщения);

в блок выделения символов М-кода, в котором формируются «пачки» отсчетов  $I_k$ , соответствующие одному символу М-кода; границы символов задаются импульсами тактовой частоты 50 Гц, поступающими с одноименного блока.

Выделенные символы М-кода («пачки» отсчетов  $I_k$ ) поступают в сумматор по mod 2, где они складываются с импульсами тактовой частоты, в

результате чего снимается модуляция навигационного сообщения М-кодом. Поэтому на выходе сумматора формируются отсчеты  $\hat{I}_k$ , в которых присутствует модуляция только навигационным сообщением.

Отсчеты  $\hat{I}_k$  поступают в сумматор со сбросом, интервал суммирования в котором определяется импульсами символьной частоты, которые привязаны к границам символам навигационного сообщения. Таким образом, в данном сумматоре производится дополнительное сглаживание флуктуационной составляющей отсчетов  $\hat{I}_k$  на интервале времени 20 мс. На выходе сумматора формируется последовательность  $\pm 1$ , следующих с частотой 50 Гц, которая в дальнейшем подвергается декодированию с целью извлечения эфемеридной и другой информации, переданной в радиосигнале НС.[1]

### 1.1.3 Структура сообщения

Передаваемое в навигационных радиосигналах НКА «Глонасс» и «Глонасс-М» навигационное сообщение предназначено для проведения потребителями навигационных определений, привязки к точному времени и для планирования сеансов навигации.

По своему содержанию навигационное сообщение подразделяется на оперативную и неоперативную информацию.

Оперативная информация относится к тому НКА, с борта которого передается данный навигационный радиосигнал и содержит:

оцифровку меток времени НКА;

сдвиг шкалы времени НКА относительно шкалы времени системы ГЛОНАСС;

относительное отличие несущей частоты излучаемого навигационного радиосигнала от номинального значения;

эфемериды НКА и другие параметры.

Неоперативная информация содержит альманах системы, включающий в себя:



данные о состоянии всех НКА системы (альманах состояния);  
сдвиг шкалы времени каждого НКА относительно шкалы времени системы ГЛОНАСС (альманах фаз);  
параметры орбит всех НКА системы (альманах орбит);  
сдвиг шкалы времени системы ГЛОНАСС относительно UTC(SU) и другие параметры.

Навигационное сообщение передается в виде потока цифровой информации, закодированной по коду Хемминга и преобразованной в относительный код. Структурно поток ЦИ формируется в виде непрерывно повторяющихся суперкадров. Суперкадр состоит из нескольких кадров, кадр состоит из нескольких строк ЦИ.

Границы строк, кадров и суперкадров различных НКА синхронны с погрешностью не более 2 мс.

Суперкадр имеет длительность 2,5 мин и состоит из 5 кадров длительностью 30 с. Каждый кадр состоит из 15 строк длительностью 2 с.

В пределах каждого суперкадра передается полный объем неоперативной информации (альманах) для всех 24 НКА системы ГЛОНАСС.

Навигационный кадр является частью суперкадра. Каждый навигационный кадр имеет длительность 30 с и состоит из пятнадцати строк длительностью 2 с каждая.

В пределах каждого кадра передается полный объем оперативной ЦИ для данного НКА и часть неоперативной ЦИ.

Информационная строка является структурным элементом навигационного кадра. Структура информационной строки показана на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Структура информационной строки

Каждая строка содержит двоичные символы ЦИ и метку времени. Длительность строки ЦИ равна 2 с, и из них 0,3 с в конце строки занимает МВ в виде укороченной ПС последовательности ПСПМВ, состоящей из 30-ти символов длительностью 10 мс. Остальную часть строки (1,7 с) занимает собственно ЦИ с символьной частотой 50 Гц, сложенная по модулю два с меандром двойной символьной частоты 100 Гц (бидвоичный код). Таким образом, каждая строка содержит 85 двоичных символов ЦИ. Нумерация позиций символов в строке осуществляется справа налево. Наряду с информационными символами (позиции 84-9) в каждой строке ЦИ передаются 8 проверочных символов (позиции 1-8) кода Хемминга (КХ), позволяющие производить проверку достоверности символов ЦИ в строке. Код Хемминга имеет кодовое расстояние равное четырем. Разделение строк ЦИ осуществляется с помощью меток времени (МВ). Слова ЦИ записываются старшими разрядами слева. Передача ЦИ осуществляется старшими разрядами вперед. В каждой строке последний символ (85-я позиция) является "холостым", он необходим для реализации последовательного относительного кода при передаче ЦИ по радиолинии. В качестве "холостого" символа принят "0".

### 1.1.4 Способ декодирования

Проверка строк кадра, содержащих цифровую информацию, заключается в исправлении одиночных ошибок (неверен один разряд строки) и обнаружении двойных (и большего четного числа) ошибок. Каждая строка ЦИ представляет собой 85-разрядный код, причем старшие 77 разрядов содержат информационные символы  $(b_{85}, b_{84}, \dots, b_{10}, b_9)$ ; а младшие 8 разрядов - проверочные символы  $(\beta_8, \beta_7, \dots, \beta_2, \beta_1)$ .

Для исправления однократных ошибок в 85-разрядных кодовых строках формируются контрольные суммы  $C_1, C_2, \dots, C_7$ , а для обнаружения двукратных (и большего четного числа) ошибок формируется контрольная сумма  $C_\Sigma$ . Правила формирования контрольных сумм  $C_1, C_2, \dots, C_7$  и  $C_\Sigma$  при проверке достоверности информации в строке приведены в таблице Таблица 1.1 Формирование контрольных сумм при проверке достоверности информации в строке (пример алгоритма)

Устанавливаются следующие правила исправления одиночных и обнаружения кратных искажений символов информации:

а) строка считается неискаженной, если все контрольные суммы  $C_1, \dots, C_7$  и сумма  $C_\Sigma$  равны нулю, либо лишь одна из контрольных сумм  $C_1, \dots, C_7$  равна единице и при этом  $C_\Sigma = 1$ ;

б) если две или более контрольных сумм  $C_1, \dots, C_7$  равны единице и  $C_\Sigma = 1$ , то символ  $b_{икор}$  исправляется на противоположный символ в разряде с порядковым номером  $икор = C_7 \cdot C_6 \cdot C_5 \cdot C_4 \cdot C_3 \cdot C_2 \cdot C_1 + 8 - K$ , при условии, что  $икор \leq 85$ , где

$C_7 \cdot C_6 \cdot C_5 \cdot C_4 \cdot C_3 \cdot C_2 \cdot C_1$  - двоичное число, сформированное из контрольных сумм  $C_1, \dots, C_7$  (все двоичные числа записаны младшими разрядами вправо);

$K$  - номер старшей из отличных от нуля контрольных сумм.



Если по формуле для  $i\text{кор}$  получается  $i\text{кор} > 85$ , то фиксируется факт наличия нечетного числа кратных ошибок и фраза не исправляется, а бракуется (стирается);

в) если хотя бы одна из контрольных сумм  $C_1, \dots, C_7$  равна единице, а  $C_\Sigma = 0$ , либо все суммы  $C_1, \dots, C_7$  равны нулю, но  $C_\Sigma = 1$ , то фиксируется факт наличия кратных ошибок и фраза бракуется.

Таблица 1.1 Формирование контрольных сумм при проверке достоверности информации в строке (пример алгоритма)

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_8$ - проверочные символы кода Хэмминга (1-8); $b_{77}, b_{76}, \dots, b_2, b_1$ - информационные символы (9-85); $C_1, C_2, \dots, C_7, C_\Sigma$ - контрольные суммы;	
$C_1 = \beta_1 \oplus [\sum_i b_i]_{\text{mod } 2}$ <p><math>i = 9, 10, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 65, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 84.</math></p>	
$C_2 = \beta_2 \oplus [\sum_j b_j]_{\text{mod } 2}$ <p><math>j = 9, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 25, 26, 29, 30, 33, 34, 36, 37, 40, 41, 44, 45, 48, 49, 52, 53, 56, 57, 60, 61, 64, 65, 67, 68, 71, 72, 75, 76, 79, 80, 83, 84.</math></p>	
$C_3 = \beta_3 \oplus [\sum_k b_k]_{\text{mod } 2}$ <p><math>k = 10-12, 16-19, 23-26, 31-34, 38-41, 46-49, 54-57, 62-65, 69-72, 77-80, 85.</math></p>	
$C_4 = \beta_4 \oplus [\sum_l b_l]_{\text{mod } 2}$ <p><math>l = 13-19, 27-34, 42-49, 58-65, 73-80.</math></p>	
$C_5 = \beta_5 \oplus [\sum_m b_m]_{\text{mod } 2}$ <p><math>m = 20-34, 50-65, 81-85.</math></p>	
$C_6 = \beta_6 \oplus [\sum_{n=35}^{65} b_n]_{\text{mod } 2}$	$C_7 = \beta_7 \oplus [\sum_{p=66}^{85} b_p]_{\text{mod } 2}$
$C_\Sigma = [\sum_{q=1}^8 \beta_q]_{\text{mod } 2} \oplus [\sum_{q=9}^{85} b_q]_{\text{mod } 2}$	

## 1.2 Приём навигационного сообщения сигналов GPS C/A

### 1.2.1 Структура сигнала

GPS C/A является сигналом ФМ-2 (англ. – BPSK), модулированным отдельной последовательностью бит. Последовательностью бит является суммирование по модулю два псевдослучайного дальномерного кода (C/A – code) и навигационного сообщения (D(t)). Скорость передачи навигационного сообщения составляет 50 бит/с. Математическая модель сигнала приведена в формуле (1.1).

### 1.2.2 Демодуляция в когерентном режиме, описанная в ИКД

Навигационное сообщение  $\mathcal{G}_{HC}$  передается в радиосигнале

$$y(t_j) = \left| s_1(t_j, \tilde{\tau}_1, \tilde{f}_{D1}) + n_{j1}, \quad s_2(t_j, \tilde{\tau}_2, \tilde{f}_{D2}) + n_{j2}, \quad \dots, \quad s_n(t_j, \tilde{\tau}_n, \tilde{f}_{Dn}) + n_{jn} \right|^T \quad (1.2)$$

где  $y(t_j)$  - вектор цифровых сигналов на выходе ВЧ-приемника, состоящий из сигналов каждого из  $n$  видимых НС,  $n_{jl}$ ,  $l = \overline{1, n}$  - независимые дискретные БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и равными дисперсиями  $\sigma_n^2 = N_0 / (2T_d)$ , передается путем модуляции его фазы двоичными символами длительностью 20 мс, формирование которых синхронизировано с циклами формирования дальномерного кода. Выделение символов  $\mathcal{G}_{HC}$  осуществляется при когерентном режиме работы приемника. После захвата сигнала на сопровождение по дальномерному коду приемник входит в синхронизм, в том числе по тактам приема символов навигационного сообщения. После этого символы навигационного сообщения могут быть выделены в соответствии с алгоритмом

$$\hat{\mathcal{G}}_{HC} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{v=1}^N y(t_{p-1,v}, \lambda_{p-1,v}) h_{ок}(t - \tau_{p-1,v}) \cos(\omega_0 t_{p-1,v} + \tilde{\varphi}_{p-1,v}) > 0, \\ 0, & \text{если } \sum_{v=1}^N y(t_{p-1,v}, \lambda_{p-1,v}) h_{ок}(t - \tau_{p-1,v}) \cos(\omega_0 t_{p-1,v} + \tilde{\varphi}_{p-1,v}) < 0. \end{cases} \quad (1.3)$$

В (1.3) суммирование по индексу  $\nu$  осуществляется на интервале, равном длительности символа навигационного сообщения  $T_{nc} = NT_d = 20$  мс. Поэтому моменты времени  $t_p$  отстоят друг от друга также на 20 мс, т.е.

$$t_p - t_{p-1} = T_{nc}.$$

Отметим, что в соответствии с (1.3) оценка символов навигационного сообщения формируется с использованием экстраполированной оценки фазы  $\tilde{\varphi}_{p-1,\nu}$ , формируемой в схеме слежения за фазой сигнала.

### 1.2.3 Структура сообщения

Как показано на рисунке, структура сообщения состоит из кадра, длиной 1500 бит. Кадр содержит в себе 5 подкадров длиной 300 бит каждый. Подкадры 4 и 5 должны быть связаны 25 раз каждый, потому что полные данные сообщения требуют передачи 25 полных кадров. 25 вариантов 4 и 5 подкадров должны быть переданы как страницы с 1 по 25 каждого подкадра. Каждый подкадр состоит из 10 слов, каждое из которых длиной 30 бит. Старший значащий бит должен передаваться первым.

Каждый подкадр и/или страница подкадра должны содержать слово телеметрии (TLM) и передающее слово (HOW), сгенерированной спутником и должно начинаться с пары TLM/HOW. TLM должно передаваться первым, немедленно следует HOW. HOW должно следовать за восьмью словами данных. Каждое слово в каждом кадре должно содержать бит четности. На рисунке 1.3 изображена структура слов TLM и HOW

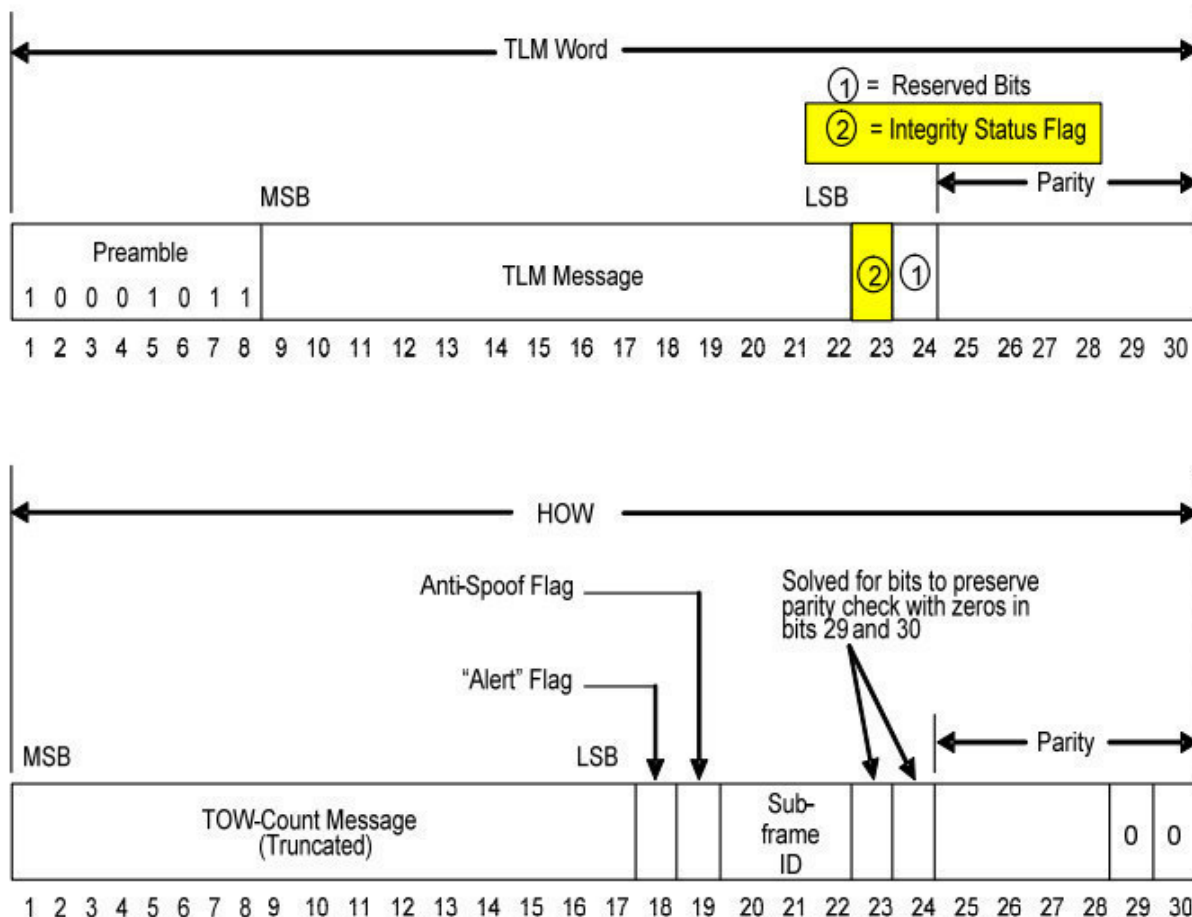


Рисунок 1.3 – Структура слов TLM и HOW

#### 1.2.4 Декодирование сообщения

Что касается пользователей, то, существует несколько вариантов для декодирования и обнаружения ошибок. Рисунок 1.4 представляет собой диаграмму примера потока, который определяет один из способов восстановления данных ( $D_n$ ) и проверку четности. Бит четности  $D_{30}^*$  используется для восстановления исходных данных. Биты четности  $D_{29}^*$  и  $D_{30}^*$  вместе с восстановленными исходными данными ( $d_n$ ), сложены по mod2 в соответствии с уравнениями, представленными в таблице 1.2 для бит  $D_{25}...D_{30}$ , которые предоставляют четность для проверки с переданными битами четности  $D_{25}...D_{30}$ .



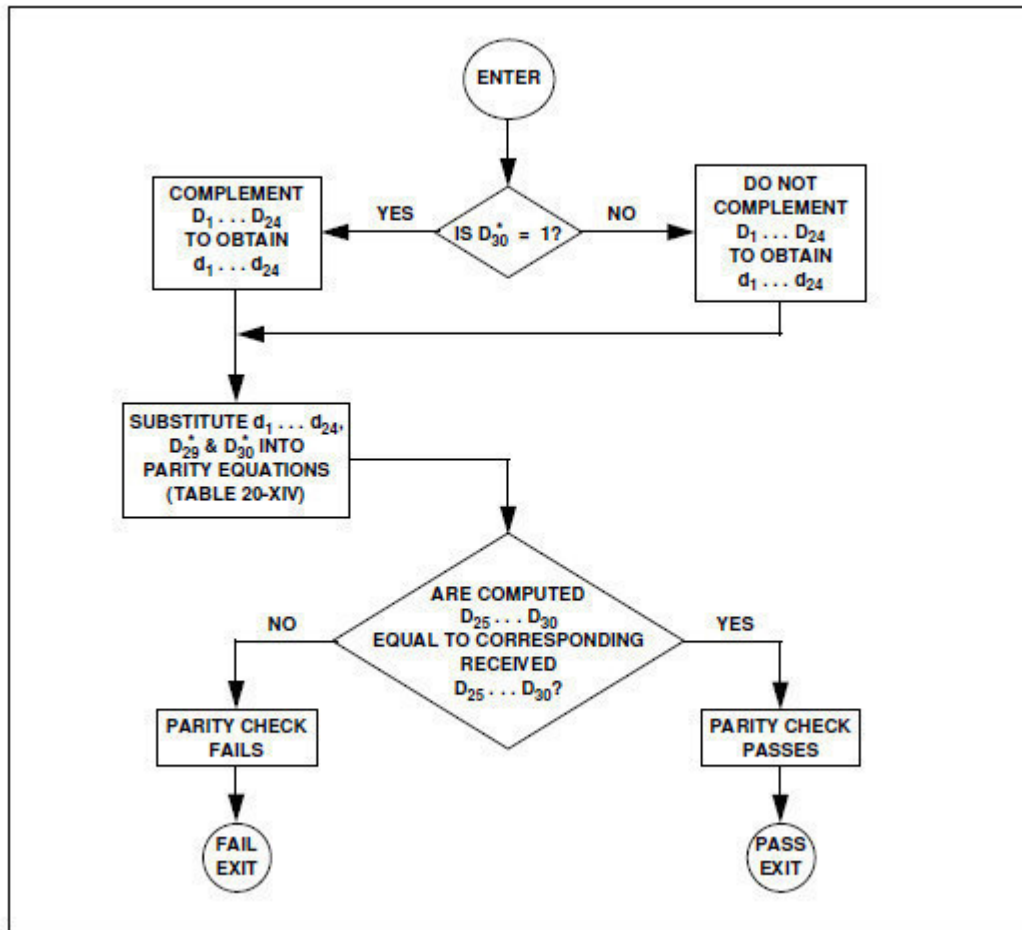


Рисунок 1.4 - Пример блок-схемы по реализации пользовательского алгоритма проверки четности

Таблица 1.2 Расчет контрольной суммы

$D_1$	=	$d_1 \oplus D_{30}^*$
$D_2$	=	$d_2 \oplus D_{30}^*$
$D_3$	=	$d_3 \oplus D_{30}^*$
•		•
•		•
•		•
•		•
$D_{24}$	=	$d_{24} \oplus D_{30}^*$
$D_{25}$	=	$D_{29}^* \oplus d_1 \oplus d_2 \oplus d_3 \oplus d_5 \oplus d_6 \oplus d_{10} \oplus d_{11} \oplus d_{12} \oplus d_{13} \oplus d_{14} \oplus d_{17} \oplus d_{18} \oplus d_{20} \oplus d_{23}$
$D_{26}$	=	$D_{30}^* \oplus d_2 \oplus d_3 \oplus d_4 \oplus d_6 \oplus d_7 \oplus d_{11} \oplus d_{12} \oplus d_{13} \oplus d_{14} \oplus d_{15} \oplus d_{18} \oplus d_{19} \oplus d_{21} \oplus d_{24}$
$D_{27}$	=	$D_{29}^* \oplus d_1 \oplus d_3 \oplus d_4 \oplus d_5 \oplus d_7 \oplus d_8 \oplus d_{12} \oplus d_{13} \oplus d_{14} \oplus d_{15} \oplus d_{16} \oplus d_{19} \oplus d_{20} \oplus d_{22}$
$D_{28}$	=	$D_{30}^* \oplus d_2 \oplus d_4 \oplus d_5 \oplus d_6 \oplus d_8 \oplus d_9 \oplus d_{13} \oplus d_{14} \oplus d_{15} \oplus d_{16} \oplus d_{17} \oplus d_{20} \oplus d_{21} \oplus d_{23}$
$D_{29}$	=	$D_{30}^* \oplus d_1 \oplus d_3 \oplus d_5 \oplus d_6 \oplus d_7 \oplus d_9 \oplus d_{10} \oplus d_{14} \oplus d_{15} \oplus d_{16} \oplus d_{17} \oplus d_{18} \oplus d_{21} \oplus d_{22} \oplus d_{24}$
$D_{30}$	=	$D_{29}^* \oplus d_3 \oplus d_5 \oplus d_6 \oplus d_8 \oplus d_9 \oplus d_{10} \oplus d_{11} \oplus d_{13} \oplus d_{15} \oplus d_{19} \oplus d_{22} \oplus d_{23} \oplus d_{24}$
Where		
		$d_1, d_2, \dots, d_{24}$ are the source data bits;
		the symbol $\star$ is used to identify the last 2 bits of the previous word of the subframe;
		$D_{25}, D_{26}, \dots, D_{30}$ are the computed parity bits;
		$D_1, D_2, \dots, D_{29}, D_{30}$ are the bits transmitted by the SV;
		$\oplus$ is the "modulo-2" or "exclusive-or" operation.

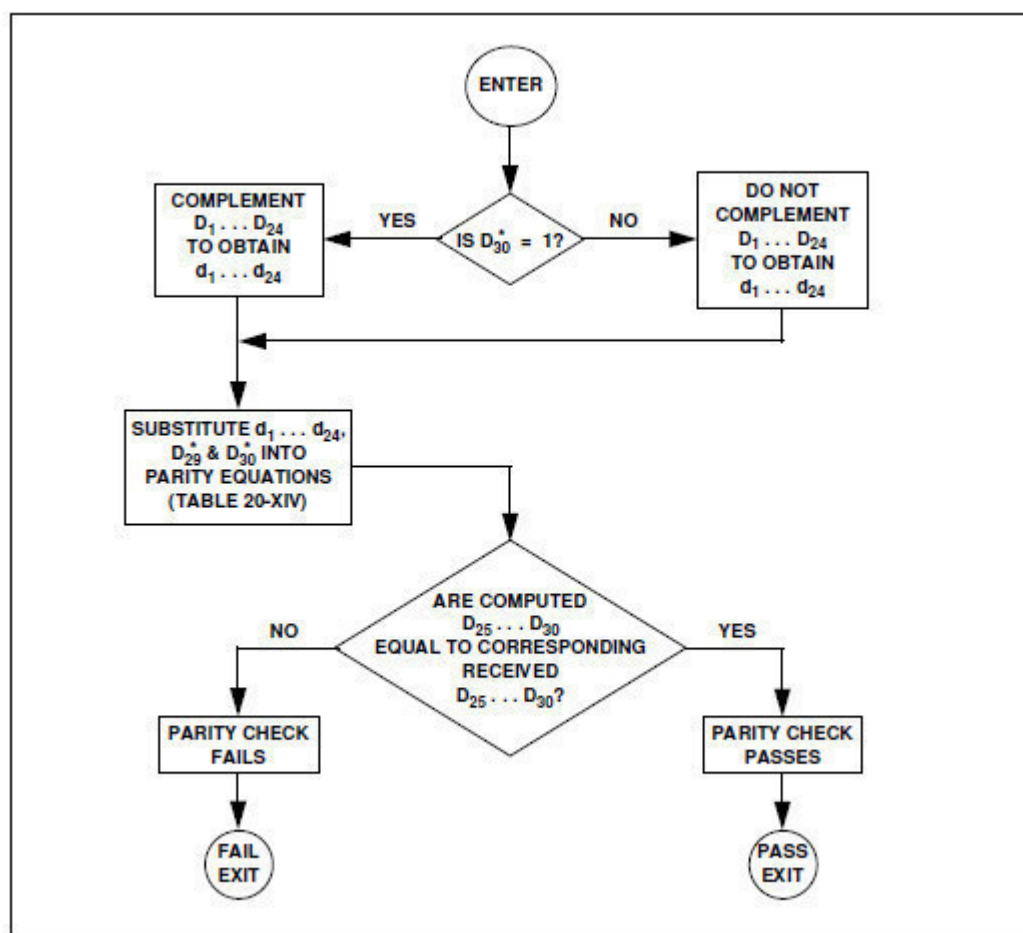


Рисунок 1.5 - Пример блок-схемы по реализации пользовательского алгоритма проверки четности

### 1.2.5 Разбор навигационного сообщения

Каждое сообщение начинается с преамбулы – 10001011 следом идет 6 бит номера PRN от конкретного спутника, 6 бит сообщения это ID со значениями от 0 (000000) до 1 (111111) и 17 бит времени недели (TOW).

Флаг “alert” 1 говорит, что данные могут быть хуже, чем указывается в соответствующих типов сообщений, и что он должен использовать на свой страх и риск. Значение TOW передается умноженным на 6. Оно представляет время спутника в секундах и начинается со следующего 6 секундного сообщения. (Рисунок 1.6)

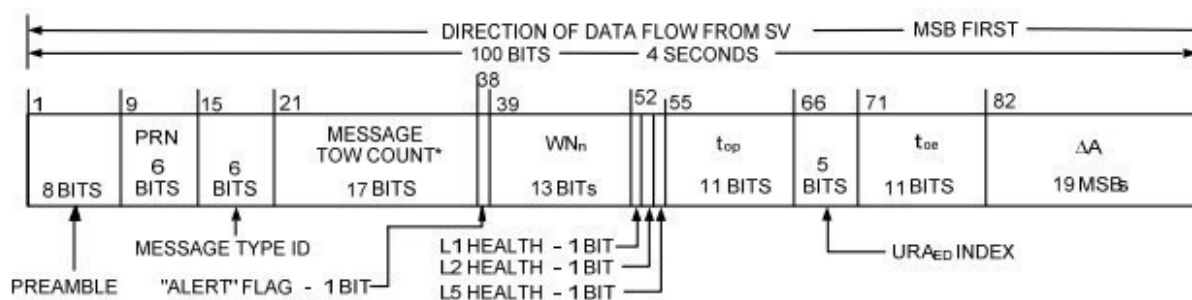


Рисунок 1.6 – Поток данных от спутника

### 1.3 Обоснование возможности демодуляции сигналов ГЛОНАСС СТ и GPS C/A в некогерентном режиме

ГЛОНАСС и GPS используют разновидности фазовой манипуляции.

Согласно ИКД, в СРНС ГЛОНАСС используется сигнал с относительной фазовой манипуляцией ФМ-2. То есть это фазовая манипуляция относительно предыдущего символа.

Согласно ИКД, в СРНС GPS – завуалировано относительно последнего бита предыдущего сообщения (см. раздел 1.2.4).

Поэтому возникает задача демодулировать либо прямую, либо инвертированную последовательность символов.

Из выше сказанного следует, что точное значение фазы нас не интересует, а интересует только ее относительное изменение. В некогерентном режиме при малых ошибках слежения фаза на малых интервалах времени стабильна, поэтому эти изменения можно отследить.

Задача: необходимо демодулировать сообщение в некогерентном режиме, где под сообщением понимаем либо прямую, либо инвертированную последовательность символов. Такая возможность есть, так как существует алгоритм демодуляции сигнала ОФМ2, это алгоритм приведен в [14].

## 2 СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ПРИЁМА СООБЩЕНИЯ В НЕКОГЕРЕНТНОМ РЕЖИМЕ

### 2.1 Постановка задачи

Имеем реализацию  $y$

$$y = S(t_i, b_1, \mu) + n_i \quad (2.1)$$

Где  $S$ - сигнал, принимаемый на двух интервалах (рисунок 2.1).  $n_i$  - нормальный белый шум с  $(0, \sigma^2)$ .

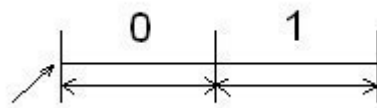


Рисунок 2.1 – Диаграмма потока бит

$$S = \begin{cases} A \cos(\omega t_i + \tilde{\varphi}_0) h(t_i - \tau) b_0, & 0 < t_i < T_s \\ A \cos(\omega t_i + \tilde{\varphi}_0) h(t_i - \tau) b_1, & T_s \leq t_i < 2T_s \end{cases} \quad (2.2)$$

Где  $A$ - амплитуда сигнала,  $h(t_i - \tau)$  дальномерный код,  $\tau$ - задержка сигнала,  $b_0, b_1$ - символы навигационного сообщения,  $\omega = \omega_0 + \omega_d$ , где  $\omega_0$ - несущая частота,  $\omega_d$ - доплеровское смещение частоты.

В начальный момент времени  $b_0 = 1$ . В другие моменты времени  $b_0, b_1 = \{1, -1\}$ .

Значение параметров  $A, \omega, \tau$  - известно. Значение оценки начальной фазы  $\tilde{\varphi}_0$  распределено по равномерному закону на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

Необходимо найти оценку значения параметра  $b_1$ .

### 2.2 Вывод алгоритма

Найдем оценку максимального правдоподобия параметра  $b_1$

Апостериорная плотность вероятности для каждого момента времени на интервале  $[0 < t_i \leq 2T_s]$



$$p(y_i | b_1, \tilde{\varphi}_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(y_i - S_i(b_1, \tilde{\varphi}_0))^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (2.3)$$

Так как значения шума  $n_i$  в разные моменты времени  $t_i$  независимы, то формула для апостериорной плотности вероятности на всем интервале будет следующая

$$\begin{aligned} p(y_1, y_2, \dots, y_i, y_{i+1}, \dots, y_L | b_1) &= p(y_1 | b_1) p(y_2 | b_1) \dots p(y_i | b_1) \dots p(y_L | b_1, \tilde{\varphi}_0) = \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^L} \exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^L (y_i - S_i(b_1, \tilde{\varphi}_0))^2}{2\sigma_n^2}\right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

В общем виде в рассматриваемом случае апостериорная плотность вероятности запишется в виде

$$\begin{aligned} p(b_1 | y_1^L) &= \int_{-\pi}^{\pi} p(b_1, \tilde{\varphi}_0 | y_1^L) d\tilde{\varphi}_0 = \int_{-\pi}^{\pi} c p_{ap}(b_1) p_{ap}(\tilde{\varphi}_0) \rho(y_1^L | b_1, \tilde{\varphi}_0) d\tilde{\varphi}_0 = \\ &= c p_{ap}(b_1) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \rho(y_1^L | b_1, \tilde{\varphi}_0) d\tilde{\varphi}_0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Где условное отношение правдоподобия  $\rho(y_1^L | b_1, \tilde{\varphi}_0)$

Далее, усредняем отношение правдоподобия

$$\begin{aligned}
\rho(y_1^L | b_1) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \rho(y_1^L | b_1, \tilde{\varphi}_0) d\tilde{\varphi}_0 = \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left\{ \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{i=1}^L s(t_i, b_1, \tilde{\varphi}_0) (y_i - 0.5s(t_i, b_1, \tilde{\varphi}_0)) \right\} d\tilde{\varphi}_0 = \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left\{ \frac{-1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=1}^L [Ah(t_i - \tau) \cos(\omega t_i + \tilde{\varphi}_0)] \right\} \times \\
&\times \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left\{ \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{i=1}^L [y_i Ah(t_i - \tau) \cos(\omega t_i + \tilde{\varphi}_0)] \right\} d\tilde{\varphi}_0 = \\
&= \exp \left\{ -\frac{E}{N_0} \right\} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left\{ \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{i=1}^L [y_i Ah(t_i - \tau) \cos(\omega t_i + \tilde{\varphi}_0)] \right\} d\tilde{\varphi}_0 = \\
&= \exp \left\{ -\frac{E}{N_0} \right\} I_0 \left( \frac{2A}{N_0} X(N, b_1) \right)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

где

$$X^2(L, b_1) = I^2(L, b_1) + Q^2(L, b_1), \tag{2.7}$$

$$I(L, b_1) = \sum_{i=1}^L y_i h(t_i - \tau) \cos(\omega t_i) \Gamma_d, \tag{2.8}$$

$$Q(L, b_1) = \sum_{i=1}^L y_i h(t_i - \tau) \sin(\omega t_i) \Gamma_d. \tag{2.9}$$

Формулы (2.8), (2.9) описывают корреляторы с опорными сигналами  $s_{on,c}(t_i) = h(t_i - \tau) \cos(\omega t_i)$  и  $s_{on,s} = h(t_i - \tau) \sin(\omega t_i)$ . Данных корреляторах информация о фазе  $\tilde{\varphi}_0$  не используется, подставляя (2.6) в (2.5), получаем

$$p(b_1 | y_1^L) = \tilde{c} \exp \left( -\frac{E}{N_0} \right) I_0 \left( \frac{2A}{N_0} X(L, b_1) \right). \tag{2.10}$$

В качестве наилучшей оценки параметра  $b_1$  понимаем оценку, для которой апостериорная плотность вероятности принимает максимальное значение.

$$\hat{b}_1 = \arg \max_{b_1} p(b_1 | y_1^L). \tag{2.11}$$

или

$$\frac{\partial p(b_1 | y_1^L)}{\partial b_1} \Big|_{b_1 = \hat{b}_1} = 0 \quad (2.12)$$

Исходя из того, что функция Бесселя монотонна, то для упрощения задачи будем искать не максимум функции Бесселя, а максимум аргумента

$$\hat{b}_1 = \arg \max_{b_1} \sum_{i=1}^L X_i^2(L, b_1) \quad (2.13)$$

Исходя из этого, для данного случая получается следующая формула

$$(I_{b1} + I_{b0})^2 + (Q_{b1} + Q_{b0})^2 \geq (I_{b1} - I_{b0})^2 + (Q_{b1} - Q_{b0})^2 \quad (2.14)$$

Для более привычного вида, поменяем индексы у слагаемых

$$(I_k + I_{k-1})^2 + (Q_k + Q_{k-1})^2 \geq (I_k - I_{k-1})^2 + (Q_k - Q_{k-1})^2 \quad (2.15)$$

Где  $I_{k-1}, Q_{k-1}$  - квадратуры, полученные для предыдущего символа,

$I_k, Q_k$  - квадратуры в случае совпадения символа.

Согласно полученной конечной формуле (2.15) можно сказать, что для реализации данного алгоритма необходимы два согласованных фильтра (Рисунок 2.2)

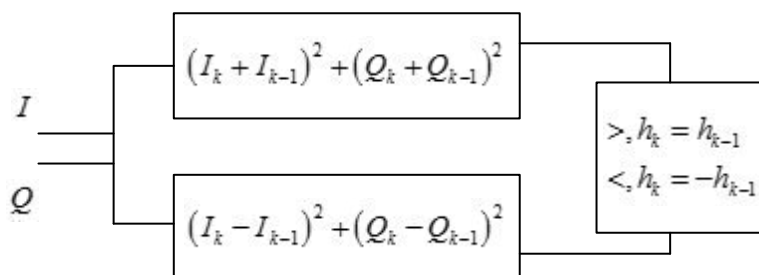


Рисунок 2.2 - Схема работы алгоритма на согласованных фильтрах

Распишем (2.15)

$$\begin{aligned} I_k^2 + 2I_k I_{k-1} + I_{k-1}^2 + Q_k^2 + 2Q_k Q_{k-1} + Q_{k-1}^2 &\geq \\ \geq I_k^2 - 2I_k I_{k-1} + I_{k-1}^2 + Q_k^2 - 2Q_k Q_{k-1} + Q_{k-1}^2 & \end{aligned} \quad (2.16)$$

С помощью несложных преобразований получаем (2.17)

$$I_k I_{k-1} + Q_k Q_{k-1} \geq -(I_k I_{k-1} + Q_k Q_{k-1}) \quad (2.17)$$

### 2.3 Анализ полученных результатов

Формула (2.14) наиболее наглядно отображает результат, полученный при синтезе алгоритма. Проиллюстрируем этот алгоритм рисунком 2.3.

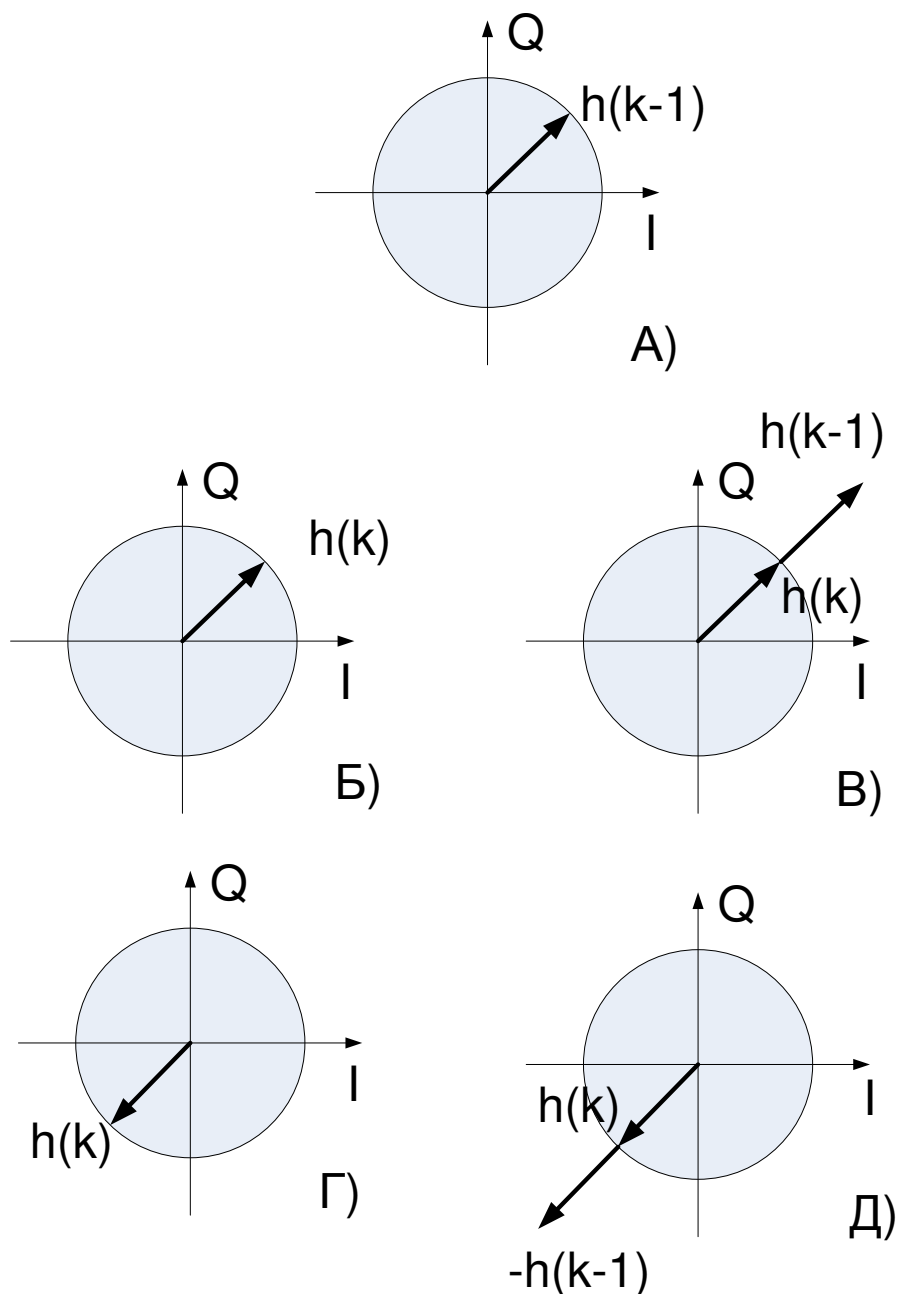


Рисунок 2.3 – Векторные диаграммы выходных сигналов коррелятора

На рисунке 2.3(A) изображена векторная диаграмма для символа  $h_{k-1}$ , то есть для символа навигационного сообщения в предыдущий момент

времени. На рисунках 2.3(Б) и 2.3(В) изображены векторные диаграммы для случая, когда предыдущий и текущий символы совпадают, то есть  $h_k = h_{k-1}$ . На рисунке 2.3(В) наглядно видно, что при совпадении символов суммарный вектор больше разностного. На рисунках 2.3(Г) и 2.3(Д) изображены векторные диаграммы, для тех случаев, когда  $h_k = -h_{k-1}$ . Здесь наглядно видно, что разностный вектор больше суммарного.

#### 2.4 Сравнение полученного алгоритма с алгоритмом приема сообщения в когерентном режиме

Возьмем следующую модель навигационного сигнала

$$s(t) = Ah_{ДК}(t-\tau)h_{НС}(t-\tau)\cos\left((\omega_0 + \omega_Д)(t-\tau) + \varphi_0\right); \quad (2.18)$$

Где  $A$  - амплитуда сигнала,  $h_{ДК}(t-\tau)$  - функция модуляции сигнала дальномерным кодом,  $h_{НС}(t-\tau)$  - функция модуляции сигнала навигационным сообщением,  $\tau$  - задержка сигнала,  $\omega_0$  - несущая частота сигнала,  $\omega_Д$  - доплеровский сдвиг частоты,  $\varphi_0$  - начальная фаза сигнала.

В когерентном режиме используется ФАП, это означает, что можно следить за фазой сигнала. Поэтому в когерентном режиме мы можем найти оценку начальной фазы сигнала. Благодаря этому возможно использовать только синфазную составляющую сигнала. Поэтому алгоритм по которому производится решение следующий (Рисунок 2.4):

$$h(k) = \begin{cases} -1, I \geq 0 \\ 1, I < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$



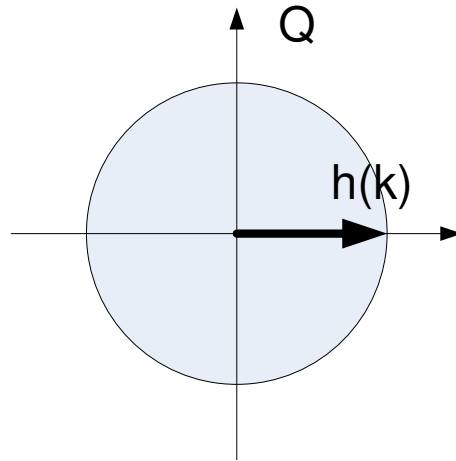


Рисунок 2.4 - Иллюстрация алгоритма приема навигационного сообщения в когерентном режиме

Однако до выделения символов навигационного сообщения, мы имеем полувекторную неоднозначность, то есть при оценке фазы приемник может ошибаться на  $\pi$ . Исходя из этого приемник при демодуляции навигационного сообщения может получить прямую или инвертированную последовательность символов. По этой причине в СРНС ГЛОНАСС и GPS существуют алгоритмы, которые разрешают эту неоднозначность.

По алгоритму, синтезированному в данной главе, тоже получается прямая или инвертированная последовательность символов навигационного сообщения. Исходя из вышесказанного, следует, что данный алгоритм возможно применять для приема навигационного сообщения.

Вывод: в данной главе был синтезирован алгоритм для приема навигационного сообщения в некогерентном режиме, также был наглядно проиллюстрирован режим его работы.

### **3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЁМА СООБЩЕНИЯ В НЕКОГЕРЕНТНОМ РЕЖИМЕ В СРЕДЕ MATLAB**

#### **3.1 Постановка задачи**

По имеющимся алгоритмам приема навигационного сообщения в некогерентном и когерентном режимах, построить зависимости вероятности правильного приема навигационного сообщения и вероятности ошибки при приеме навигационного сообщений GPS L1 C/A и ГЛОНАСС СТ от отношения сигнал/шум.

#### **3.2 Математическая модель приёма навигационного сообщения**

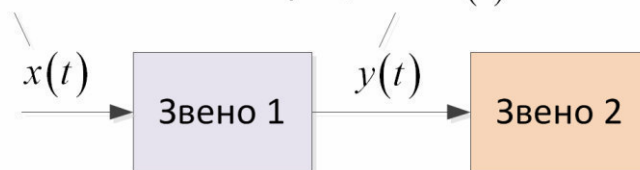
При построении математической модели процесса необходимо выбрать метод, которым будет моделироваться этот процесс. Существует достаточное количество методов моделирования радиотехнических устройств и систем, использующихся в радиотехнике. Это такие методы как, метод несущей, метод комплексных амплитуд, метод статистических эквивалентов, метод информационного параметра. В данном случае для моделирования возможно использовать метод несущей и метод статистических эквивалентов.

Метод несущей предполагает формирование входных воздействий в виде реализаций случайных процессов  $x(t)$  и поиск отклика звена  $y(t)$ . В общем случае входной сигнал  $y(t)$  является случайным процессом, он действует на последующие блоки и определяет их функционирование.

При использовании метода статистических эквивалентов, аналитически находят характеристики процесса  $y(t)$ , а при моделировании сразу формируется эквивалентный случайный процесс  $y_e(t)$  с рассчитанными свойствами. В ряде случаев это позволяет существенно сократить время моделирования (Рисунок 3.1).

### Метод несущей:

Случайный процесс с заданными свойствами      Результат преобразования процесса  $x(t)$  звеном



### Метод статистических эквивалентов:

Случайный процесс с эквивалентными свойствами  $y(t)$

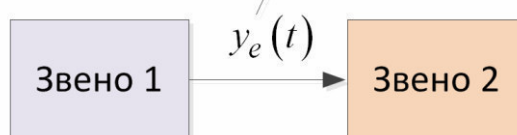


Рисунок 3.1 - Моделирование звена (звена 2) по методу несущей и методу статистических эквивалентов

По причине того, что в данном случае метод несущей требует построения более сложной модели, чем при моделировании методом статистических эквивалентов, второй метод является наиболее удобным и наиболее приемлемым. По этой причине в данной работе используется метод статистических эквивалентов.

В данной работе используется статистический эквивалент коррелятора. Проведем вывод формулы для синфазной составляющей статистического эквивалента коррелятора.

Представим синфазную корреляционную сумму в виде двух слагаемых – детерминированного  $\bar{I}$  и случайного  $n_I$  :

$$I = \bar{I} + n_I, \bar{I} = \sum_{i=1}^L S_i h(t_i - \tilde{\tau}) \cos(\omega_0 t_i + \tilde{\omega} t_i + \tilde{\varphi}), \quad (3.1)$$
$$n_I = \sum_{i=1}^L n_i h(t_i - \tilde{\tau}) \cos(\omega_0 t_i + \tilde{\omega} t_i + \tilde{\varphi}).$$

Ограничимся рассмотрением сигналов с постоянной огибающей для таких сигналов функция  $h(t)$  может принимать только два значения – плюс

и минус единица. Величина  $n_I$  образуется суммированием  $L$  независимых нормальных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_y^2 \cos(\omega_0 t_i + \tilde{\omega} t_i + \tilde{\varphi})^2$ . Её дисперсия

$$\sigma_{IQ}^2 = \sum_{i=1}^L \sigma_y^2 \cos(\omega_0 t_i + \tilde{\omega} t_i + \tilde{\varphi})^2 = \frac{\sigma_y^2 L}{2}. \quad (3.2)$$

Таким образом,  $n_I$  – нормальная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_{IQ}^2$ .

Детерминированная составляющая оказывается функцией разности параметров опорного и полезного сигналов.

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \sum_{i=1}^L A h(t_i - \tau) \cos(\omega_0 t + \omega t + \varphi) h(t_i - \tilde{\tau}) \cos(\omega_0 t_i + \tilde{\omega} t_i + \tilde{\varphi}) \approx \\ &\approx A \sum_{i=1}^L h(t_i - \tau) h(t_i - \tilde{\tau}) \sum_{i=1}^L \cos(\omega_0 t + \omega t + \varphi) \cos(\omega_0 t_i + \tilde{\omega} t_i + \tilde{\varphi}) \approx \\ &\approx \frac{AL}{2} \rho(\delta\tau) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta\omega T}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta\omega T}{2} + \delta\varphi\right), \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $\delta\tau = \tau - \tilde{\tau}$ ,  $\delta\omega = \omega - \tilde{\omega}$ ,  $\delta\varphi = \varphi - \tilde{\varphi}$ ,  $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$ ,

$$\rho(\delta\tau) = \rho(\tau - \tilde{\tau}) = \sum_{i=1}^L h(t_i - \tau) h(t_i - \tilde{\tau}). \quad (3.4)$$

Аналогичные выкладки можно повторить для квадратурной суммы

$$\begin{aligned} Q &= \bar{Q} + n_Q, n_Q \sim N(0, \sigma_{IQ}^2), \\ \bar{Q} &\approx -\frac{AL}{2} \rho(\delta\tau) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta\omega T}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta\omega T}{2} + \delta\varphi\right). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Однако в режиме слежения  $\rho(\delta\tau) \operatorname{sinc}\left(\frac{\delta\omega T}{2}\right) \approx 1$  поэтому формулы (3.3)

и (3.5) можно преобразовать к следующему виду

$$\begin{aligned}\bar{I} &\approx \frac{AL}{2} \cos\left(\frac{\delta\omega T}{2} + \delta\varphi\right), \\ \bar{Q} &\approx -\frac{AL}{2} \sin\left(\frac{\delta\omega T}{2} + \delta\varphi\right).\end{aligned}\tag{3.6}$$

Алгоритмом принятия решения будет следующий

$$h_k = \begin{cases} h_{k-1}, (I_k + I_{k-1})^2 + (Q_k + Q_{k-1})^2 \geq (I_k - I_{k-1})^2 + (Q_k - Q_{k-1})^2 \\ -h_{k-1}, (I_k + I_{k-1})^2 + (Q_k + Q_{k-1})^2 < (I_k - I_{k-1})^2 + (Q_k - Q_{k-1})^2 \end{cases}\tag{3.7}$$

### 3.2.1 Условия моделирования

При моделировании приема сообщения предполагалось, что символьная синхронизация уже произведена, а также, что приемник находится в режиме слежения.

Моделирование приема сообщения для сигнала GPS L1 C/A производится на 30 символах навигационного сообщения (длина слова). Моделирование приема сообщения для сигнала ГЛОНАСС СТ производится для 84 символов, ввиду того, что 85-й символ строки является холостым (принимается равным 0).

Решение о правильности принятого слова производится по условию совпадения этого слова с истинным его значением.

### 3.2.2 Расчет дисперсий флуктуационных ошибок оценок фазы и частоты

Для получения графиков зависимости вероятности правильного приема и вероятности ошибки от отношения сигнал/шум необходимо задать среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуационных ошибок фазы и частоты для следящих систем ФАП (фазовая автоподстройка) 3-го и ЧАП (частотная автоподстройка) 2-го порядка соответственно.

Формула для расчета СКО флуктуационных ошибок для ФАП 3-го порядка:

$$D_{\phi.ошф} = \frac{\Delta f_{CC\Phi}}{q_{c/n_0}} \left( 1 + \frac{1}{Tq_{c/n_0}} \right)\tag{3.8}$$

$$\sigma_{\phi.ош\phi} = \sqrt{D_{\phi.ош\phi}} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\phi.ош\phi} = \sqrt{\frac{\Delta f_{CC\Phi}}{q_{c/n_0}} \left( 1 + \frac{1}{Tq_{c/n_0}} \right)} \quad (3.10)$$

где  $\Delta f_{CC\Phi}$  – полоса пропускания ССФ,  $D_{\phi.ош\phi}$  – дисперсия ошибки фазы,  $\sigma_{\phi.ош\phi}$  – СКО флуктуационной ошибки фазы,  $T$  – время накопления в корреляторе.

Формула для расчета СКО флуктуационных ошибок для ЧАП 2-го порядка:

$$D_{\phi.ош\omega} = \frac{4\Delta f_{CC\Phi}}{q_{c/n_0} T^2} \left( 1 + \frac{1}{Tq_{c/n_0}} \right) \quad (3.11)$$

$$\sigma_{\phi.ош\omega} = \sqrt{\frac{4\Delta f_{CC\Phi}}{q_{c/n_0} T^2} \left( 1 + \frac{1}{Tq_{c/n_0}} \right)} \quad (3.12)$$

где  $\Delta f_{CC\Phi}$  – полоса пропускания ССФ,  $D_{\phi.ош\omega}$  – дисперсия ошибки частоты,  $\sigma_{\phi.ош\omega}$  – СКО флуктуационной ошибки частоты,  $T$  – время накопления в корреляторе.

При расчете флуктуационных ошибок фазы и частоты были взяты значения полос пропускания ФАП и ЧАП, использующиеся в навигационном приемнике. Для ФАП  $\Delta f_{CC\Phi} = 10 \text{ Гц}$ . Для ЧАП  $\Delta f_{CC\Phi} = 0.5 \text{ Гц}$ .

На рисунках 3.2 и 3.3 приведены графики зависимости СКО флуктуационных ошибок по фазе и по частоте при использовании ФАП 3-го порядка и ЧАП 2-го рассчитанные по формулам (3.10) и (3.12).



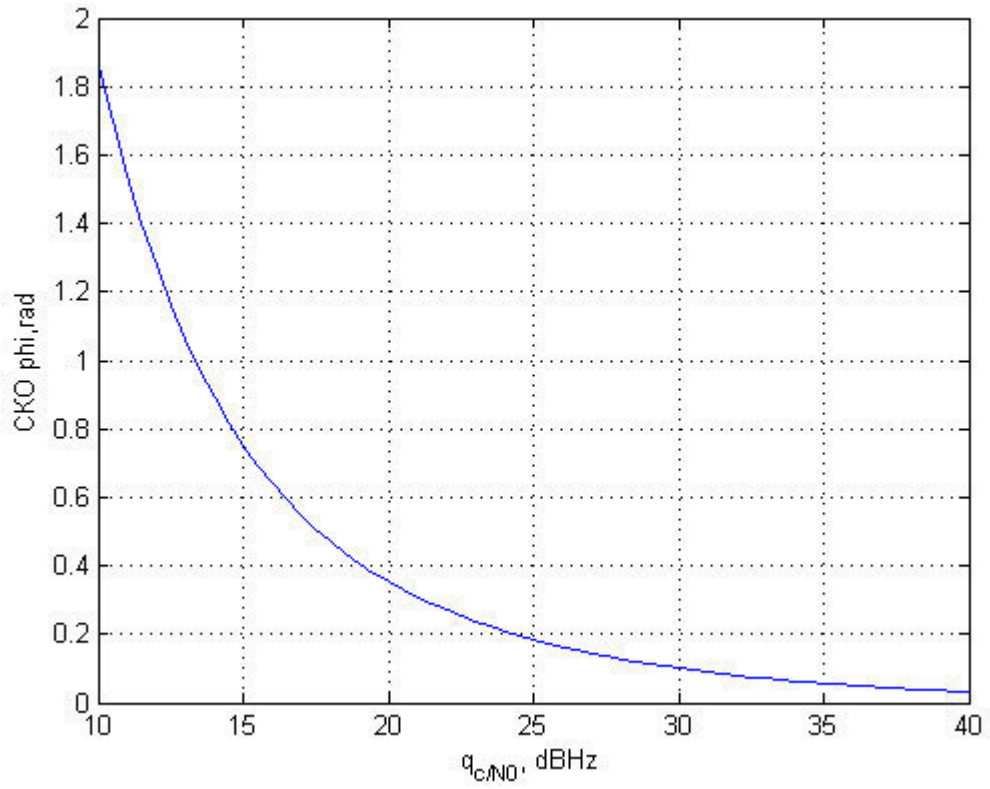


Рисунок 3.2 - Зависимость СКО флуктуационной ошибки фазы от отношения с/ш для ФАП 3-го порядка

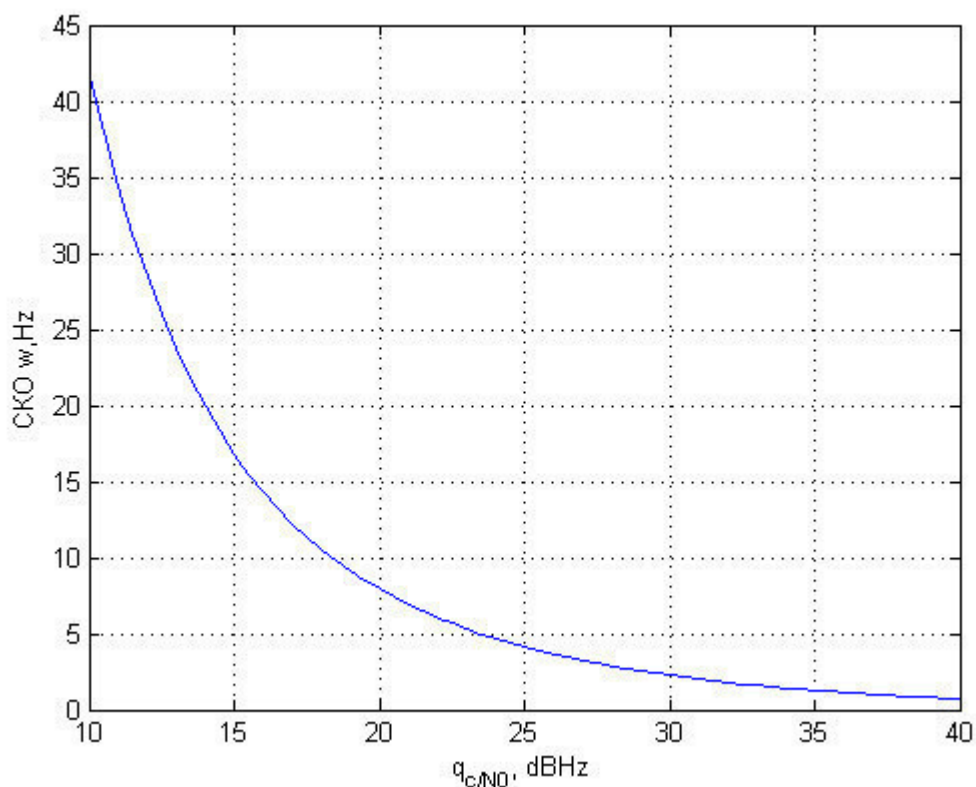


Рисунок 3.3 - Зависимость СКО флуктуационной ошибки частоты от отношения с/ш в ЧАП 2-го порядка

### 3.3 Результаты моделирования

#### 3.3.1 Сигнал ГЛОНАСС СТ

При моделировании приёма навигационного сообщения сигнала ГЛОНАСС СТ в некогерентном режиме, были получены графики зависимостей вероятности правильного приёма и вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

Моделирование приема навигационного сообщения производилось без учета СКО ошибок фазы и частоты, для когерентного и некогерентного приема соответственно.

На рисунках 3.4 и 3.5 приведены графики зависимости вероятности правильного приема и вероятности ошибки от отношения сигнал/шум в когерентном режиме без учета ошибок по фазе и с их учетом.

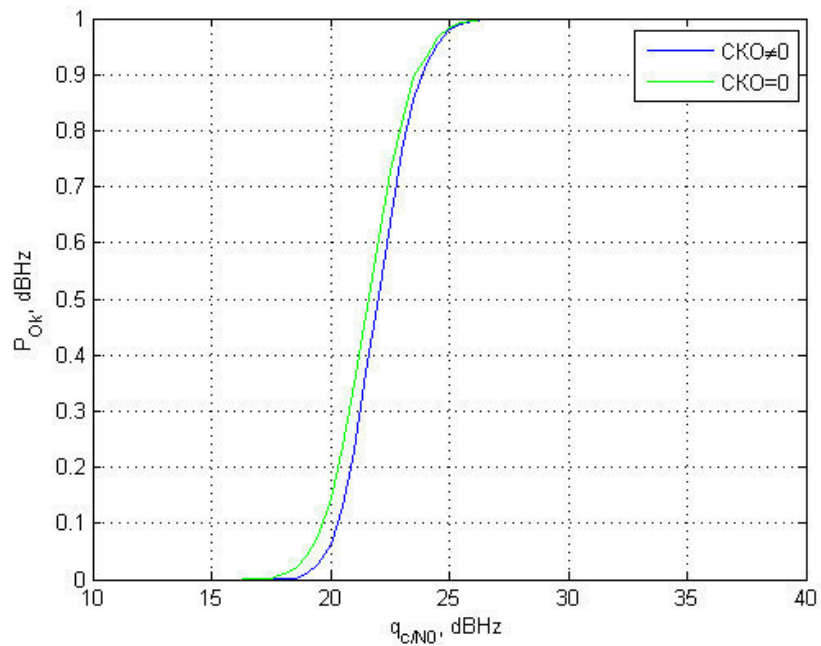


Рисунок 3.4 - Зависимости вероятности правильного приёма сообщения сигнала ГЛОНАСС СТ в когерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по фазе и с их учетом

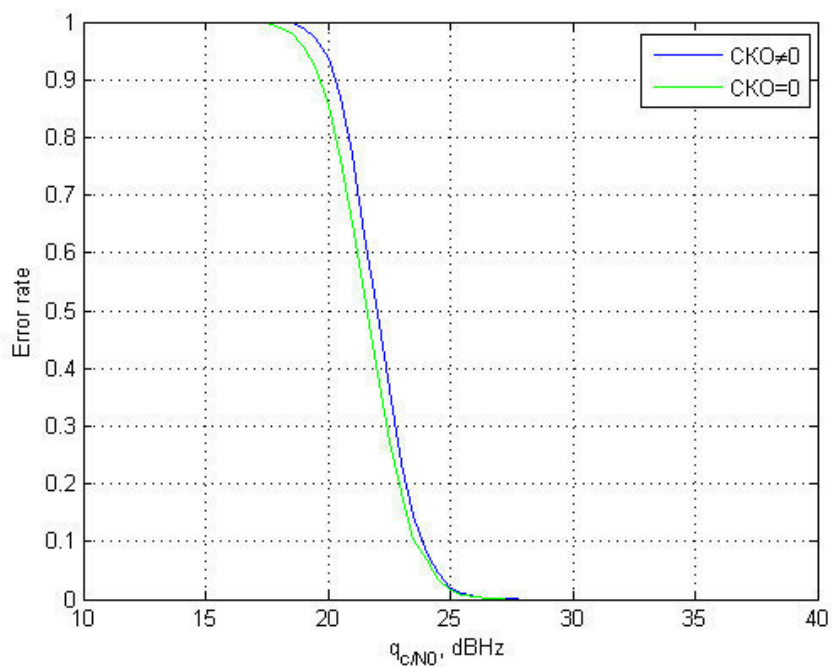


Рисунок 3.5 - Зависимости вероятности ошибки приёма сообщения сигнала ГЛОНАСС СТ в когерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по фазе и с их учетом

Из рисунков видно, что в данном случае флуктуационные ошибки ухудшают прием при низком отношении сигнал/шум.

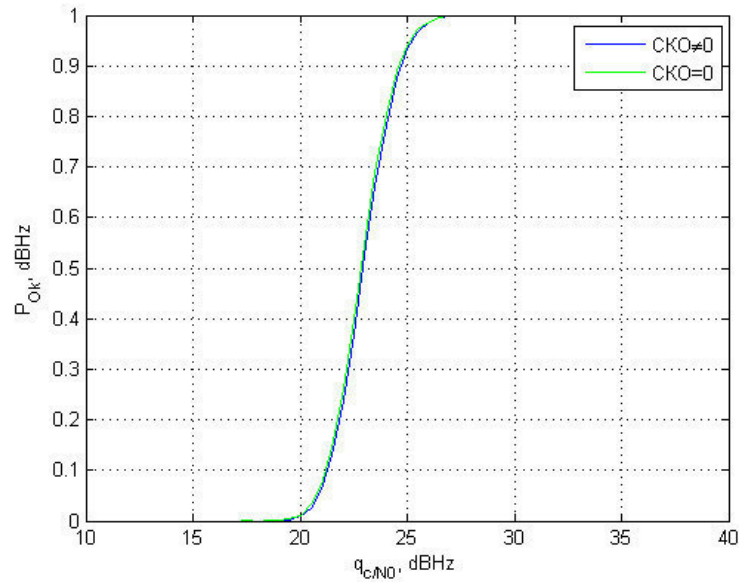


Рисунок 3.6 - Зависимости вероятности правильного приёма сообщения сигнала ГЛОНАСС СТ в когерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по фазе и с их учетом

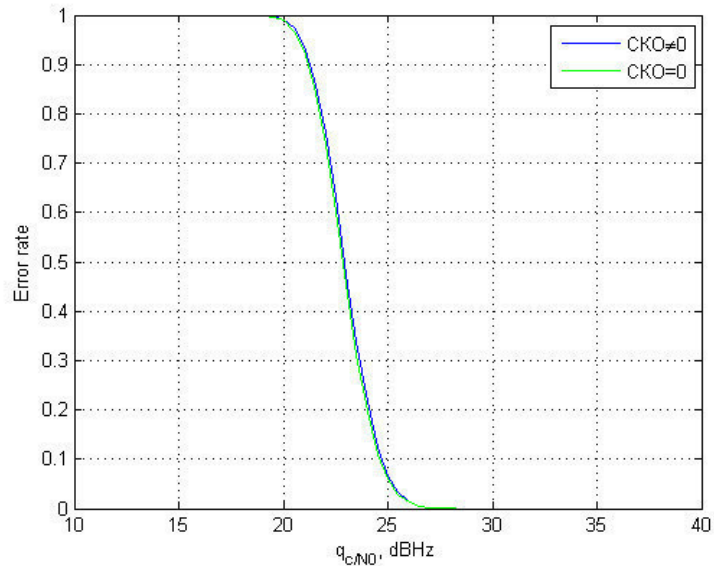


Рисунок 3.7 - Зависимости вероятности ошибки приёма сообщения сигнала ГЛОНАСС СТ в некогерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по фазе и с их учетом

Из рисунков 3.6 и 3.7 видно, что в данном случае флуктуационные ошибки по частоте оказывают незначительное влияние на характеристики приема.

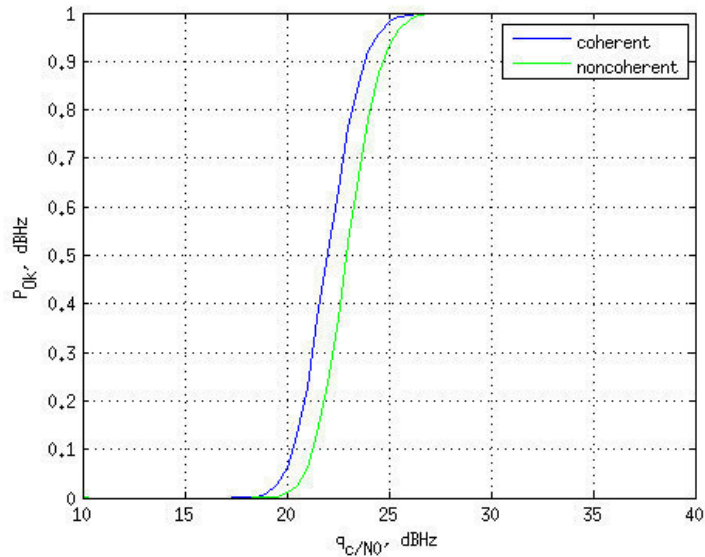


Рисунок 3.8 - Зависимости вероятности правильного приёма в когерентном и некогерентном режимах

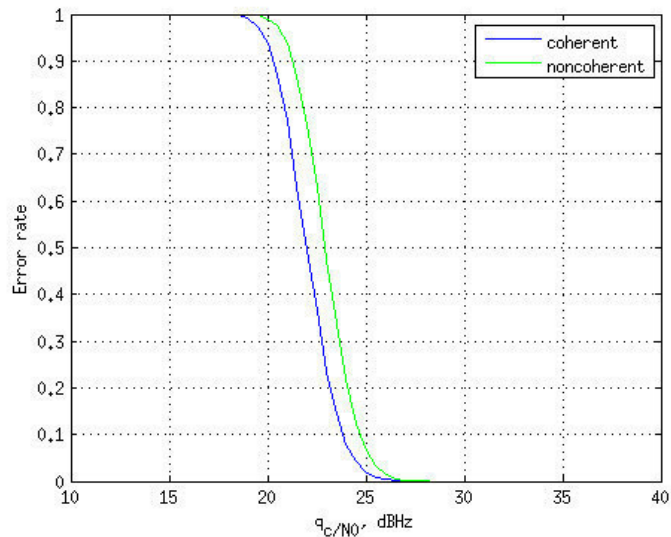


Рисунок 3.9 - Зависимости вероятности ошибки приема в когерентном и некогерентном режимах

Как видно из графиков, изображенных на рисунках 3.8 и 3.9, характеристики приёма навигационного сообщения в некогерентном режиме хуже, чем в когерентном примерно на 1 дБ.

### 3.3.2 Сигнал GPS L1 C/A

При моделировании приёма навигационного сообщения сигнала GPS L1 C/A в некогерентном режиме, так же как и в предыдущей главе были получены графики зависимостей вероятности правильного приёма и вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

Моделирование приема навигационного сообщения производилось без учета СКО ошибок фазы и частоты, для когерентного и некогерентного приема соответственно.

На рисунках 3.10 и 3.11 приведены графики зависимости вероятности правильного приема и вероятности ошибки от отношения сигнал/шум в когерентном режиме без учета ошибок по фазе и с их учетом.

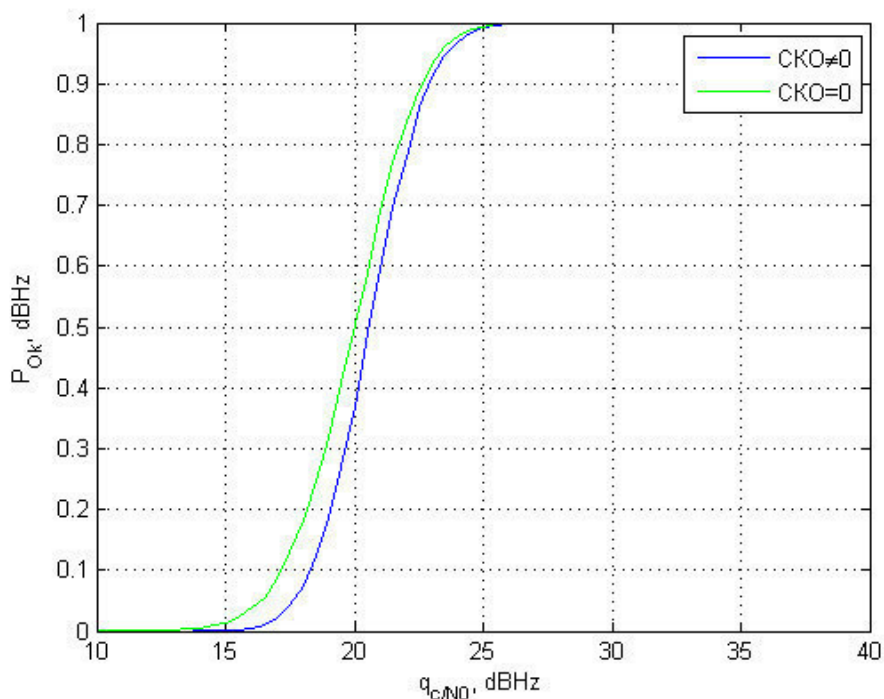


Рисунок 3.10 - Зависимости вероятности правильного приёма сообщения сигнала GPS L1 C/A в когерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по фазе и с их учетом



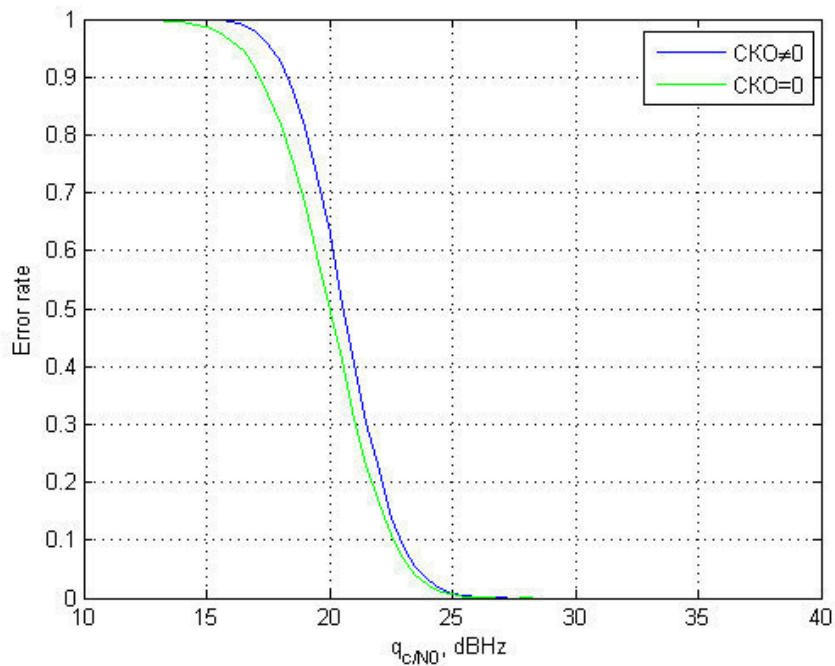


Рисунок 3.11 - Зависимости вероятности ошибки приема навигационного сообщения GPS L1 C/A в когерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по фазе и с их учетом

Из рисунков видно, что в данном случае флуктуационные ошибки сильно ухудшают прием при низком отношении сигнал/шум.

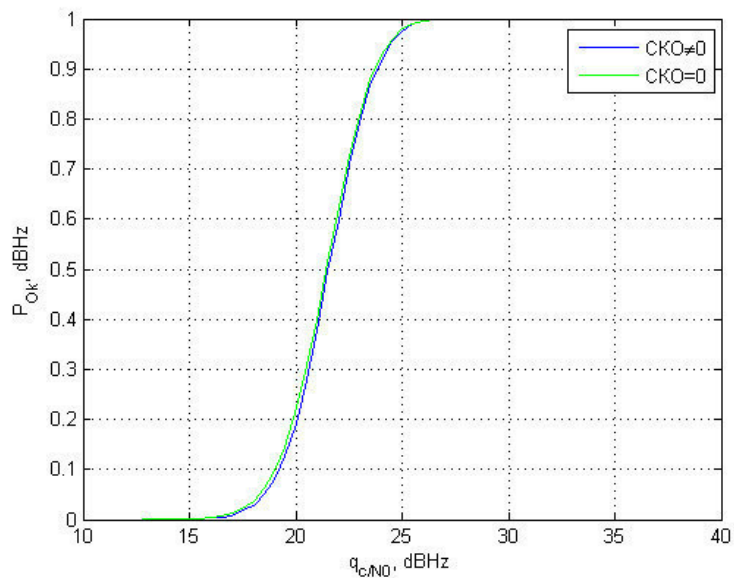


Рисунок 3.12 - Зависимости вероятности правильного приёма навигационного сообщения GPS L1 C/A в некогерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по частоте и с их учетом

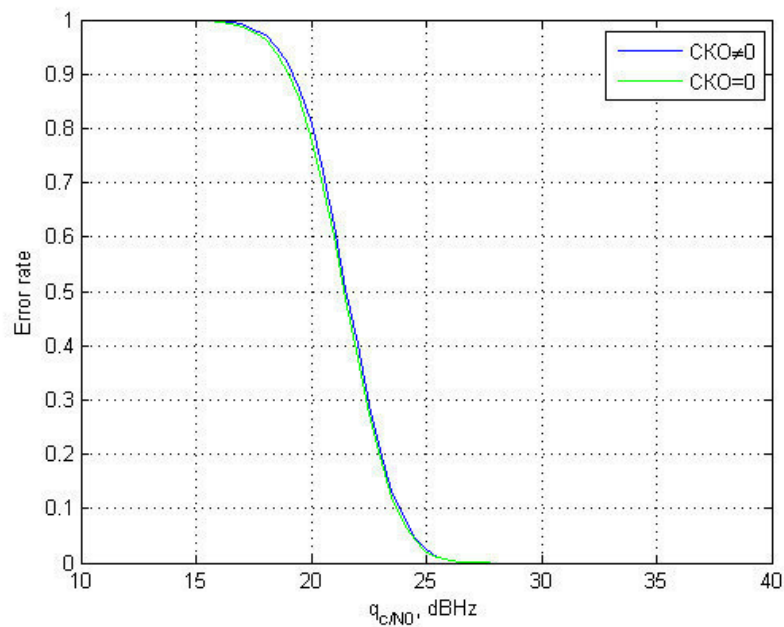


Рисунок 3.13 - Зависимости вероятности ошибки приема сообщения сигнала GPS L1 C/A в некогерентном режиме без учета флуктуационных ошибок по частоте и с их учетом

Из рисунков 3.12 и 3.13 видно, что в данном случае флуктуационные ошибки по частоте оказывают незначительное влияние на характеристики приема.

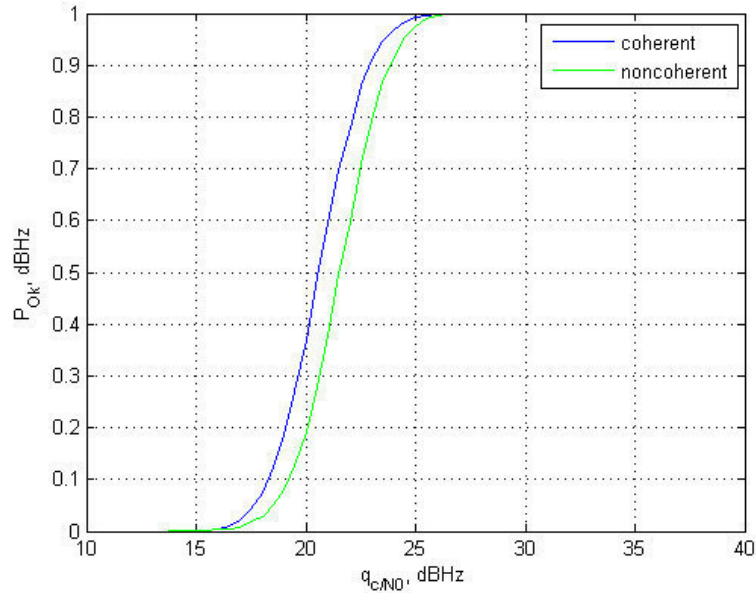


Рисунок 3.14 - Зависимости вероятности правильного приёма сообщения сигнала GPS L1 C/A в когерентном и некогерентном режимах

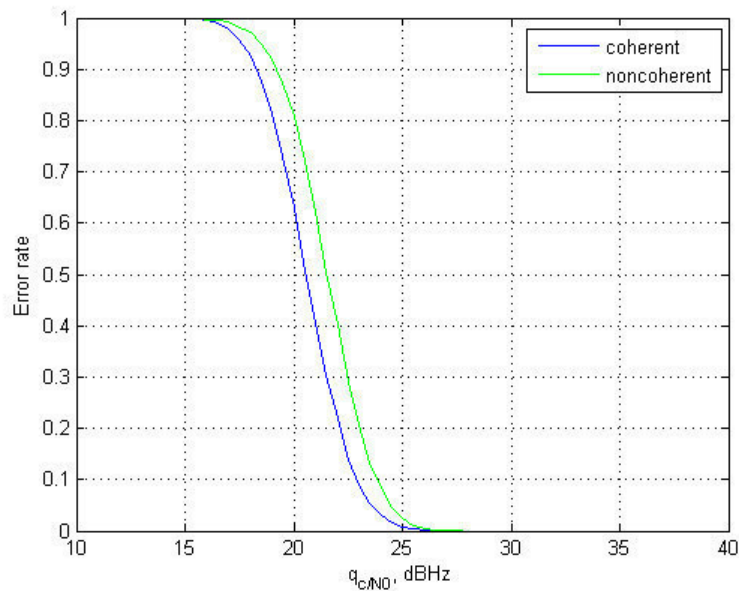


Рисунок 3.15 - Зависимости вероятности ошибок приёма сообщения сигнала GPS L1 C/A в когерентном и некогерентном режимах

Как видно из графиков, характеристики приёма навигационного сообщения в некогерентном режиме хуже, чем в когерентном примерно на 1 дБ.

### **3.3.3 Выводы по главе**

В данной главе было проведено моделирование навигационного сообщения методом статистических эквивалентов для сигналов GPS L1 C/A и ГЛОНАСС СТ в некогерентном режиме. Моделирование показало, что прием навигационного сообщения в некогерентном режиме возможен для обоих сигналов. Исходя из полученных зависимостей вероятности правильного приема и вероятности ошибки для обоих сигналов можно сказать, что для обоих сигналов характеристики приема в некогерентном режиме хуже примерно на 1 дБ.

## 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА

Ранее синтезирован алгоритм выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме, проведен его анализ методом имитационного моделирования. В данном разделе приводятся результаты апробации алгоритма в НАП и результаты сравнения эффективности алгоритмов выделения навигационных данных в когерентном и некогерентном режимах в ходе натурного эксперимента.

### 4.1 Реализация алгоритма некогерентного приема сообщения в НАП

Для реализации алгоритма приема навигационного сообщения в некогерентном режиме требуется написать функцию, которая будет аналогичной функции, написанной в среде MATLAB, но на языке C++. Данная функция получает синфазную и квадратурную компоненту для предыдущего символа  $I(k-1)$ ,  $Q(k-1)$  и текущего символа  $I(k)$ ,  $Q(k)$  и оценку значения предыдущего символа навигационного сообщения  $\tilde{h}_{i\tilde{N}}(k-1)$ . Выходным параметром является оценка символа текущего навигационного сообщения  $\tilde{h}_{i\tilde{N}}(k)$ , рисунок 4.1.

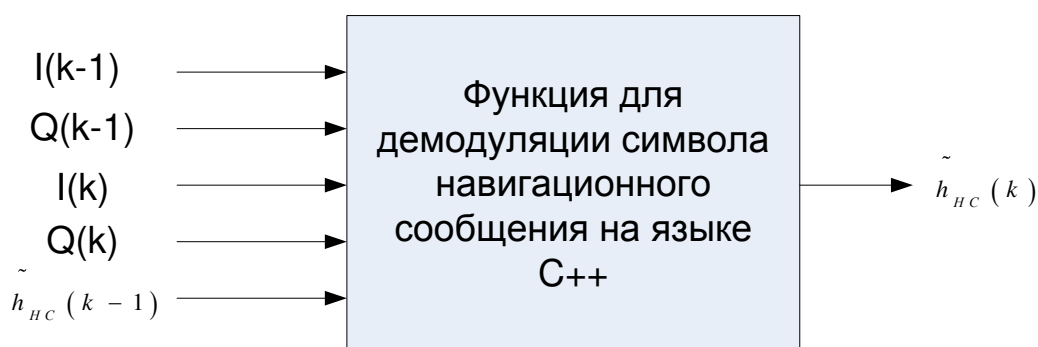


Рисунок 4.1 - Реализация функции на языке C++

Однако для проверки правильности работы данной функции требовалось сравнить результаты, полученные с помощью функции на языке C++ с результатами, полученными в модели в среде MATLAB. Для этого использовалась схема, изображенная на рисунке 4.2. Принцип действия

схемы заключается в следующем. В среде MATLAB формируются синфазная и квадратурная компоненты сигнала. Эти компоненты записываются в файл и передаются в функцию, написанную на языке C++, а также в функцию, написанную в среде MATLAB. Оценки символов навигационного сообщения, рассчитанные в функции на языке C++, записываются в файл и передается в среду MATLAB. После чего, исходя из полученных результатов, строятся графики зависимости вероятности правильного приема и вероятности ошибки. Одновременно то же самое делается и функции, написанной в среде MATLAB. Полученные зависимости строятся на одном графике и сравниваются.

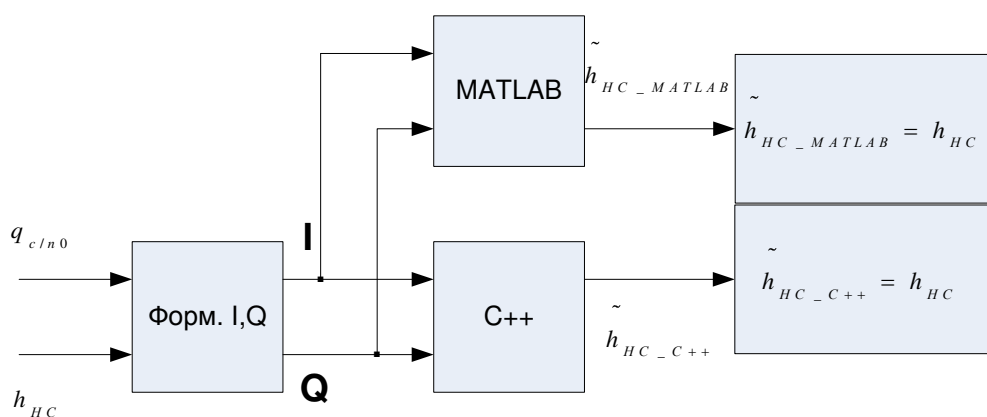


Рисунок 4.2 – Схема проверки правильности работы функции

На рисунках 4.3 и 4.4 приведены графики зависимостей вероятности правильного приема и вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

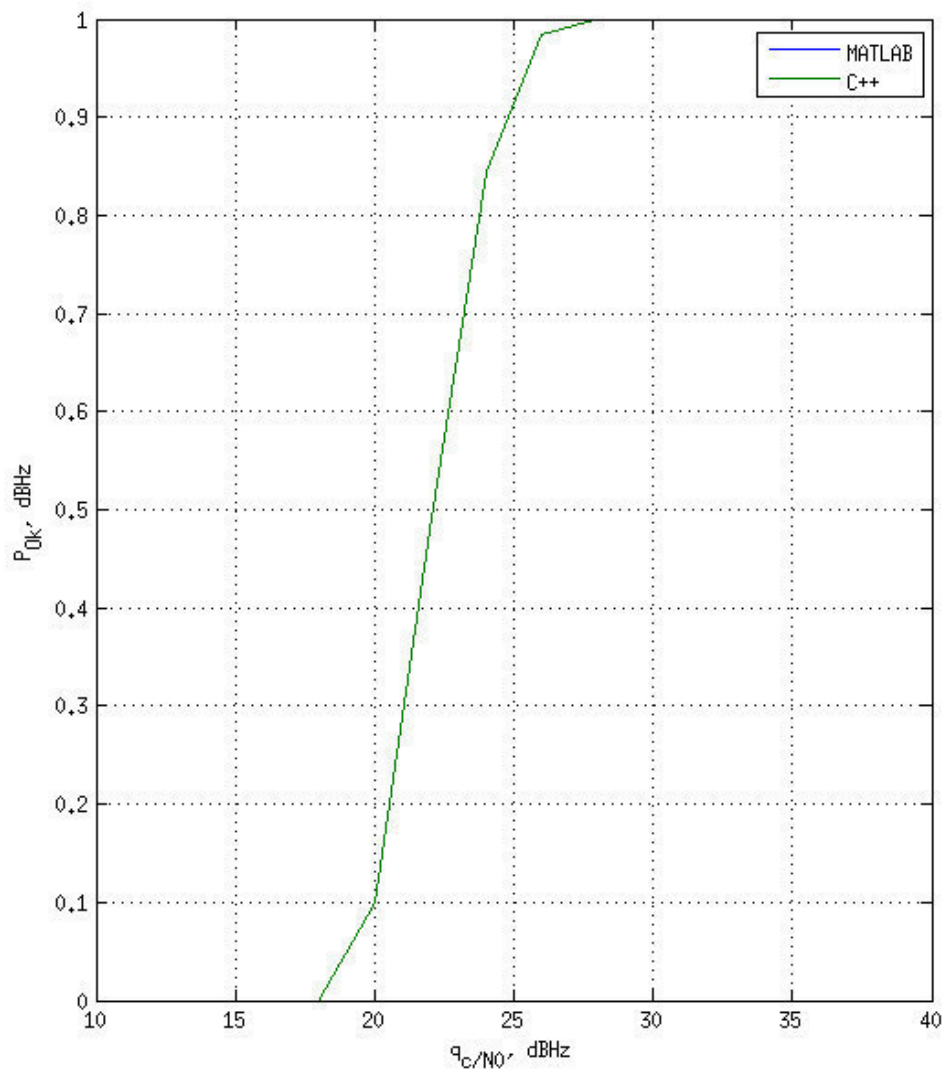


Рисунок 4.3– Графики зависимости вероятности правильного приема от отношения сигнал/шум для функций из MATLAB и C++ соответственно



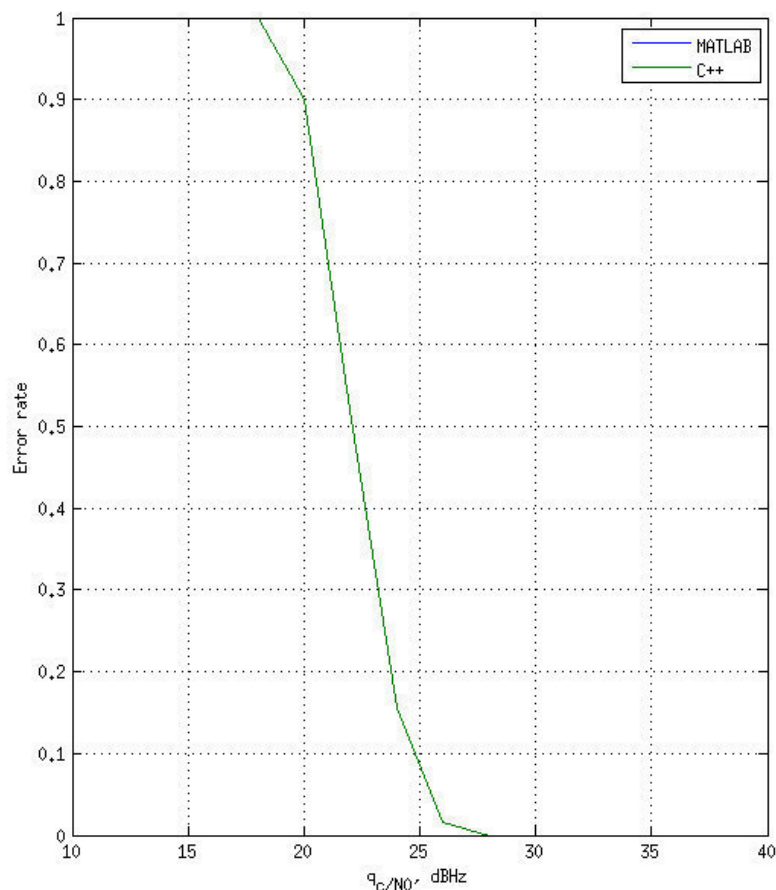


Рисунок 4.4 – Графики зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум, для функций из MATLAB и C++ соответственно

На графиках, изображенных на рисунках 4.3 и 4.4 видно абсолютное совпадение графиков, полученных на основе решений, выданных функцией, написанной на языке C++ и функцией, написанной в среде MATLAB. На основе этого можно сделать вывод о том, что функция, написанная на C++ идентична функции, написанной в среде MATLAB.

#### 4.2 Методика проведения натурального эксперимента

Объектом экспериментального исследования выступил опытный образец НАП ПНП (прецизионный навигационный приемник, см. рисунок 4.5), реализующий алгоритмы выделения навигационного сообщения в когерентном и некогерентном режиме. НАП ПНП разрабатывается кафедрой РТС в рамках проведения ОКР по модернизации сегмента контроля и управления системы ГЛОНАСС.



Рисунок 4.5 –Опытный образец НАП ПНП

В когерентном режиме НАП ПНП использует алгоритм демодуляции символов навигационного сообщения, описываемый выражением (1.3).

В некогерентном режиме используется функция, разработка которой описана в 4.1. Функция реализует алгоритм выделения навигационного сообщения, синтезированный выше.

Целью эксперимента является сравнение эффективности алгоритмов выделения навигационного сообщения в когерентном и некогерентном режиме. Для чего требуется получить зависимости вероятности успешного выделения структурных блоков навигационного сообщения от отношения сигнал/шум.

Для сокращения трудоемкости исследования используемые сигналы ограничены GPS L1 C/A. Выделяемый структурный блок для этого сигнала – 30-ти битное слово. В качестве критерия правильности выделения слова выбран факт прохождения проверки контрольной суммы для этого слова.

Следящие системы НАП ПНП имеют фиксированные шумовые полосы, соответствующие использованным при имитационном моделировании. Шумовая полоса ССФ составляет 10 Гц и не изменяется при варьировании отношения сигнал/шум, полоса ССЧ – 0.5 Гц. ССФ содержит

фильтр 3 порядка и дискриминатор вида  $u = -\text{atan}\left(\frac{Q}{I}\right)$ , ССЧ – фильтр 2 порядка, дискриминатор вида  $u = I_k Q_{k-1} - Q_k I_{k-1}$ .

Экспериментальные исследования проводятся в лабораторных условиях с использованием рабочего места, схема которого приведена на рисунке 4.6.

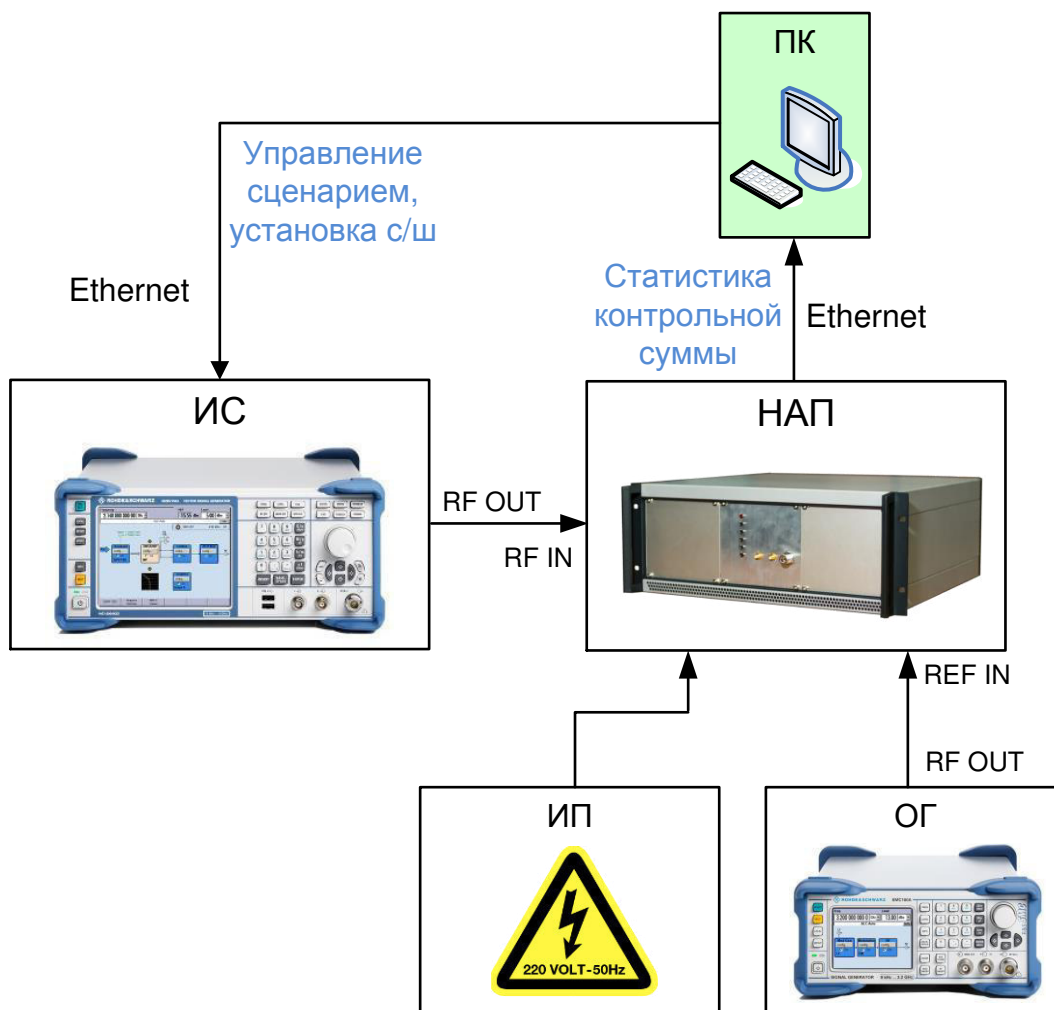


Рисунок 4.6 – Схема натурального эксперимента

Перечень используемого оборудования приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень оборудования, используемого при проведении эксперимента

№ п/п	Обозначение	Тип и характеристики
1	ИС	Имитатор сигналов - векторный генератор сигналов R&S SMBV100A с опциями: SMBV-B10: Baseband Generator*; SMBV-B92: Hard Disk (removable)*; SMBV-B90: Phase Coherence; SMBV-B55: Memory Extension for ARB to 256 Msample*. SMBV-B106: 9 kHz to 6 GHz frequency range; SMBV-K94: GPS 6 Satellites*; SMBV-K61: Multicarrier CW Signal Generation; SMBV-K62: Additive White Gaussian Noise (AWGN); SMBV-K66: Galileo 6 Satellites; SMBV-K92: GNSS Enhanced (e.g. moving scenarios, multipath)*; SMBV-K94: Glonass*
2	НАП	Опытный образец ПНП
3	ОГ	Аналоговый генератор R&S SMC100A, используется как опорный генератор
4	ИП	Источник питания (220 В, 50 Гц, до 6А)
5	ПК	Персональный компьютер: - наличие интерфейса Ethernet; - ОС Linux для запуска клиентского ПО для работы с НАП; -установленное ПО MATLAB.

В ходе эксперимента:

1. Включается оборудование, на ПК включается интерфейсная программа `srns_parse_all` для взаимодействия с НАП.

2. С помощью ПК ИС настраивается на имитацию сигналов GPS L1 C/A в режиме Static. В этом режиме все имитируемые сигналы имеют равную мощность, которая не изменяется в процессе работы сценария. Настройку производит MATLAB-скрипт (см. Приложение В), отправляющий ИС по

сети Ethernet команды в формате SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) .

3. НАП настраивается на работу только в когерентном или только некогерентном режиме путем изменения пороговых значений с/ш, используемых СПМО НАП для переключения между режимами:

3.1 Если исследуются характеристики алгоритма когерентного выделения сообщения, то НАП настраивается на работу только в когерентном режиме. Для этого граница переключения в некогерентный режим опускается до 10 дБГц.

3.2 Если исследуются характеристики алгоритма некогерентного выделения сообщения, то НАП настраивается на работу только в некогерентном режиме. Для этого после установления символьной синхронизации граница переключения в некогерентный режим из когерентного, поднимается до 58 дБГц. Граница переключения из некогерентный в когерентный – до 60 дБГц.

4. С ПК в НАП подается команда на выдачу пакета 0x0042 протокола SRNS. Этот пакет, в случае приема сигнала GPS L1 C/A, отправляется после выделения нового подкадра и расчета контрольных сумм входящих в него слов. В пакете содержится оценка отношения сигнал/шум (SNR) для данного сигнала, а так же количество слов, для которых сошлась контрольная сумма.

5. На ПК запускается скрипт постепенного понижения мощности сигналов ИС (см. Приложение В). Скрипт по сети Ethernet отправляет команды ИС в формате SCPI.

6. На ПК запускается скрипт обработки пакетов 0x0042 (см. Приложение Г). Скрипт работает в среде MATLAB и производит построение требуемых графиков: зависимости SNR от времени, процент успешно выделяемых слов от времени, процент успешно выделяемых слов от SNR.

### **4.3 Результаты натурного эксперимента**

На рисунках 4.7, 4.8 приведены зависимости доли успешно выделяемых слов навигационного сообщения в зависимости от отношения

сигнал/шум для когерентного и некогерентного алгоритма соответственно. Зависимости получены усреднением результатов для 6 имитируемых ИС сигналов. Отношение сигнал/шум соответствует значениям, передаваемым НАП в пакете 0x0042. Алгоритм оценки отношения сигнал/шум в НАП в когерентном и некогерентном режиме не отличается.

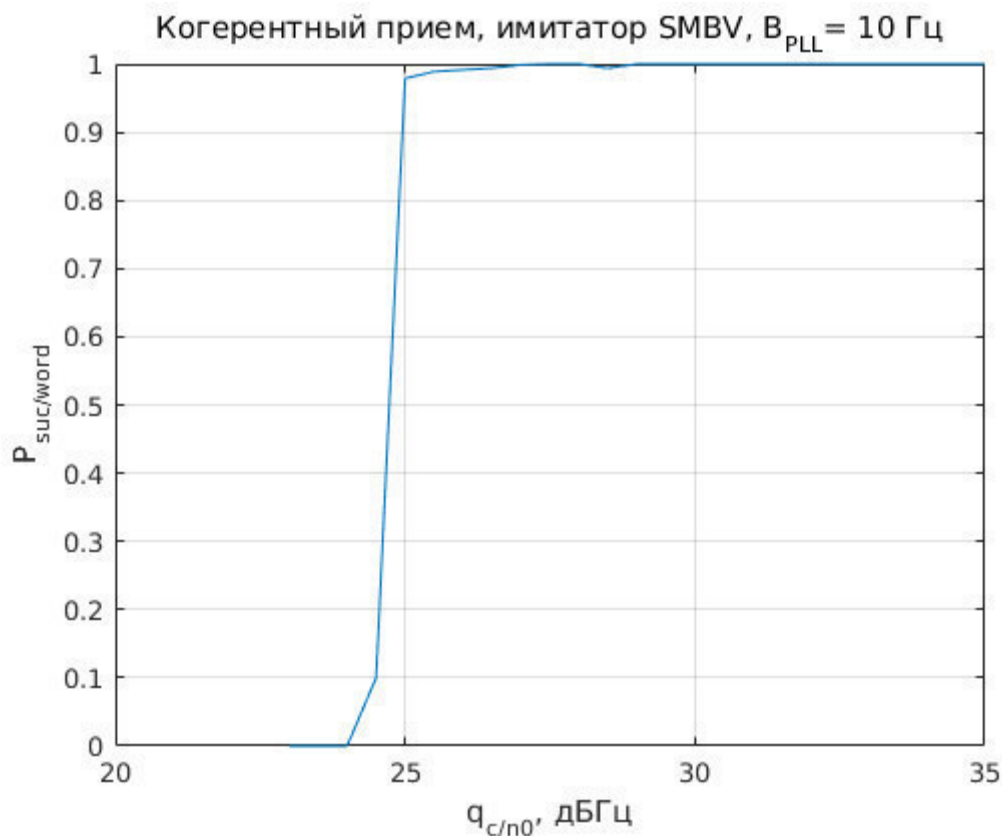


Рисунок 4.7 – Доля успешно выделяемых слов навигационного сообщения сигнала GPS L1 C/A в когерентном режиме

В когерентном режиме выделение сообщения происходит успешно вплоть до отношений сигнал/шум около 25 дБГц (см. рисунок 4.7). При дальнейшем снижении отношения сигнал/шум происходит срыв слежения за сигналом, следовательно, прекращается и выделение навигационного сообщения. Таким образом, при SNR ниже 24 дБГц выделение сообщения оказывается невозможным. Поведение характеристики соответствует результатам, полученным на этапе имитационного моделирования.

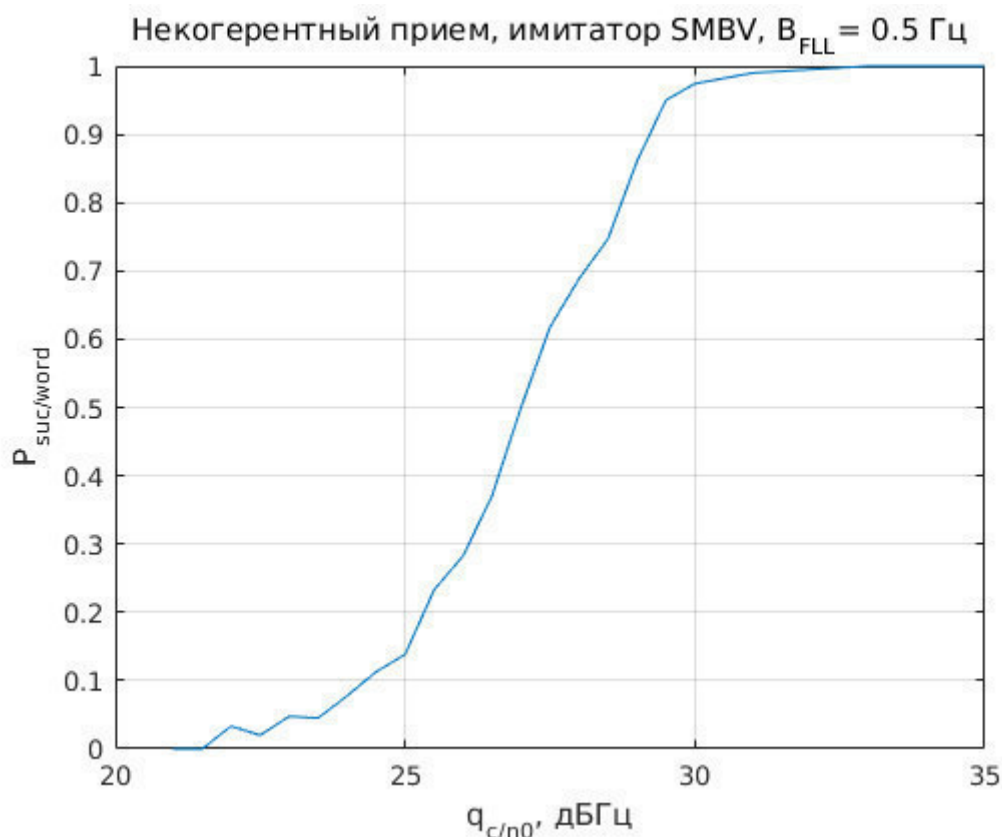


Рисунок 4.8 – Доля успешно выделяемых слов навигационного сообщения сигнала GPS L1 C/A в некогерентном режиме

В некогерентном режиме (см. рисунок 4.8) начинается плавное снижение вероятности верного выделения сообщения начиная с отношений сигнал/шум около 30 дБГц. Выделение сообщения полностью нарушается при 24-25 дБГц. Характер зависимости, полученной по результатам эксперимента и имитационного моделирования, несколько отличается. При экспериментальном исследовании деградация характеристик началась при более высоких отношениях сигнал/шум, на 3-4 дБ раньше.

Таким образом, экспериментально подтверждается возможность выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме. При переходе к некогерентному приему происходит снижение чувствительности процедуры выделения сообщения. Для опытного образца НАП ПНП эквивалентные потери в отношении сигнал/шум составили 3-5 дБ при приеме сигнала GPS L1 C/A (см. рисунок 4.9).



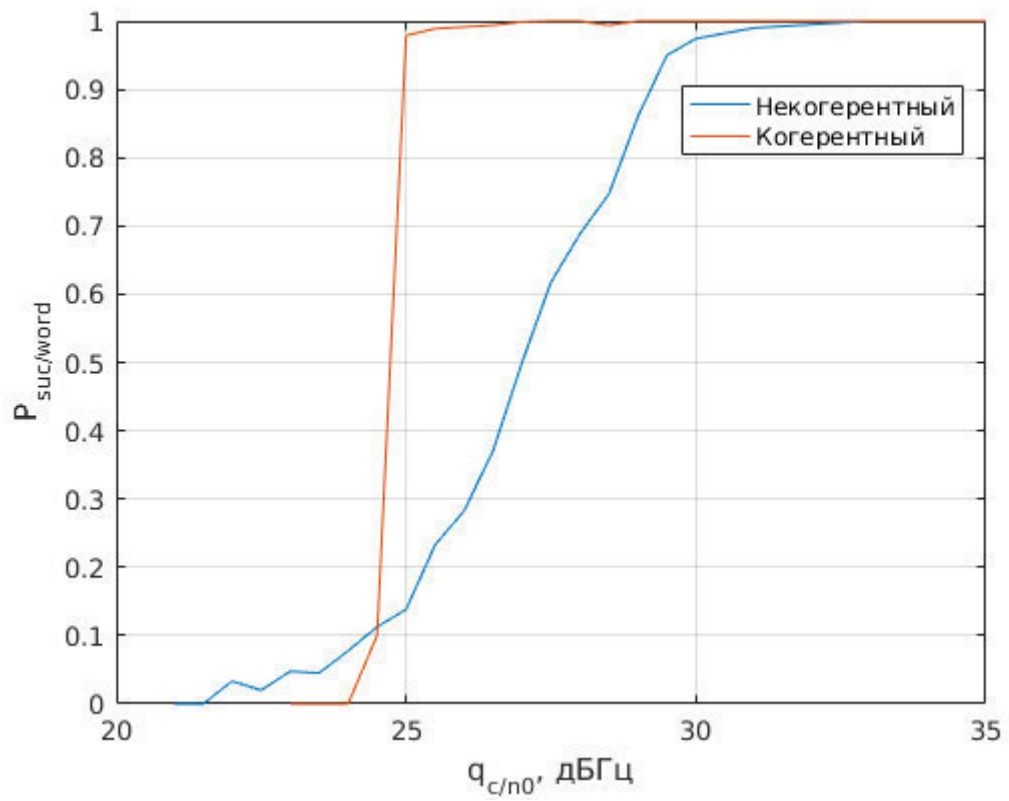


Рисунок 4.9 - Доля успешно выделяемых слов навигационного сообщения сигнала GPS L1 C/A

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Показана возможность выделения навигационного сообщения в некогерентном режиме работы приемника на примере приема сигналов NAVSTAR GPS L1C/A, ГЛОНАСС L1 СТ, L2 СТ.

Проведен синтез алгоритма демодуляции для указанных навигационных сигналов. Полученный алгоритм можно интерпретировать как пару согласованных фильтров – на случай смены символа навигационного сообщения и на случай сохранения значения – с последующим сравнением откликов фильтров.

С помощью компьютерного имитационного моделирования получены зависимости вероятности выделения структурного блока (слова для GPS, строки для ГЛОНАСС) сообщения от отношения сигнал/шум для синтезированного некогерентного алгоритма. Проведено сравнение с аналогичными результатами для традиционного алгоритма, работающего в когерентном режиме. При моделировании учитывалось влияние флуктуационных ошибок систем слежения за частотой и фазой. Алгоритмы в модельных условиях показали близкие результаты, сохраняя работоспособность до 23-25 дБГц. При этом синтезированный алгоритм проигрывал около 1-2 дБ.

Синтезированный алгоритм реализован в СПМО опытного образца навигационного приемника, разрабатываемого кафедрой в рамках ОКР. Для этого на языке C++ создана функция, принимающая в качестве входных аргументов корреляционные суммы. Составлен тест, показано, что работа C++-функции соответствует поведению аналогичной MATLAB-функции, использованной на этапе моделирования.

С помощью опытного образца НАП и имитатора навигационных сигналов проведено экспериментальное исследование характеристик разработанного алгоритма. Эксперименты проводились при использовании сигналов NAVSTAR GPS L1 C/A. В ходе эксперимента получены графики выборочной вероятности выделения слов GPS сообщения от отношения

сигнал/шум при использовании традиционного когерентного алгоритма и синтезированного некогерентного. Подтверждена работоспособность созданного алгоритма. Выделение данных с помощью некогерентного алгоритма возможно вплоть до отношений сигнал/шум 25-27 дБГц, при этом он проигрывает когерентному 3-5 дБ энергетического потенциала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е переработанное и дополненное. — М.: Радиотехника, 2010, 800 с.
2. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, with MATLAB. — NY: John Wiley & Sons, 2001. Co-authors *M.S.Grewal, L.R. Weill* and *A.P. Andrews*.
3. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем.- М.: Радиотехника, 2003, 400 с.
4. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. Учеб. пособие для вузов. М. Радио и связь, 2004, 608 с.
5. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. — М.: Радио и связь, 1985, 344 с.
6. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Ред. 5.1, 2008 г. (<http://www.spacecorp.ru/upload/iblock/9ea/mup-tstlrklp%205.1%20RUS%20%20v2014.02.18u.pdf>)
7. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазоне L3 с открытым доступом и кодовым разделением (редакция 1), 2011 г.
8. КА Глонасс-K2. Структура излучаемых навигационных радиосигналов с кодовым разделением частотных диапазонов L1, L2, L3. 25.04.2012.
9. Интерфейсный контрольный документ NAVSTAR IS-GPS-200H (<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf> )
- 10.Интерфейсный контрольный документ NAVSTAR IS-GPS-800D (<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800D.pdf>)
- 11.Интерфейсный контрольный документ NAVSTAR IS-GPS-705D (<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705D.pdf>)

12. А.И. Перов. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. М: Радиотехника, 2012 г.
13. Шатилов, А. Ю. Использование критерия срыва слежения при оценке помехоустойчивости следящих систем // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2010. — № 11. — С. 29-33.
14. А.И. Перов. Методы и алгоритмы оптимального приема сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем. М.: Радиотехника. 2012 г.
15. Шатилов, А. Ю. Исследование кратковременных нестабильностей кварцевых опорных генераторов для применения в НАП // Радионавигационные технологии. Серия "Радиосвязь и радионавигация". — М.: Радиотехника, 2013. — № 3. — С. 86-92.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

### Модель для ГЛОНАСС

```
clear all; close all; clc

N = 10000;
LWord = 84;
B = nan(1, LWord);
bB = nan(1, LWord+1); bB(1) = -1;

Coh = 1; NonCoh = 2;
Algo = NonCoh;

T = 0.02;

qcno_dB = 10:0.5:40;
%qcno_dB = [30,37,45];
qcno = 10.^(qcno_dB/10);
std_IQ = 1;
A_IQ = sqrt(2*qcno*T) * std_IQ;
% dfph = 20;
% dff = 3;
dff = 10;
dff = 0.5;

if Algo == Coh %!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    std_dw = zeros(1, length(qcno));
    % std_dphi = zeros(1, length(qcno));
    std_dphi = sqrt(dff./qcno.*(1+1/2/T./qcno)); %СКО ошибок
else

    std_dw = sqrt(4*1*dff/T^2./qcno.*(1+1/2/T./qcno));
    % std_dphi = zeros(1, length(qcno));
    std_dphi = zeros(1, length(qcno));
end
ResOk = zeros(1, length(qcno));
ResN = zeros(1, length(qcno));

for i = 1:N
    for j = 1:length(qcno_dB)
        Word = 2*(randn(1, LWord) > 0) - 1;

        nI = randn(1, LWord+1) * std_IQ;
        nQ = randn(1, LWord+1) * std_IQ;

        dw = randn(1, LWord+1) * std_dw(j);
        dphi = randn(1, LWord+1) * std_dphi(j) + cumsum(dw)*T;

        I = A_IQ(j) * cos(dphi).*[0 Word] + nI;
        Q = -A_IQ(j) * sin(dphi).*[0 Word] + nQ;

        if (Algo == Coh)
            B = sign(I(2:end));
        else
            for k = 2:(LWord+1)
                X1 = (I(k) + I(k-1))^2 + (Q(k) + Q(k-1))^2;
                X2 = (I(k) - I(k-1))^2 + (Q(k) - Q(k-1))^2;
                if X1 > X2
                    bB(k) = bB(k-1);
                else

```

```

        bB(k) = -1*bB(k-1);
    end
    B = bB(2:end);
end
end

ResN(j) = ResN(j) + 1;
if (isequal(Word, -B) || isequal(Word, B))
    ResOk(j) = ResOk(j) + 1;
end
end
end

figure(1);
subplot(1, 2, 1)
plot(qcno_dB, ResOk./ResN);
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('P_{Ok}, dBHz');
grid on;

subplot(1, 2, 2)
plot(qcno_dB, (ResN-ResOk)./ResN);
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('Error rate');
grid on;

if (Algo == Coh)
    ResOkCoh = ResOk;
    ResNCoh = ResN;
    save('ResCoh1_w.mat');
    % save('ResCoh1.mat');
else
    ResOkNonCoh = ResOk;
    ResNNonCoh = ResN;
    % save('ResNonCoh1.mat');
    save('ResNonCoh1_w.mat');
end
figure(2);
if (Algo == Coh)
    plot(qcno_dB, std_dphi)
    xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
    ylabel('CKO phi, rad');
else
    plot(qcno_dB, std_dw)
    xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
    ylabel('CKO w, Hz');
end
grid on

```

## Модель GPS

```

clear all; close all; clc

N = 10000;
LWord = 30;
B = nan(1, LWord);
bB = nan(1, LWord+1); bB(1) = -1;

Coh = 1; NonCoh = 2;
Algo = Coh;

```



```

T = 0.02;

qcno_dB = 10:0.5:40;
%qcno_dB = [30,37,45];
qcno = 10.^(qcno_dB/10);
std_IQ = 1;
A_IQ = sqrt(2*qcno*T) * std_IQ;
% dfph = 20;
% dff = 3;
dfph = 10;
dff = 0.5;

if Algo == Coh %!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    std_dw = zeros(1, length(qcno)); % PkCnP[PSPs P·P°PIPμCÍC, Pë CÍCñP°P°
CñPμP·CíP»CñC, P°C, CñPμCñPμPSPëCñ PrPëCÍPíPμCñCÍPëPsPSPSC<C...
CíCñP°PIPSPμPSPëPñ
    % std_dphi = zeros(1, length(qcno));
    % std_dphi = sqrt(dfph./qcno);% false
    std_dphi = sqrt(dfph./qcno.*(1+1/2/T./qcno));
else
    % std_dw = sqrt(3*dff./(qcno*T^2));wrong
    std_dw = sqrt(4*1*dff/T^2./qcno.*(1+1/2/T./qcno));
    % std_dw = zeros(1, length(qcno));
    std_dphi = zeros(1, length(qcno));
end
ResOk = zeros(1, length(qcno));
ResN = zeros(1, length(qcno));

for i = 1:N
    for j = 1:length(qcno_dB)
        Word = 2*(randn(1, LWord) > 0) - 1;

        nI = randn(1, LWord+1) * std_IQ;
        nQ = randn(1, LWord+1) * std_IQ;

        dw = randn(1, LWord+1) * std_dw(j);
        dphi = randn(1, LWord+1) * std_dphi(j) + cumsum(dw)*T;

        I = A_IQ(j) * cos(dphi).*[0 Word] + nI;
        Q = -A_IQ(j) * sin(dphi).*[0 Word] + nQ;

        if (Algo == Coh)
            B = sign(I(2:end));
        else
            for k = 2:(LWord+1)
                X1 = (I(k) + I(k-1))^2 + (Q(k) + Q(k-1))^2;
                X2 = (I(k) - I(k-1))^2 + (Q(k) - Q(k-1))^2;
                if X1 > X2
                    bB(k) = bB(k-1);
                else
                    bB(k) = -1*bB(k-1);
                end
            end
            B = bB(2:end);
        end
        ResN(j) = ResN(j) + 1;
        if (isequal(Word, -B) || isequal(Word, B))
            ResOk(j) = ResOk(j) + 1;
        end
    end
end
end

```

```

figure(1);
subplot(1, 2, 1)
plot(qcno_dB, ResOk./ResN);
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('P_{Ok}, dBHz');
grid on;

subplot(1, 2, 2)
plot(qcno_dB, (ResN-ResOk)./ResN);
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('Error rate');
grid on;

if (Algo == Coh)
    ResOkCoh = ResOk;
    ResNCoh = ResN;
    % save('ResCoh1_w.mat');
    save('ResCoh1.mat');
else
    ResOkNonCoh = ResOk;
    ResNNonCoh = ResN;
    % save('ResNonCoh1.mat');
    save('ResNonCoh1_w.mat');
end
figure(2);
if (Algo == Coh)
    plot(qcno_dB, std_dphi)
    xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
    ylabel('CKO phi, rad');
else
    plot(qcno_dB, std_dw)
    xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
    ylabel('CKO w, Hz');
end
grid on

```

## Программа для построения графиков

```

clear all; close all; clc

figure(1);
load ResCoh1

%subplot(1, 2, 1)
plot(qcno_dB, ResOkCoh./ResNCoh);
hold on
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('P_{Ok}, dBHz');
grid on;
% text(29.5,0.55,'Когер. \rightarrow');

load ResNonCoh1

%subplot(1, 2, 1)
plot(qcno_dB, ResOkNonCoh./ResNNonCoh, 'g');
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('P_{Ok}, dBHz');
grid on;
% text(33.5,0.35,'\leftarrow Некогер. ');
legend('coherent', 'noncoherent');

```

```

figure(2);
load ResCoh1
%subplot(1, 2, 2)
plot(qcno_dB, (ResNCoh-ResOkCoh)./ResNCoh);
hold on
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('Error rate');
grid on;
% text(28.5,0.55,'Korep. \rightarrow');

load ResNonCoh1
%subplot(1, 2, 2)
plot(qcno_dB, (ResNNonCoh-ResOkNonCoh)./ResNNonCoh, 'g');
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('Error rate');
grid on;
% text(35.5,0.35,'\leftarrow Некореп. ');
legend('coherent', 'noncoherent');
s = sprintf('coh_compare_noncoh.png');

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ФУНКЦИЯ ДЕМОДУЛЯЦИИ СООБЩЕНИЯ В НЕКОГЕРЕНТНОМ РЕЖИМЕ

```
#include "uncoh_f.h"

int uncoh_solve(double I, double Q, double I_old, double Q_old, int symbol)
{
    int symbol_new;
    ((I*I_old + Q*Q_old) > -(I*I_old + Q*Q_old)) ? symbol_new = symbol:
symbol_new = -symbol;
    return symbol_new;
}

#ifdef UNCOH_F_H
#define UNCOH_F_H

int uncoh_solve(double I, double Q, double I_old, double Q_old, int symbol);

#endif // UNCOH_F_H
```

Программа для проверки правильности работы функции

```
clear all; close all; clc

if fopen('automatic_test', 'r') < 0
    automatic_test = 0;
    run_Cpp = 1;
else
    automatic_test = 1;
    run_Cpp = 0;
end

% if run_Cpp
% header;
% !./main &
% end

Nout = 1;
% fid_in = fopen('in.txt', 'w');
```

```

% fid_out = fopen('out.txt','w');

ttt = 0;

f0 = 1602e6; %ниSниSниSниSниSниSниSниSниSниS ниSниSниSниSниSниS ниSниSниSниSниSниS

N = 200;

LWord = 30;

B = nan(1, LWord);

B_mat = nan(1, LWord);

bB = nan(1, LWord+1); bB(1) = -1;

symbol_cpp = nan(1,31);

Coh = 1; NonCoh = 2;

Algo = NonCoh;

T = 0.02;

qcno_dB = 10:2:40;

%qcno_dB = [30,37,45];

qcno = 10.^(qcno_dB/10);

std_IQ = 1;

A_IQ = sqrt(2*qcno*T) * std_IQ;

dfph = 20;

dff = 3;

if Algo == Coh

    std_dw = zeros(1, length(qcno)); % PкCfP¶PSPs P·P°PIPμCfC, Pë CfCThPrP° CThPμP·CfP»CThC, P°C,
    CThPμCεPμPSPëCfC¶ PrPëCfPμCThCfPëPSPSC.C... CfCThP°PIPSPμPSPëP№

    %std_dphi = zeros(1, length(qcno));

    % std_dphi = sqrt(dfph./qcno);

    std_dphi = sqrt(dfph./qcno.*(1+1/2/T./qcno));

else

    % std_dw = sqrt(3*dff./(qcno*T^2));

    std_dw = sqrt(4*1*dff/T^2./qcno.*(1+1/2/T./qcno));

    %std_dw = zeros(1, length(qcno));

    std_dphi = zeros(1, length(qcno));

```

```

end

ResOk = zeros(1, length(qcno));
ResOk_mat = zeros(1, length(qcno));
ResN = zeros(1, length(qcno));

for i = 1:N
    for j = 1:length(qcno_dB)
        Word = 2*(randn(1, LWord) > 0) - 1;

        nI = randn(1, LWord+1) * std_IQ;
        nQ = randn(1, LWord+1) * std_IQ;

        dw = randn(1, LWord+1) * std_dw(j);
        dphi = randn(1, LWord+1) * std_dphi(j) + cumsum(dw)*T;

        I = A_IQ(j) * cos(dphi).*[0 Word] + nI;
        Q = -A_IQ(j) * sin(dphi).*[0 Word] + nQ;
        for kk = 1:31
            I_help = I(kk);
            Q_help = Q(kk);

            if kk == 1
                if run_Cpp
                    header;
                    !./main &
                end
            end
            if run_Cpp
                fprintf( in_fid, '%f %f\n', I(kk), Q(kk));

                suc = -1;
                while suc ~= Nout
                    [symbol_cpp_help suc] = fscanf(out_fid,'%d\n', Nout);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    else
        symbol_cpp_help = nan(1);
    end
    symbol_cpp(kk) = symbol_cpp_help;
    if kk == 31
        footer;
    end
    fprintf('%d %d %d\n', i, j, kk);
end
%if (i == 1) && (j == 16)
%    fprintf( fid_I, '%s ', I);
%    fprintf( fid_Q, '%s ', Q);
%fprintf( fid_Word, '%d\n', -1);
%fprintf( fid_Word, '%d\n', Word);
%ttt = ttt + 1;
%end

%    if (Algo == Coh)
%        B = sign(I(2:end));
%    else
%        for k = 2:(LWord+1)
%            %X1 = (I(k) + I(k-1))^2 + (Q(k) + Q(k-1))^2;
%            %X2 = (I(k) - I(k-1))^2 + (Q(k) - Q(k-1))^2;
%            %if X1 > X2
%                % bB(k) = bB(k-1);
%            %else
%                % bB(k) = -1*bB(k-1);
%            %end
%            bB(k) = noncoh_fun( I(k), Q(k), I(k-1), Q(k-1), bB(k-1));
%        end
%    end
end
%    end

```



```

    B = symbol_cpp(2:end);
    B_mat = bB(2:end);
    ResN(j) = ResN(j) + 1;
    if (isequal(Word, -B) || isequal(Word, B))
        ResOk(j) = ResOk(j) + 1;
    end
    if (isequal(Word, -B_mat) || isequal(Word, B_mat))
        ResOk_mat(j) = ResOk_mat(j) + 1;
    end
end
end
end

figure(1);
% subplot(1, 2, 1)
plot(qcno_dB, ResOk./ResN, qcno_dB, ResOk_mat./ResN);
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('P_{Ok}, dBHz');
grid on;
legend('MATLAB','C++');
save('p_ok_m_c.jpg');

figure(2);
% subplot(1, 2, 2)
plot(qcno_dB, (ResN-ResOk)./ResN, qcno_dB, (ResN-ResOk_mat)./ResN);
xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
ylabel('Error rate');
grid on;
legend('MATLAB','C++');
save('p_error_m_c.jpg');

if (Algo == Coh)
    ResOkCoh = ResOk;
    ResNCoh = ResN;
    save('ResCoh1.mat');

```

```

else
    ResOkNonCoh = ResOk;
    ResNNonCoh = ResN;
    save('ResNonCoh1.mat');
end

% figure(2);
% if (Algo == Coh)
%     plot(qcno_dB,std_dphi)
%     xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
%     ylabel('ññññññS phi,rad');
% else
%     plot(qcno_dB,std_dw)
%     xlabel('q_{c/N0}, dBHz');
%     ylabel('ññññññS w,Hz');
% end
% grid on
% fclose(fid_I);
% fclose(fid_Q);
% fclose(fid_Word);

// работает
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <stdlib.h>
int uncoh_solve(double I,double Q,double I_old,double Q_old,int symbol);
using namespace std;

int main()
{
    float text_I[31], text_Q[31];
    float I, Q, I_old, Q_old;
    int symbol, symbol_old;
    int Word[30];
    int Nin = 2;
    FILE* out_fid;
    // out_fid = fopen("out.txt", "w");

    FILE* in_fid;
    // in_fid = fopen("in.txt", "r");

```

```

int i, res_OK, suc;
i = 0;

for (;;) {
    if (i == 0) {
        out_fid = fopen("out.txt", "w");
        in_fid = fopen("in.txt", "r");
    }
    suc = fscanf(in_fid, "%f %f\n", &I, &Q);

    if (i == 0) {
        I_old = I;
        Q_old = Q;
        symbol = -1;
        symbol_old = -1;
        i++;
    } else {
        symbol = uncoh_solve( I, Q, I_old, Q_old, symbol_old);
        symbol_old = symbol;
        I_old = I;
        Q_old = Q;
        if (i != 30)
            i++;
        else
            i = 0;
    }

    if (suc == Nin) {

        fprintf(out_fid, "%d\n", symbol); // Pream Ok bla bla bla
        fflush(out_fid);}

    if (i == 0) {
        fclose(out_fid);
        fclose(in_fid);
    }
}

return 0;
}

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. ИСХОДНЫЕ КОДЫ СКРИПТА НАСТРОЙКИ ИМИТАТОРА СИГНАЛА

```
[status, SMBV] = rs_connect('tcpip', '192.168.0.177');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:PRES');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:SMODE USER');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:LOC:SEL "Moscow"');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:SAT:COUNT 4');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:POWER:REF -110');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:POW:MODE AUTO');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:GOC');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:STAT ON');
rs_send_command(SMBV, '*OPC?');
rs_send_command(SMBV, 'SOUR:BB:GPS:TRIG:EXEC');
```

```
RefPow = -100:-1:-130;
```

```
for i = 1:length(RefPow);
```

```
    [st]=rs_send_command(SMBV, ...
```

```
        sprintf('SOUR:BB:GPS:POWER:REF %.1f',RefPow));
```

```
    if (st == 0)
```

```
        return;
```

```
    end
```

```
end
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ИСХОДНЫЕ КОДЫ СКРИПТА ОБРАБОТКИ ПАКЕТА 0X0042

Скрипт описания структуры пакета **srns\_0x42.m**:

```
clear all; close all; clc
filename = '/tmp/srns_0x0042.txt';

fields_0x0042 = { 't', ...
                 'sgnID', ...
                 'type', ...
                 'ID', ...
                 'q', ...
                 'state', ...
                 'sym_state', ...
                 'frame_state', ...
                 'time_corr', ...
                 'rsrv', ...
                 'numSF', ...
                 'numOK' ...
                 };

fields = fields_0x0042;
nocycle = 0;

timefmt = 'M0';

tdismiss = 0;
% tstart = 120;
% tstop = 160;

SgnType = {'GpsL1CA'};

% Param = {'q'};
% Param = {'NuSucOverTime'};
% Param = {'NuSucOverTime', 'NuSucOverQ'};
% Param = {'NuSucOverQ'};
Param = {'PSucOverQ'};

plotcmd = 'plot_srns_0x0042';
% plotcmd = "";

parsefile;
```

## Скрипт построения графиков **plot\_srns\_0x0042.m**:

```
globals;

% Список спутников с измерениями хотя бы по одному типу
create_list_sys;

% Установка пределов по времени
timefmt0 = 's';
choosetime;

maxq = 57;
for jP = 1:length(Param)
    figure(jP); clf;

    if exist('figName', 'var')
        set(gcf, 'Name', figName{jP});
    end

    if ( sum(strcmp(Param{jP}, D.fields) > 0) || strcmp(Param{jP}, 'NuSucOverTime') )
        j = 0;
        for sys = {'Gln', 'Gps'}
            for sv = D.list(sys{1})
                if isempty(sv)
                    continue;
                end
                j = j + 1;
                subplot(tx, ty, j);
                strTit = []; strTit2 = [];
                needlit = 0; warnings = 0;
                for jT = 1:length(SgnType)
                    if ~strcmp(SgnType{jT}(1:3), sys{1})
                        continue;
                    end
                    if ismember(sv, D.list(SgnType{jT}))
                        if (strcmp(Param{jP}, 'NuSucOverTime'))
                            if (strcmp(SgnType{jT}, 'GpsL1CA'))
                                y = D.(SgnType{jT})(sv).numOK / 10;
                            else
                                y = 0;
                            end
                        else
                            y = D.(SgnType{jT})(sv).(Param{jP});
                        end
                        x = D.(SgnType{jT})(sv).t;
                    else
                        continue;
                    end
                end
                x = convtime(x, tmin, timefmt0, timefmt);

                if D.(SgnType{jT})(sv).size > 50
                    dx = diff(x);
                    dmed = median(diff(x));
                end
            end
        end
    end
end
```

```

indgap = find(abs(dx) > 2*dmed);
for ig = 1:length(indgap)
    iga = ig-1 + indgap(ig);
    x = [x(1:iga), NaN, x(iga+1:end)];
    y = [y(1:iga), NaN, y(iga+1:end)];
end
end

plot(x, y, Col{jT});
hold on

if (strcmp(Param{jP}, 'q'))
    maxq = max([max(y) maxq]);
end
if (D.(SgnType{jT})(sv).size > 0)
    strSgnType = D.Types{D.(SgnType{jT})(sv).type+1};
    strSgnType = strSgnType(4:end);
    strSVID = num2str(sv);

    strState = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).state(end));
    strSymState = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).sym_state(end));
    strFrameState = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).frame_state(end));
    strSolState = 'x';
    strTimeCorr = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).time_corr(end));
    strHaveEph = 'x';
    strHaveAlm = 'x';
    strFlag = [strState strSymState strFrameState strTimeCorr strHaveEph
strSolState strHaveAlm];

    strTit = [strTit strSgnType '/'];
    strTit2 = [strTit2 strFlag '/'];
    if strcmp(SgnType{jT}(end), 'F')
        needlit = 1;
    end
    if (D.(SgnType{jT})(sv).size < 2)
        warnings = warnings + 1;
    end
end
end
hold off

xlim([tminlim tmaxlim]);

if needlit
    strLit = ['(' num2str(id2lit(sv)) ')'];
else
    strLit = '';
end
strTit = [strTit(1:end-1) ' #' strSVID strLit];
strTit2 = strTit2(1:end-1);

title({strTit, strTit2}, 'FontWeight','normal');

```

```

    if (warnings > 0)
        set(gca, 'Color', [1 0.5 0.5]);
    end

    xlabel(['t, ' timeunit(timefmt)]);
    if strcmp(Param{jP}, 'q')
        ylim([5 maxq]);
        ylabel('q_{c/n0}, dBHz');
    end
end
end
end

elseif (strcmp(Param{jP}, 'NuSucOverQ') || strcmp(Param{jP}, 'PSucOverQ'))
    j = 0;
    for sys = {'Gln', 'Gps'}
        for sv = D.list(sys{1})
            if isempty(sv)
                continue;
            end
            j = j + 1;
            subplot(tx, ty, j);
            strTit = []; strTit2 = [];
            needlit = 0; warnings = 0;
            for jT = 1:length(SgnType)
                if ~strcmp(SgnType{jT}(1:3), sys{1})
                    continue;
                end
                if ismember(sv, D.list(SgnType{jT}))
                    x = D.(SgnType{jT})(sv).q;
                    if (strcmp(Param{jP}, 'NuSucOverQ'))
                        if (strcmp(SgnType{jT}, 'GpsL1CA'))
                            y = D.(SgnType{jT})(sv).numOK / 10;
                        else
                            continue;
                        end
                    elseif (strcmp(Param{jP}, 'PSucOverQ'))
                        if (strcmp(SgnType{jT}, 'GpsL1CA'))
                            q = [20:0.5:30 31:2:40];
                            ind = bin2ind(x, q);
                            y = nan(1, length(q));
                            nu = D.(SgnType{jT})(sv).numOK / 10;
                            for ii = 1:length(q)
                                if (length(ind{ii}) < 2)
                                    ind{ii} = [];
                                end
                                y(ii) = mean(nu(ind{ii}));
                            end
                            x = q;
                            xj{j} = x;
                            yj{j} = y;
                        else
                            continue;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



```

        else
            continue;
        end
    else
        continue;
    end

    if (strcmp(Param{jP}, 'NuSucOverQ'))
        plot(x, y, [Col{jT}, '.']);
        hold on
    %     plot(x, y, [Col{jT}]);
    elseif (strcmp(Param{jP}, 'PSucOverQ'))
        plot(x, y, [Col{jT}]);
        hold on
    end

    if (D.(SgnType{jT})(sv).size > 0)
        strSgnType = D.Types{D.(SgnType{jT})(sv).type+1};
        strSgnType = strSgnType(4:end);
        strSVID = num2str(sv);

        strState = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).state(end));
        strSymState = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).sym_state(end));
        strFrameState = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).frame_state(end));
        strSolState = 'x';
        strTimeCorr = num2str(D.(SgnType{jT})(sv).time_corr(end));
        strHaveEph = 'x';
        strHaveAlm = 'x';
        strFlag = [strState strSymState strFrameState strTimeCorr strHaveEph
strSolState strHaveAlm];

        strTit = [strTit strSgnType '/'];
        strTit2 = [strTit2 strFlag '/'];
        if strcmp(SgnType{jT}(end), 'F')
            needlit = 1;
        end
        if (D.(SgnType{jT})(sv).size < 2)
            warnings = warnings + 1;
        end
    end
end
end
hold off

%     xlim([tminlim tmaxlim]);

if needlit
    strLit = ['(' num2str(id2lit(sv)) ')'];
else
    strLit = "";
end
strTit = [strTit(1:end-1) ' #' strSVID strLit];
strTit2 = strTit2(1:end-1);

```

```
title({strTit, strTit2}, 'FontWeight','normal');

if (warnings > 0)
    set(gca, 'Color', [1 0.5 0.5]);
end

xlabel('q, dBHz');
if strcmp(Param{jP}, 'NuSucOverQ')
    ylabel('Success rate');
end
end
end
end
end
```