

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

И.В. КОРОГОДИН

Е.В. ЗАХАРОВА

**ПРИЕМ И ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ
ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ
СИСТЕМ**

Лабораторный практикум

по курсу «Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем» для студентов, обучающихся по направлению 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Москва

Издательство МЭИ

2020

Оборот титула

УДК 621.396

ББК 32.95

К 681

Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»

в качестве учебного издания

Подготовлено на кафедре радиотехнических систем

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент, доцент каф. РТС А.Ю. Шатилов,
канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника отделения
74 разработки перспективной аппаратуры навигации
АО «РКС» Р.В. Бакитько

Корогодин, И.В.

К 681 Прием и формирование сигналов глобальных навигационных спутниковых систем: лабораторный практикум / И.В. Корогодин, Е.В. Захарова.— М.: Издательство МЭИ, 2020. – 66 с.

ISBN

Лабораторный практикум содержит описания и программы лабораторных работ, основные теоретические сведения, описание последовательности выполнения работы, требования к отчёту, контрольные вопросы. Включены пять лабораторных работ по формированию и исследованию существующих и перспективных навигационных радиосигналов; по исследованию характеристик МШУ аппаратуры потребителей СРНС и условий его работы; по помехоустойчивости и чувствительности навигационных модулей; по исследованию коррелятора АП СРНС ГЛОНАСС с помощью имитационной модели.

Продолжительность каждого лабораторного занятия – 4 ч. для студентов, обучающихся по направлению «Радиоэлектронные системы и комплексы».

УДК 621.396

ББК 32.95

ISBN

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2020

Концевая полоса

Учебное издание

Корогодин Илья Владимирович

Захарова Елена Владимировна

**ПРИЕМ И ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ
ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ
СИСТЕМ**

Лабораторный практикум

по курсу «Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем» для студентов, обучающихся по направлению 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Редактор Д.Р. Чернова

Компьютерная верстка З.Х. Айнетдиновой

Подписано в печать ...

Физ. печ. л. 4,125

Тираж 50 экз.

Печать офсетная

Изд. №

Формат 60x84/16

Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».

111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14.

Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».

111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.13.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	5
1. Лабораторная работа №1 «Формирование и исследование существующих и перспективных навигационных радиосигналов».....	6
1.1. Состав стенда	6
1.2. Формирование навигационного радиосигнала с помощью векторного генератора.....	6
1.2.1. Модулирующая последовательность навигационного радиосигнала.....	6
1.2.2. Создание DataList-файла с помощью программы WinIQSim2..	8
1.2.3. Структура DataList-файла.....	11
1.2.4. Использование DataList-файла для формирования сигнала....	12
1.2.5. Формирование метки начала последовательности.....	17
1.2.6. Осциллограммы сформированных сигналов.....	19
1.2.7. Обработка сформированного сигнала навигационным приемником: спектр сформированного сигнала.....	19
1.3. Домашняя подготовка.....	21
1.4. Лабораторное задание.....	21
1.5. Содержание отчета.....	21
1.6. Контрольные вопросы.....	22
2. Лабораторная работа №2 «Исследование характеристик МШУ аппаратуры потребителей СРНС и условий его работы».....	22
2.1. Состав стенда.....	22
2.2. Описание	23
2.3. Домашняя подготовка.....	25
2.4. Лабораторное задание.....	25
2.4.1. Оценка мощности навигационных сигналов.....	26
2.4.2. Исследование характеристик МШУ.....	28
2.5. Контрольные вопросы.....	30
3. Лабораторная работа №3 «Чувствительность навигационных модулей».....	31
3.1. Общая информация.....	31
3.1.1. Основные понятия.....	32
3.1.2. Схемы экспериментальных установок.....	33
3.2. Домашнее задание.....	35
3.3. Лабораторное задание.....	36
3.3.1. Определение коэффициента передачи сборного аттенюатора..	36
3.3.2. Определение чувствительности навигационного модуля.....	37
3.4. Контрольные вопросы	39
3.5. Приложение 1. Бланк протокола.....	39
3.6. Приложение 2. Описание навигационного модуля НАВИС	

СН-4706.....	41
3.7. Приложение 3. Описание интерфейсной программы навигационных модулей u-center	42
4. Лабораторная работа №4 «Помехоустойчивость навигационных модулей».....	45
4.1. Общая информация.....	45
4.1.1. Основные понятия.....	45
4.1.2. Схемы экспериментальных установок.....	46
4.2. Лабораторное задание.....	49
4.2.1. Определение коэффициента передачи аттенюатора.....	49
4.2.2. Определение разности коэффициентов передачи разветвителя.....	49
4.2.3. Определение помехоустойчивости навигационного модуля в условиях холодного старта.....	50
4.2.4. Определение помехоустойчивости навигационного модуля в условиях слежения.....	52
4.3. Контрольные вопросы.....	53
4.4. Приложение 1. Бланк протокола.....	54
4.4.1. Помехоустойчивость поиска.....	54
4.4.2. Помехоустойчивость слежения.....	55
5. Лабораторная работа №5 «Исследование коррелятора АП СРНС ГЛОНАСС с помощью имитационной модели».....	56
5.1. Состав стенда.....	56
5.2. Описание имитационной модели.....	56
5.2.1. Возможности имитационной модели.....	57
5.2.2. Базовые математические модели.....	57
5.2.3. Работа с имитационной моделью.....	58
5.3. Домашняя подготовка.....	63
5.4. Лабораторное задание.....	64
5.5. Контрольные вопросы.....	64
Список рекомендованной литературы.....	66

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный лабораторный практикум включает в себя пять лабораторных работ и предназначен для студентов, изучающих базовый курс «Аппаратура потребителей спутниковых радионавигационных систем».

В лабораторных работах изучаются и подробно исследуются навигационные радиосигналы и составные части навигационного приемника аппаратуры потребителей (АП) спутниковых радионавигационных сигналов (СРНС), а именно: в лабораторной работе №1 рассматривается формирование и исследование существующих и перспективных навигационных радиосигналов; в лабораторной работе №2 исследуются характеристики малошумящего усилителя АП СРНС и условия его работы; в лабораторной работе №3 оценивается чувствительность навигационных модулей; в лабораторной работе №4 оценивается помехоустойчивость навигационных модулей; в лабораторной работе №5 исследуется коррелятор АП СРНС ГЛОНАСС с помощью имитационной модели.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ»

Цель работы: расширение представлений о структуре существующих и перспективных навигационных сигналов; изучение возможностей современных векторных генераторов сигналов по формированию сигналов с произвольной структурой; получение опыта работы с векторным генератором, анализатором спектра, осциллографом и навигационным приемником.

1.1. Состав стенда

В состав стенда лабораторной работы №1 входит следующее оборудование:

- векторный генератор сигналов R&S SMBV100A или аналог;
- осциллограф R&S RTO1024 или аналог;
- анализатор спектра и сигналов R&S FSV3 или аналог;
- тестовый приемник с необходимой периферией;
- персональный компьютер с установленным ПО WinIQSim2 (опционально).

1.2. Формирование навигационного радиосигнала с помощью векторного генератора

Векторный генератор сигналов R&S SMBV100A способен формировать сигналы произвольного вида, удовлетворяющие ограничениям по полосе (до 60 или 120 МГц в зависимости от опций) и несущей частоте (до 3 или 6 ГГц). Для этого сигнал представляется в виде своего низкочастотного эквивалента, который используется генератором для модуляции несущего колебания в соответствии со следующей математической моделью:

$$y(t) = A \cdot I(t) \cos(\omega_0 t) - A \cdot Q(t) \sin(\omega_0 t), \quad (1.1)$$

1.2.1. Модулирующая последовательность навигационного радиосигнала

В случае сигнала BPSK и отсутствии ограничений на значение начальной фазы, низкочастотный эквивалент может быть представлен в виде:

$$\begin{cases} I(t) = \cos(\pi \cdot \theta_k); \\ Q(t) = 0, \end{cases} \quad (1.2)$$

где $\theta(t)$ – модулирующая функция (рис.1.1), принимающая значения $\{0; 1\}$.

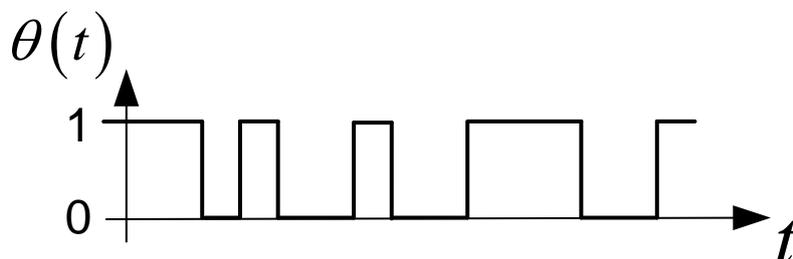


Рис. 1.1. Пример функции $\theta(t)$

В большинстве радиотехнических приложений ось времени можно разбить на равные интервалы, в течение которых смена значений функции $\theta(t)$ не происходит – манипуляция сигнала производится с некоторым периодом τ_{chip} . Тогда функцию $\theta(t)$ можно описать последовательностью её значений на каждом интервале [1]:

$$\theta_k = \theta(t_k) \quad (1.3)$$

В современных векторных генераторах присутствует возможность формирования BPSK-сигналов по записанной в файл или оперативную память последовательности (1.3).

В свою очередь, манипуляция несущего колебания на π позволяет генерировать большинство существующих и перспективных радионавигационных сигналов [2, 3, 4].

Рассмотрим метод использования генератора сигнала R&S SMBV100A для решения задачи формирования навигационного радиосигнала на несущей частоте. Данная задача возникает на этапе разработки и отладки программного обеспечения НАП.

Для примера воспользуемся сигналами со следующими параметрами (GPS L1 C/A №1) [3, 4, 8, 9]:

- несущая частота 1575.42 МГц;
- ФМ-2 с темпом 1.023 МГц известной периодической последовательностью GPS C/A с первым порядковым номером.

Доплеровский сдвиг частоты положим равным нулю (как для огибающей, так и для несущей).

Дополнительно выдадим метку начала каждой эпохи последовательности посредством импульса на выходе *Marker 1* генератора.

1.2.2. Создание DataList-файла с помощью программы WinIQSim2

Для управления генераторами при помощи персонального компьютера компанией Rohde & Schwarz поставляется программное обеспечение, носящее название WinIQSim. Интерфейс (рис.1.2) и функции программы аналогичны интерфейсу и функциям программного обеспечения, установленного на приборах. Его использование в данной лабораторной работе обусловлено удобством импортирования модулирующих последовательностей из подготовленных студентами файлов. При отсутствии ПК с установленным WinIQSim аналогичные действия следует проводить непосредственно на приборе.

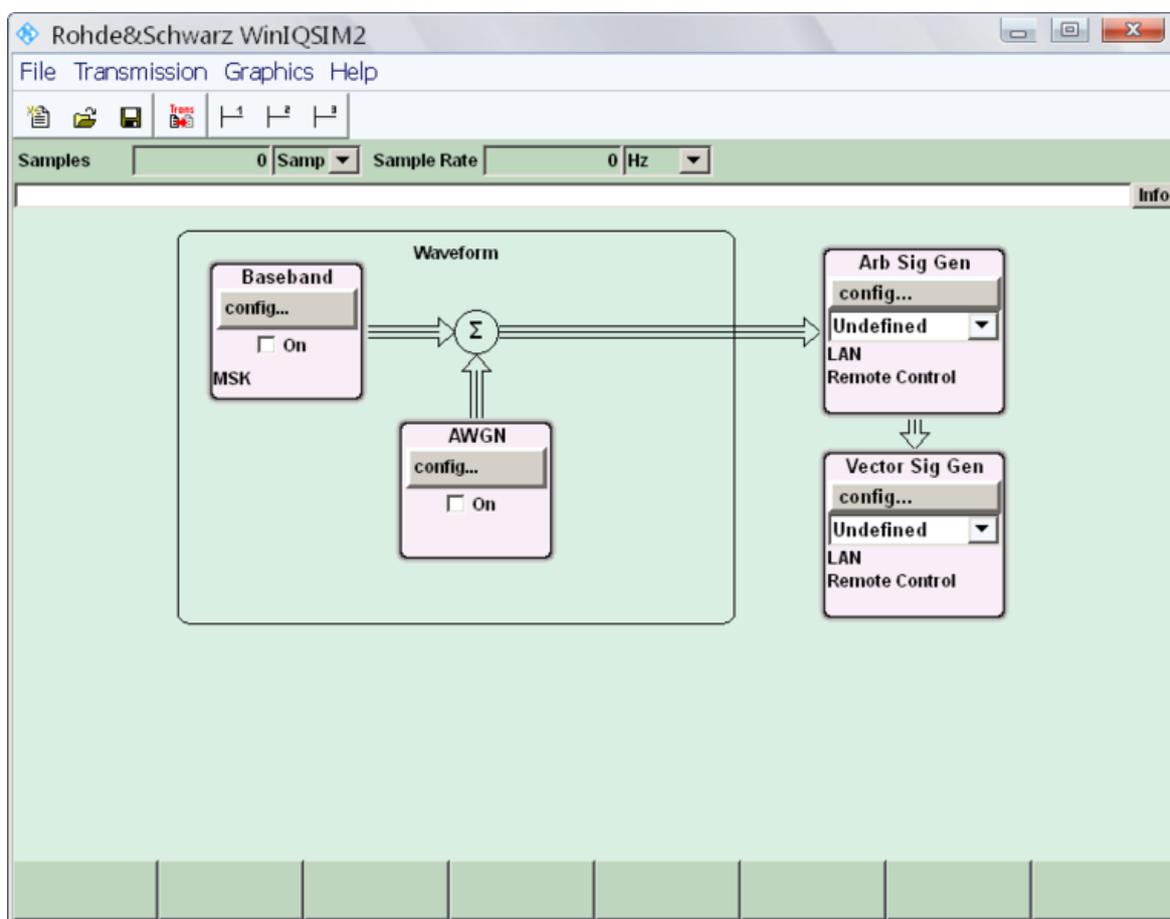


Рис.1.2. Интерфейс программы WinIQSim2

Программное обеспечение R&S хранит модулирующую последовательность в DataList-файле (расширение файла .dm_iqd).

Процесс создания DataList-файла в программе WinIQSim2:

1) В блоке *BaseBand* с помощью кнопки *config* выбираем режим *Custom Digital Mode* (рис.1.3).

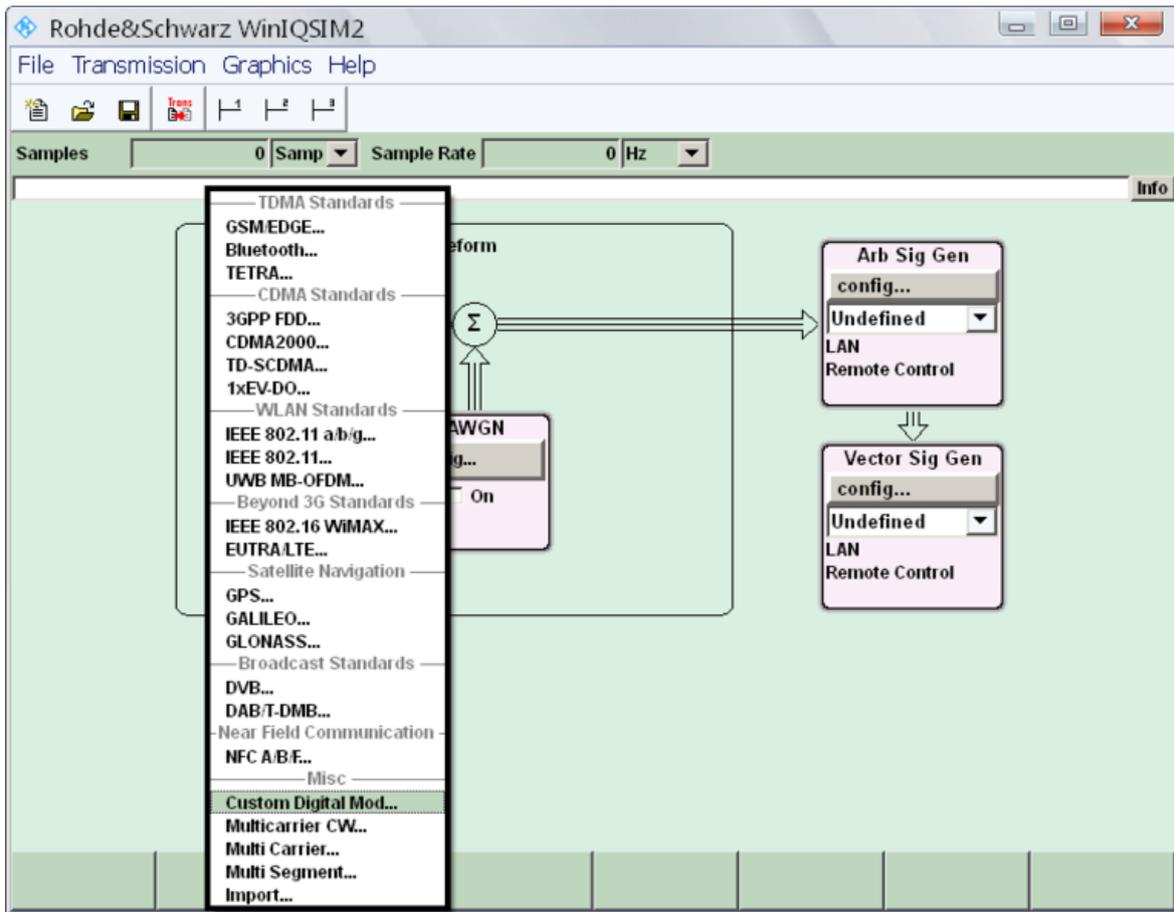


Рис.1.3. Интерфейс программы WinIQSim2 (пункт 1)

2) Далее входим в меню управления DataList-файлами *List Management* (рис.1.4).

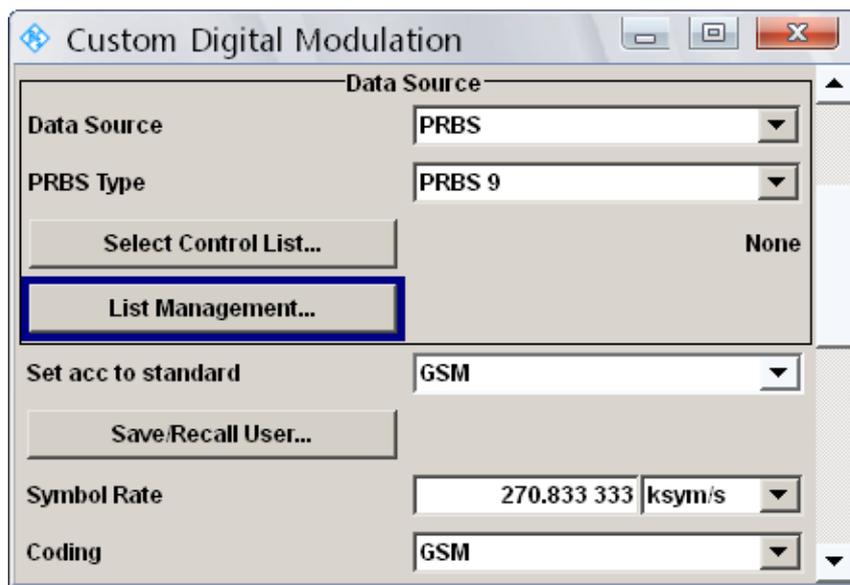


Рис.1.4. Интерфейс программы WinIQSim2 (пункт 2)

3) Иницилируем выбор файла для редактирования нажатием кнопки *Select Data List To Edit* (рис.1.5).

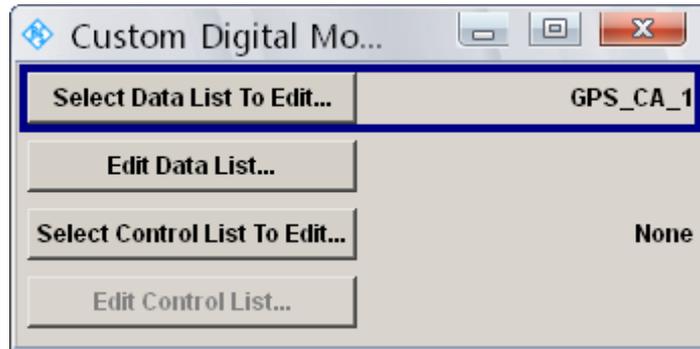


Рис.1.5. Интерфейс программы WinIQSim2 (пункт 3)

4) В выпадающем меню выбираем *Create Data List* для создания нового файла (рис.1.6).

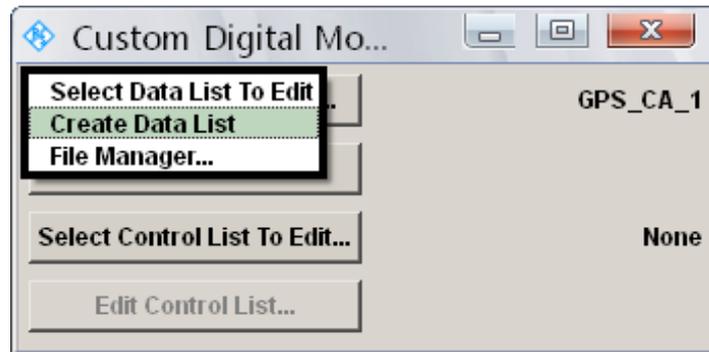


Рис.1.6. Интерфейс программы WinIQSim2 (пункт 4)

5) Создаем файл, далее переходим к его редактированию. Для этого следует выбрать *Edit Data List* (рис.1.7).

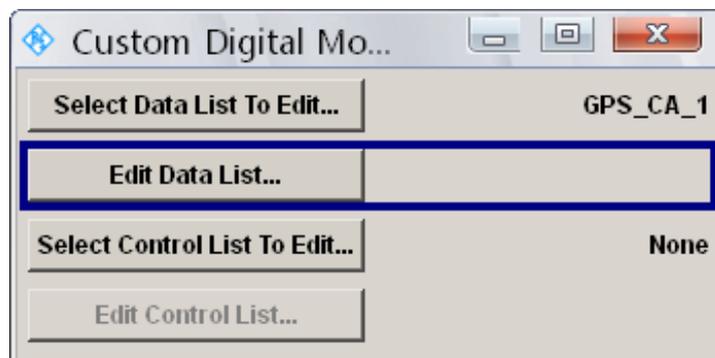


Рис.1.7. Интерфейс программы WinIQSim2 (пункт 5)

б) В редакторе вводим последовательность битов модуляции (рис.1.8, последовательность можно вставить из буфера обмена кнопкой *Paste*). Как именно применять эти биты генератору укажем позже. В случае с модуляцией BPSK: "1" - сдвиг фазы на π (множители модулятора $I = -1, Q = 0$), "0" - отсутствие сдвига фазы ($I = 1, Q = 0$) [4].

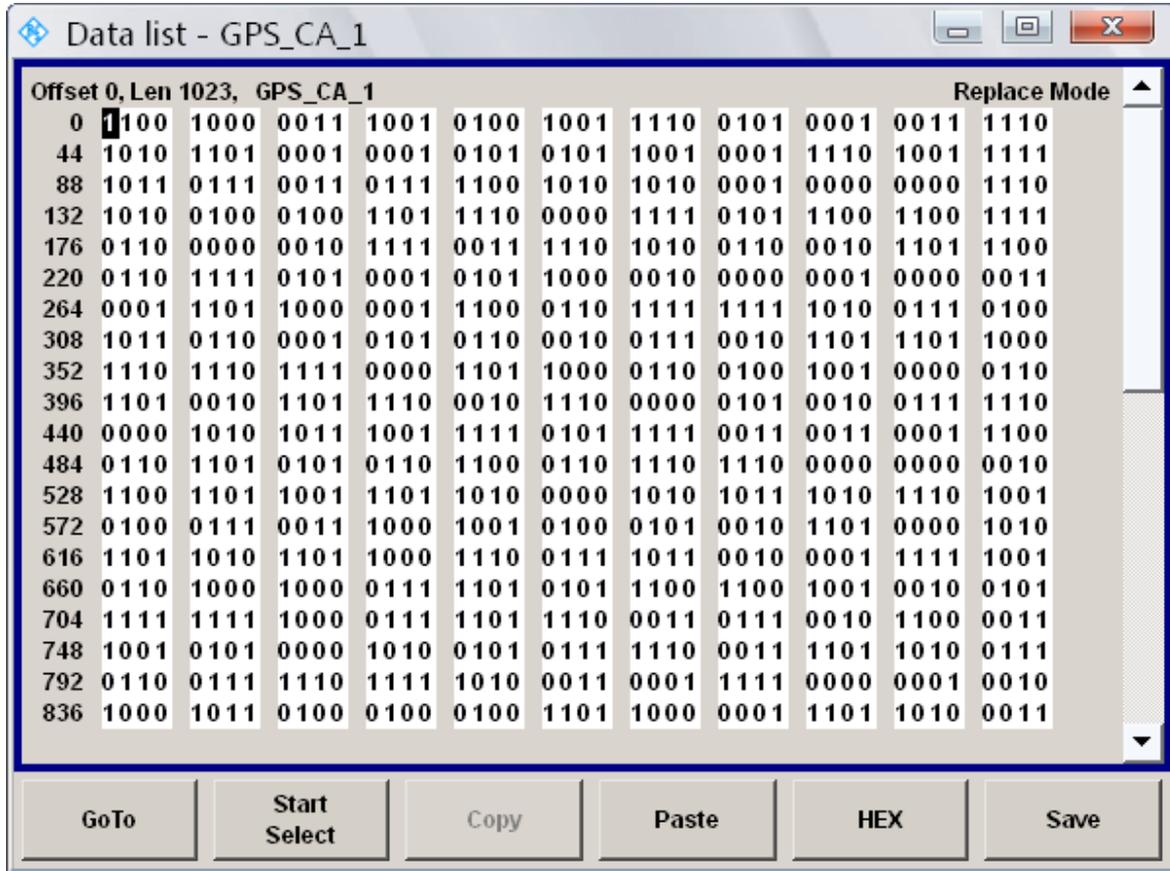


Рис.1.8. Интерфейс программы WinIQSim2 (пункт б)

При нажатии на кнопку *Save* формируется необходимый DataList-файл.

1.2.3. Структура DataList-файла

DataList является бинарным файлом, содержащим служебную информацию и последовательность модулирующих бит. Например, если в качестве модулирующей последовательности ввести 44 символа "100011000.....", то WinIQSim сформирует файл, содержимое которого представлено на рис.1.9.

На рис.1.9 запись 8С 00 00 00 00 0 – это запись в hex'e введенной строки "100011000.....". Последовательность байт перед этим

участком - служебная информация, содержащая тип прибора, длину последовательности (*DATA BITLENGTH*) и т.д.

```
0x00000000: 7b 54 59 50 45 3a 53 4d - 55 2d 44 4c 7d 7b 43 4f {TYPE:SMU-DL}{CO
0x00000010: 50 59 52 49 47 48 54 3a - 32 30 30 33 20 52 6f 68 PYRIGHT:2003 Roh
0x00000020: 64 65 26 53 63 68 77 61 - 72 7a 20 53 4d 55 7d 7b de&Schwarz SMU}{
0x00000030: 44 41 54 45 3a 32 30 31 - 31 2d 31 30 2d 30 33 3b DATE:2011-10-03;
0x00000040: 31 31 3a 35 39 3a 30 35 - 7d 7b 44 41 54 41 20 42 11:59:05}{DATA B
0x00000050: 49 54 4c 45 4e 47 54 48 - 3a 34 34 7d 7b 44 41 54 ITLENGTH:44}{DAT
0x00000060: 41 20 4c 49 53 54 2d 39 - 3a 23 8c 00 00 00 00 00 A LIST-9:#. @@@@
0x00000070: 00 00 7d - - - - - @}
```

Рис.1.9. DataList-файл

Если число символов в ПСП не кратно 4, то после последовательности модулирующих бит добавляется специальный код (тут 0 00 00 7d), который генератор распознает с помощью параметра *DATA BITLENGTH*.

Структура файла проста, легко составить программу его формирования без использования WinIQSim. Удобнее воспользоваться R&S CDM Tool.

1.2.4. Использование DataList-файла для формирования сигнала

DataList-файл создан, теперь его необходимо использовать в *векторном генераторе* (SMBV, SMJ) для манипуляции сигнала. Если ПК имеет непосредственный интерфейс с генератором (сеть или USB-кабель), то программа WinIQSim может сама управлять им, в том числе применять созданный DataList-файл. Иначе, можно предоставить файл генератору через флэш-накопитель и воспользоваться встроенным программным обеспечением:

1) Кнопкой Preset устанавливаем настройки генератора в значения по умолчанию.

2) Интерфейс встроенного ПО генератора повторяет интерфейс программы WinIQSim. Для применения созданного DataList-файла следует перейти в *config* блока *Baseband* (рис.1.10), где выбрать подпункт *Custom Digital Modulation*.

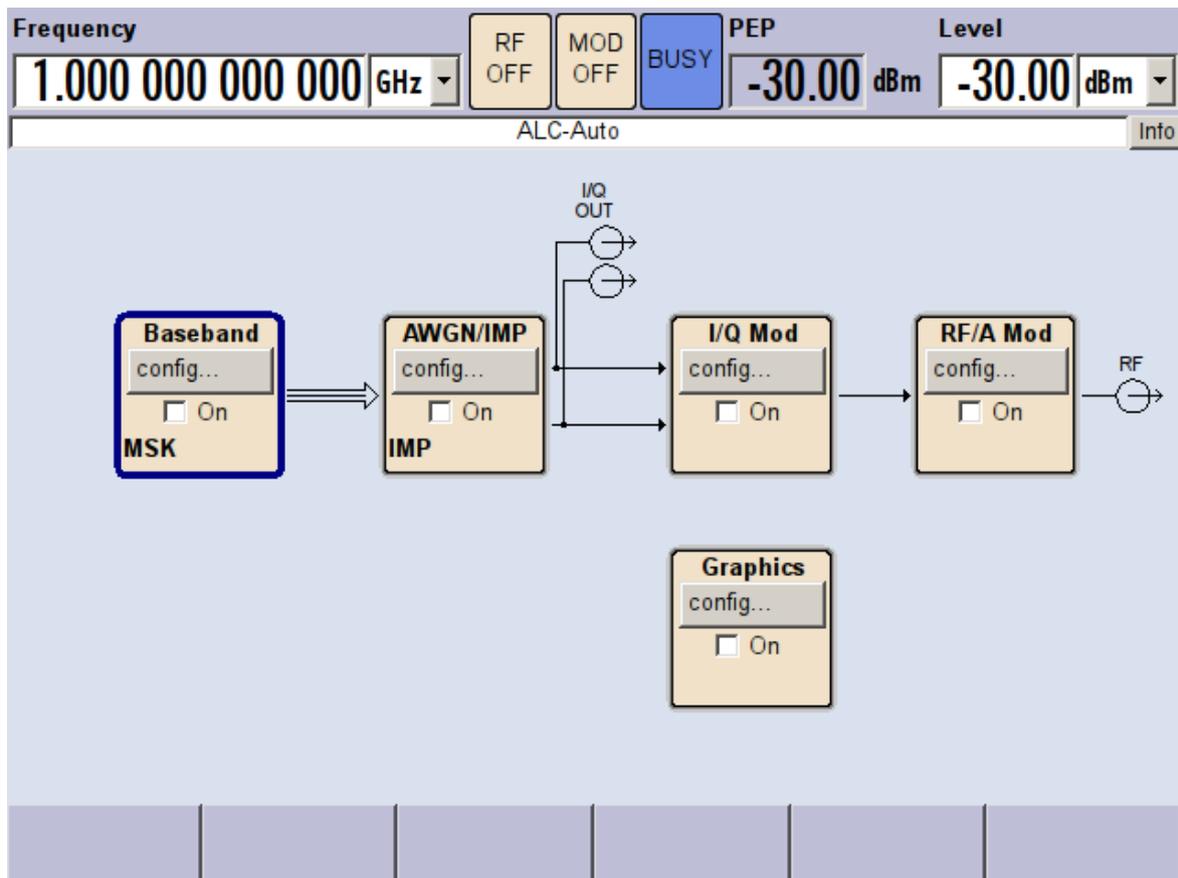


Рис.1.10. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 2)

3) В окне *Custom Digital Modulation* расположен блок настроек *Data Source* с помощью которого устанавливает источник данных для манипуляции сигнала. По-умолчанию в качестве источника указан генератор псевдослучайной последовательности *PRBS*, вместо него следует выбрать *DataList* (рис.1.11). При этом появятся кнопки выбора файлов *Select Data List* и *Select Control List*.

4) Открываем сгенерированный *DataList*-файл с помощью кнопки *Select Data List* (рис.1.12).

5) В графе *Symbol Rate* устанавливаем скорость следования символов кода, кодирование отключаем (рис.1.13).

6) Выбираем требуемый вид манипуляции, в нашем случае - *BPSK* (*binary phase-shift keying*, ФМ-2) (рис.1.14).

7) Выбираем вид фильтра для манипулирующих I,Q сигналов (рис.1.15).

8) Запускаем расчет квадратур для модулятора нажатием кнопки *On* (рис.1.16).

При этом загорается табличка *Mod on*, свидетельствующая о наличии входных сигналов на квадратурном модуляторе.

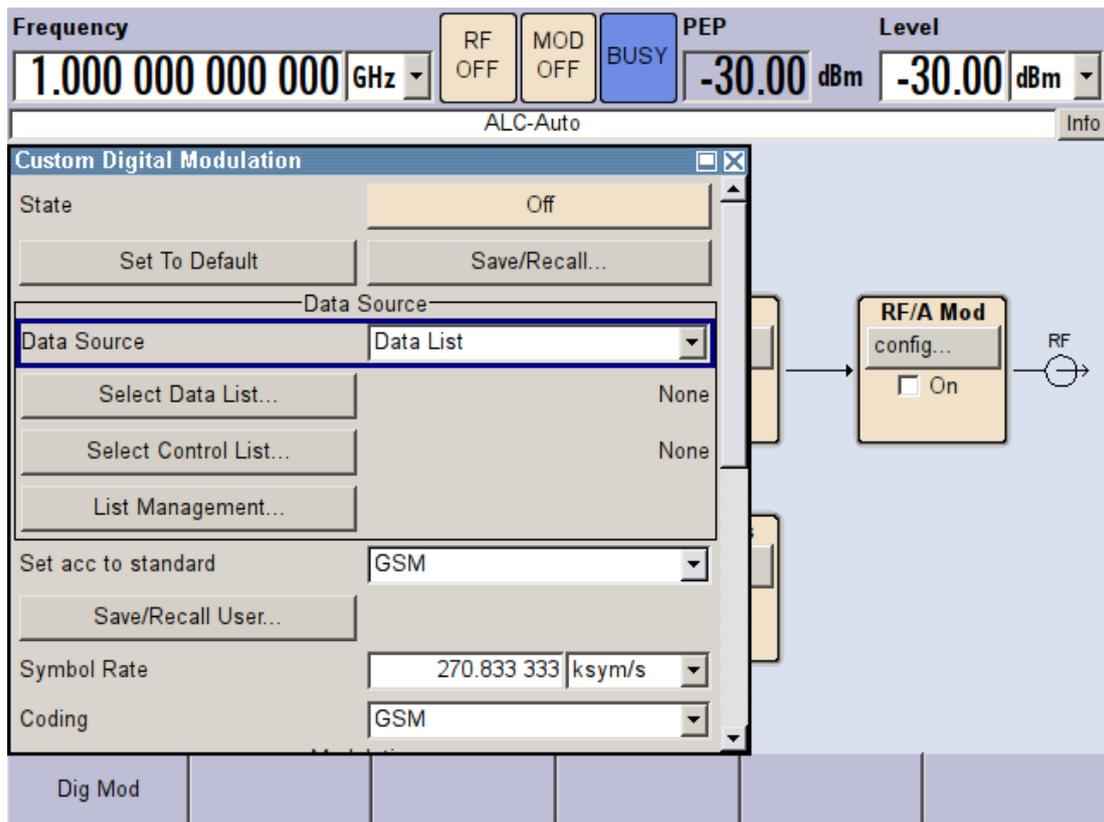


Рис.1.11. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 3)

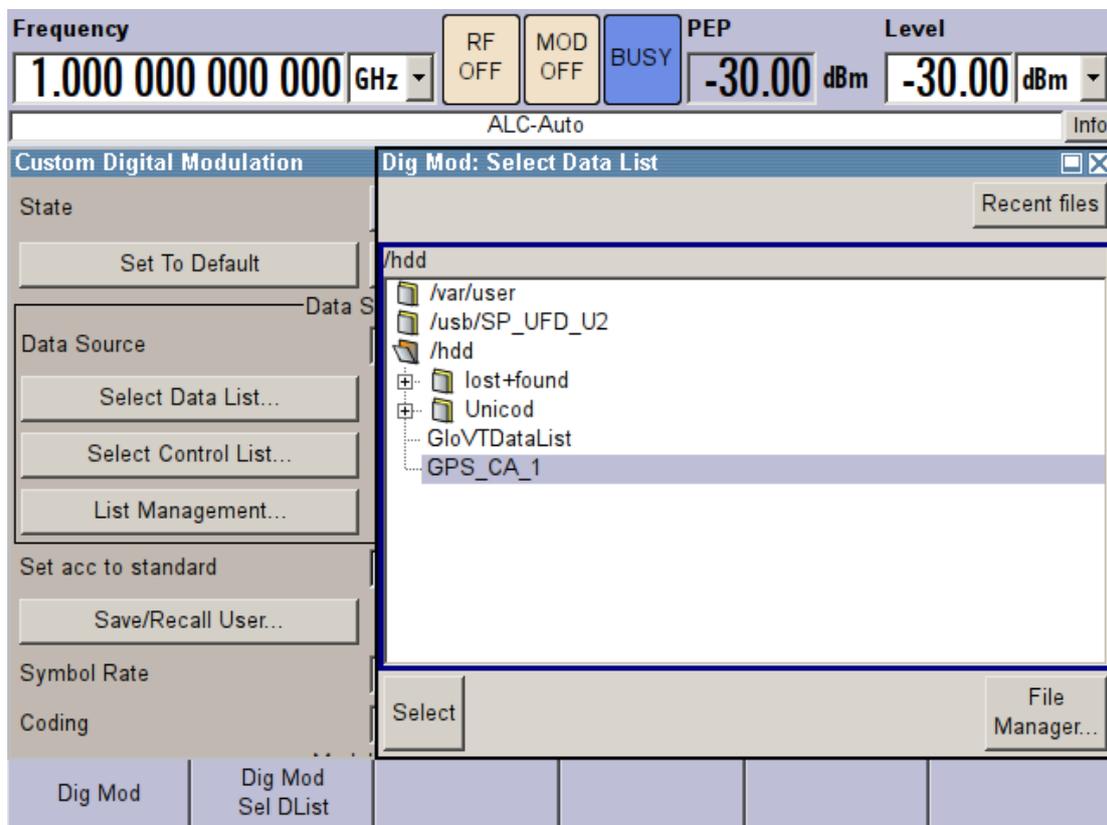


Рис.1.12. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 4)

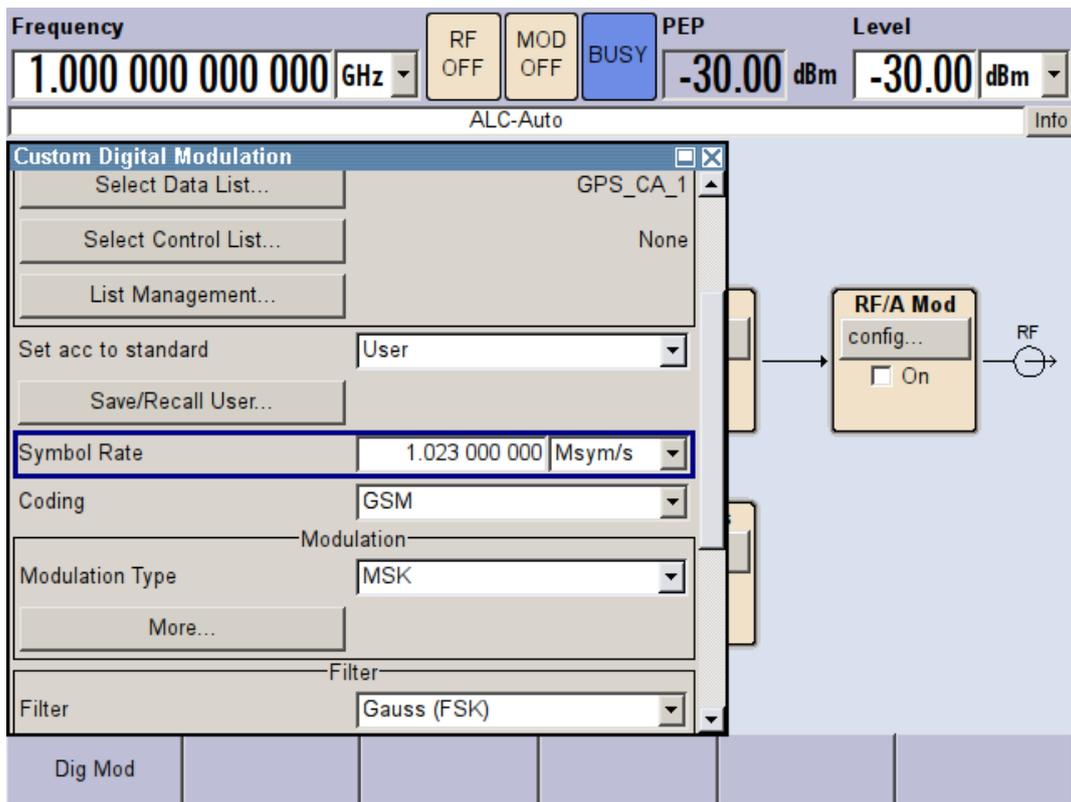


Рис.1.13. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 5)

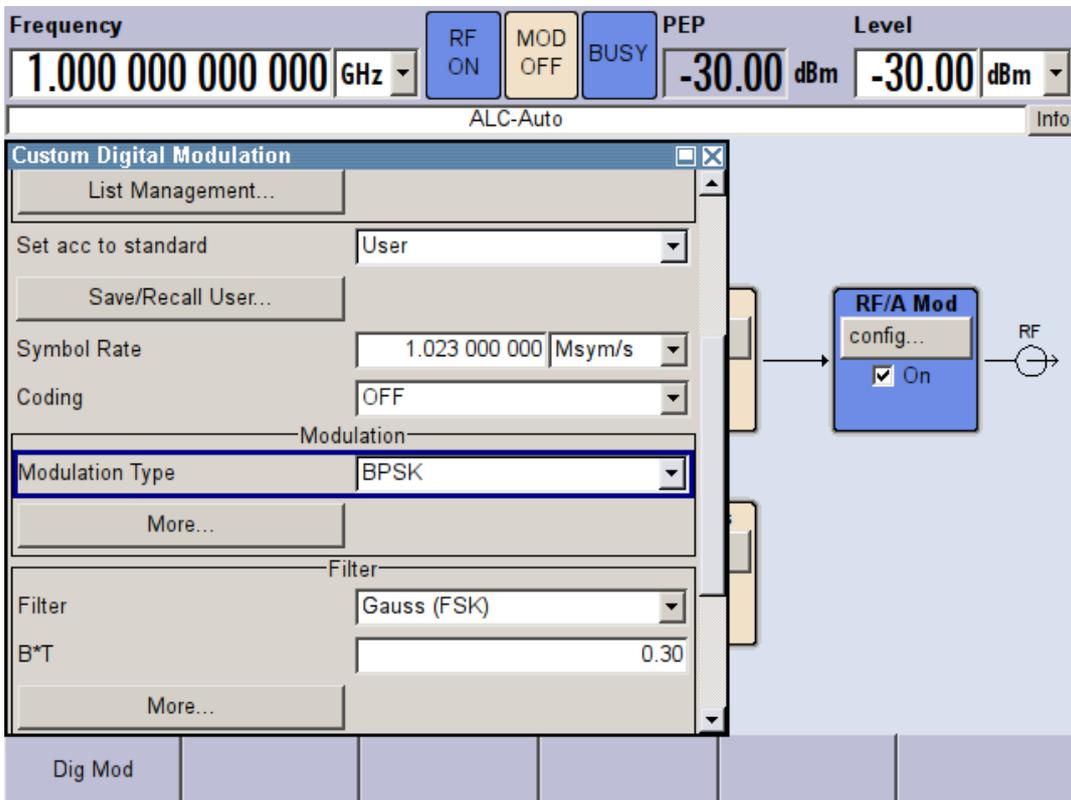


Рис.1.14. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 6)

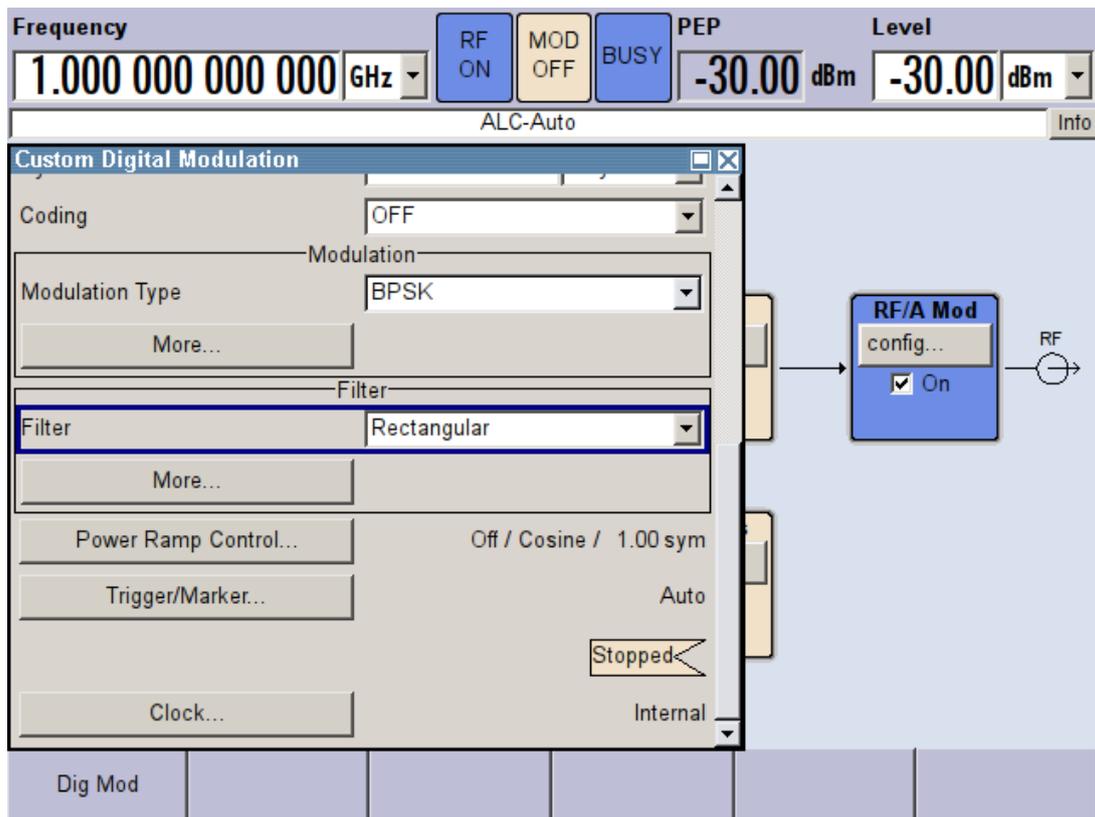


Рис.1.15. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 7)

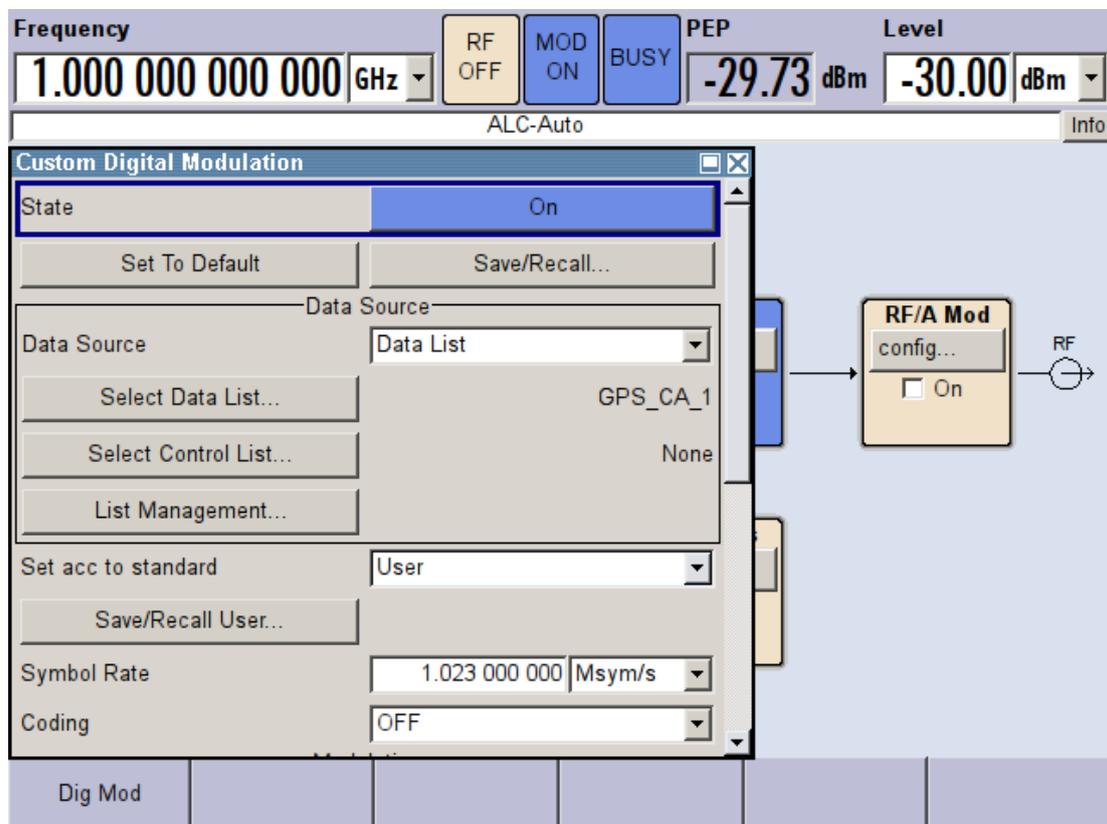


Рис.1.16. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 8)

9) Выбираем параметры несущей - частоту (*Frequency*) и мощность (*Level*). Подаем её на модулятор нажатием кнопки *RF on* (рис.1.17).

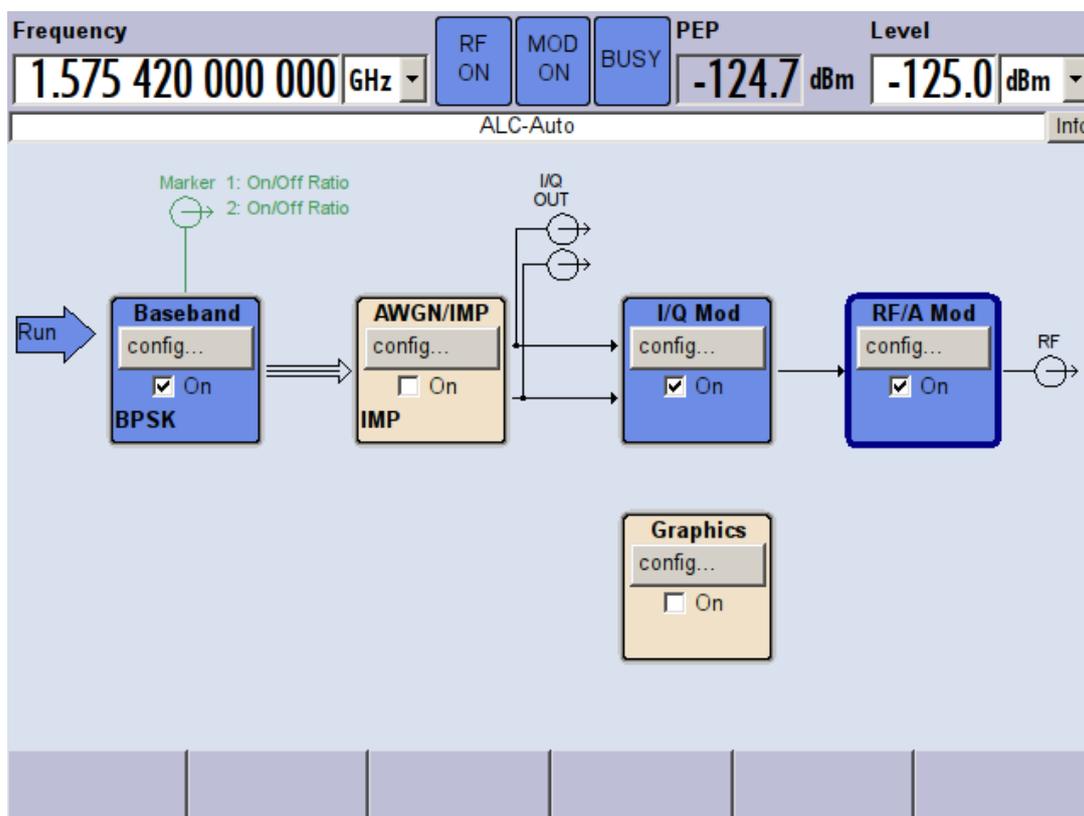


Рис.1.17. Интерфейс встроенного ПО генератора (пункт 9)

При этом загорается табличка *RF on* (рис.1.17), на радиочастотном выходе генератора появляется радиосигнал. На экране генератора отображается схема соединения: baseband-генератор формирует квадратурные сигналы для модулятора с помощью которых преобразуется высокочастотное колебание.

1.2.5. Формирование метки начала последовательности

Сформируем на дополнительном выходе генератора *Marker* импульс, синхронизированный с началом нового периода модулирующей последовательности.

Перейдем в меню *Marker* (в некоторых версиях ПО *Trigger/Marker*, рис. 1.18).

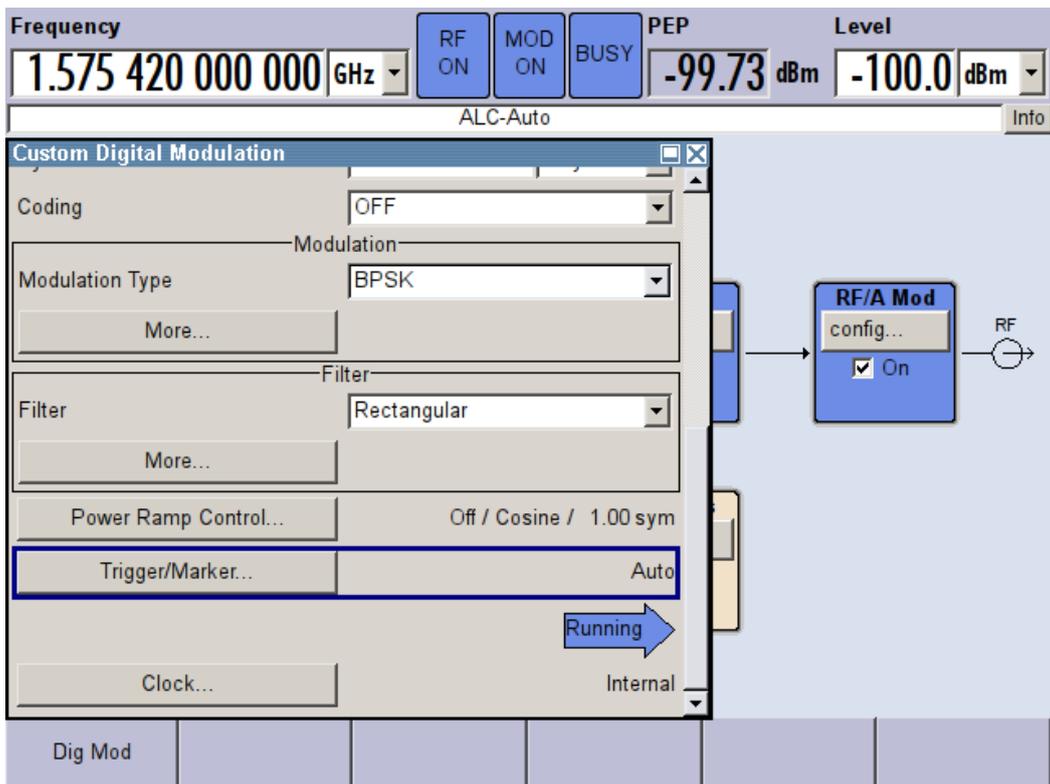


Рис.1.18 Интерфейс встроенного ПО генератора (меню *Trigger/Marker*)

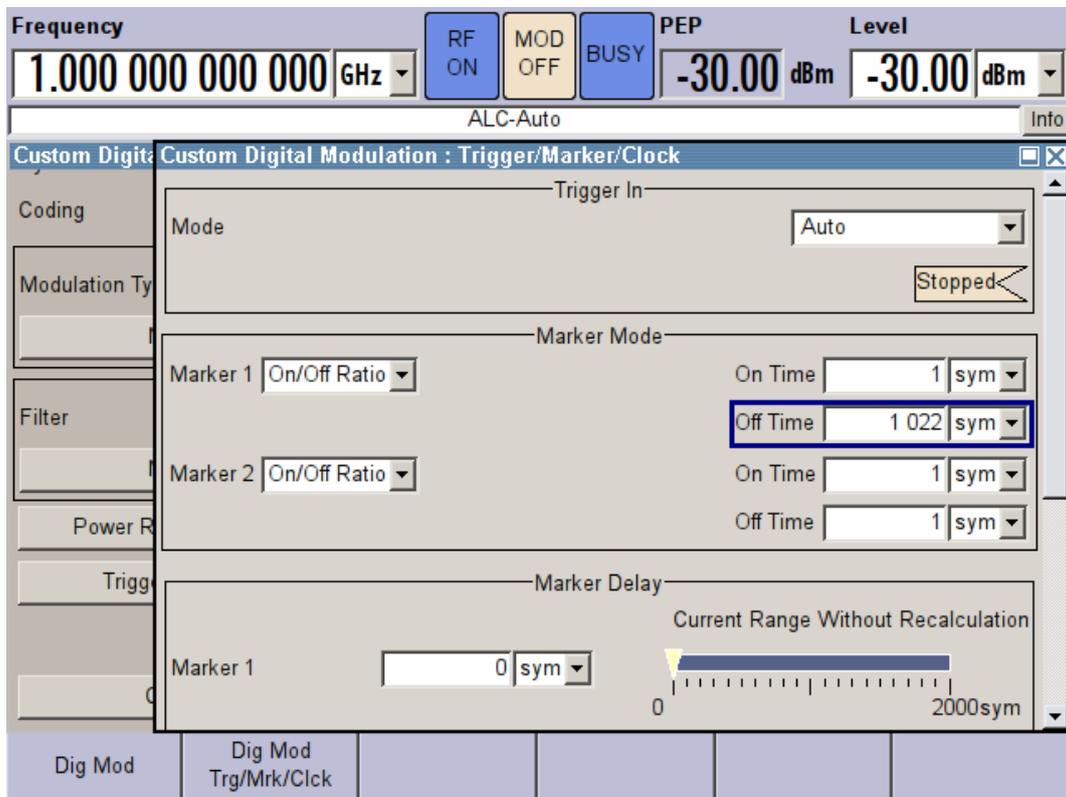


Рис.1.19. Интерфейс встроенного ПО генератора (меню *Trigger/Marker*)

Поля On Time и Off Time (рис.1.19) позволяют установить длительность (в символах последовательности) положения маркера в высоком и низком уровне напряжения соответственно. Если для дальнего кода GPS C/A установить On Time в значение 1, а Off Time в 1022, то в течение первого символа кода уровень будет высоким, после чего на 1022 символа сменится на низкий. По прошествии этих 1022 символов уровень вновь поднимется, что совпадет с новым периодом последовательности, т.к. её длина составляет 1023 символа. Таким образом, положительный перепад будет совпадать с началом последовательности.

1.2.6. Осциллограммы сформированных сигналов

Лаборатория кафедры РТС оснащена 4-х канальными осциллографами серии RTM с полосой анализа 500 МГц. Частота модулирующей последовательности порядка единиц МГц, поэтому данные приборы позволяют получить точные осциллограммы метки начала последовательности и модулирующего низкочастотного сигнала $I(t)$. Сформированный радиосигнал имеет несущую частоту порядка полутора ГГц, что выходит за рамки полосы анализа. Тем не менее, удастся получить искаженную осциллограмму радиосигнала – с заметными переходными процессами при смене модулирующих символов. Векторный генератор сигналов и осциллограф следует соединить посредством коаксиальных кабелей.

Положительный фронт импульса будет приходиться на середину интервала первого символа последовательности при использовании генераторов серии SMJ и на начало символа – при использовании генераторов серии SMBV (рис.1.20).

1.2.7. Обработка сформированного сигнала навигационным приемником: спектр сформированного сигнала

При приеме сигнала спутника мощность навигационного сигнала мала, его спектральная плотность мощности меньше спектральной плотности мощности шумов спектроанализатора. Поэтому непосредственное наблюдение сигнала номинальной мощности невозможно. Но в лабораторных условиях мы имеем возможность увеличить мощность сигнала. Последовательно увеличивая мощность можно добиться четкого графика спектральной плотности мощности сформированного сигнала (рис.1.21).

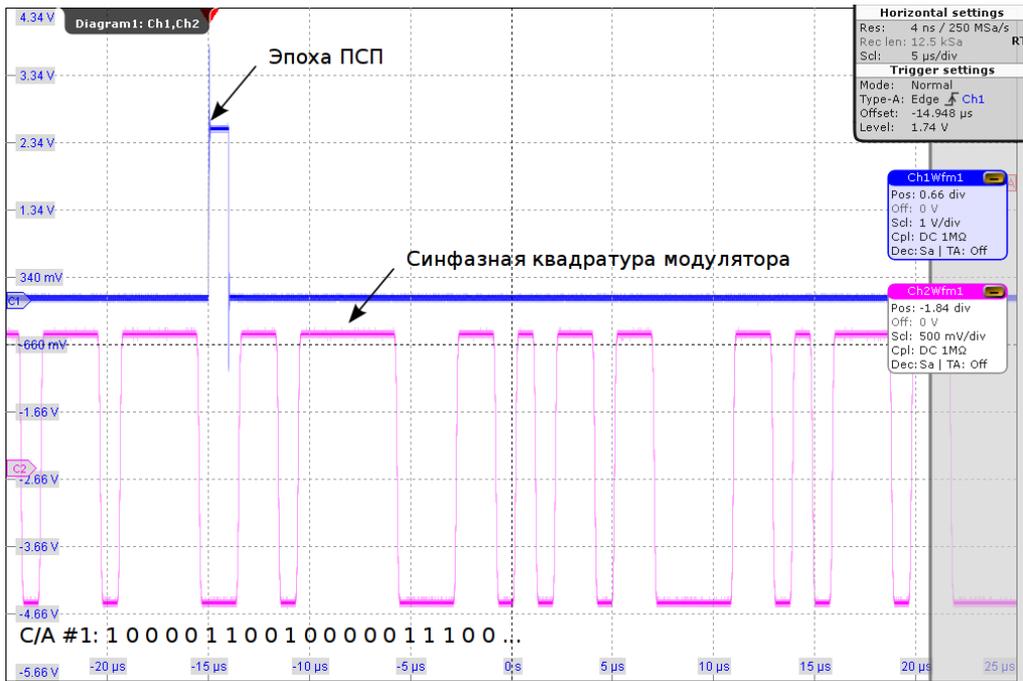


Рис.1.20. Осциллограммы синфазной модулирующей функции $I(t)$ и метки начала эпохи модулирующей последовательности при формировании сигнала GPS C/A L1 #1

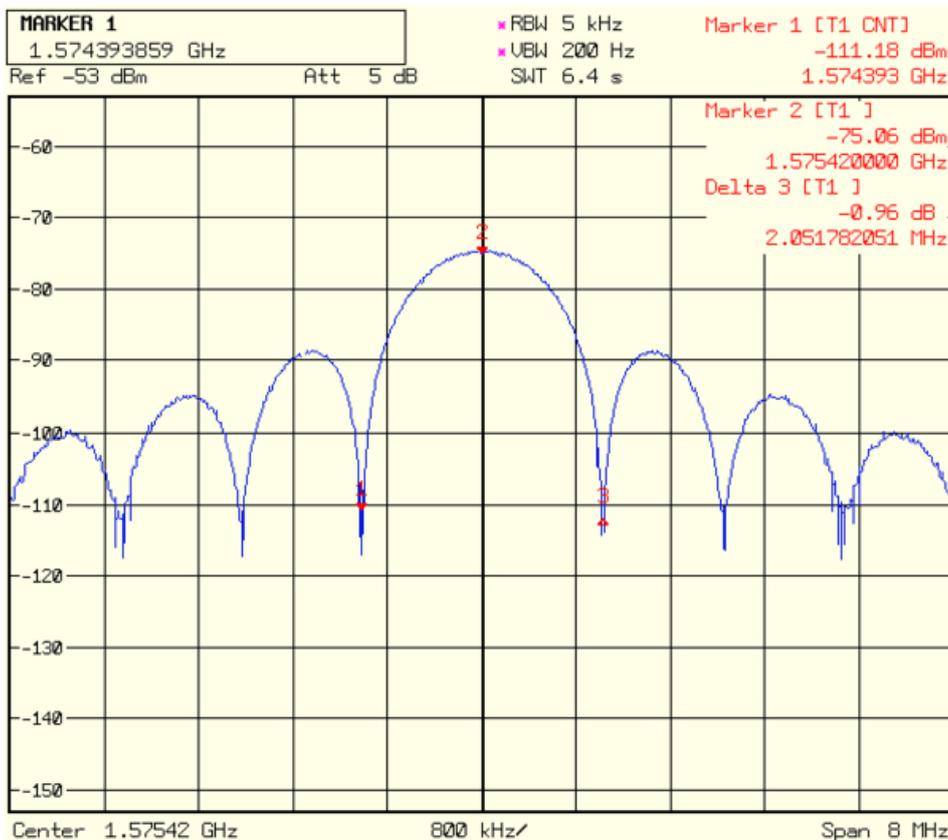


Рис.1.21. Спектральная плотность мощности сформированного BPSK-сигнала

1.3. Домашняя подготовка

1. Ознакомиться с методикой формирования сигналов с помощью векторного генератора.

2. Для заданного преподавателем сигнала подготовить текстовый файл, содержащий модулирующую последовательность (дальномерный код) θ_k (в виде строки символов 0 и 1, разделенных пробелами; не учитывать модуляцию навигационным сообщением и т.п.). В отчете привести первые 10 и последние 10 символов последовательности. Варианты сигналов:

- NAVSTAR GPS L1 C/A;
- NAVSTAR GPS L2 C/A;
- NAVSTAR GPS L5 C;
- ГЛОНАСС L1 CT (L1OF);
- ГЛОНАСС L2 CT (L2OF);
- ГЛОНАСС L3 CT (L3OC);
- ВОС(1, 1);
- ВОС(5, 2.5) [4].

3. Рассчитать и построить графики дискретного преобразования Фурье последовательности θ_k .

4. Рассчитать и построить графики автокорреляционной функции последовательности $G_k = 2(\theta_k - 0.5)$.

1.4. Лабораторное задание

Для сигнала из домашней подготовки выполнить с составлением отчета:

1. Сформировать сигнал и метку начала модулирующей последовательности.

2. При наличии приемника соответствующего сигнала проверить успешность исполнения алгоритмов поиска и слежения.

3. Получить осциллограммы сформированного сигнала, модулирующей функции и метки начала модулирующей последовательности.

4. Измерить спектральную плотность мощности сформированного сигнала, полосу по первым нулям спектра.

1.5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- введение с обозначением объекта, предмета и цели исследования;
- результаты домашней подготовки;

- результаты лабораторного исследования;
- выводы о полученных результатах.

1.6. Контрольные вопросы

1. Возможно ли формирование сигнала ГЛОНАСС L2 СТ на несущей частоте с помощью векторного генератора R&S SMBV100A (без учета навигационного сообщения)?
2. Каков период и скорость следования чипов дальномерного кода сигналов современных СРНС? Запишите математические модели этих сигналов.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МШУ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СРНС И УСЛОВИЙ ЕГО РАБОТЫ»

Цель работы: развить представления о характеристиках малошумящего усилителя (МШУ) аппаратуры потребителей (АП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС), проверить его теоретические модели на эксперименте; развить представления об используемых в СРНС сигналах, их характеристиках; развить навыки использования радиотехнических измерительных приборов.

2.1. Состав стенда

В состав стенда лабораторной работы №2 входит следующее оборудование:

- векторный генератор сигналов R&S SMBV100A или его аналог (возможно использование аналогового генератора и имитатора сигнала);
- анализатор спектра и сигналов R&S FSV3 или его аналог;
- исследуемый МШУ;
- пассивная антенна;
- соединительные кабели;
- источник питания для МШУ и тестового приемника;
- тестовый приемник;
- персональный компьютер с интерфейсной программой тестового приемника.

2.2. Описание

Под навигационным приемником (НАП, навигационной аппаратурой потребителей) понимают совокупность радиотехнических артефактов, предназначенных для определения местоположения, скорости, времени и/или пространственной ориентации их носителя с помощью сигналов спутниковой радионавигационной системы [1, 5].

Для выполнения своей целевой функции любой навигационный приемник должен выполнить ряд задач:

1. Преобразование электромагнитного поля окружающего пространства в электрические токи радиочастотного диапазона;
2. Перенос навигационных сигналов, принятых антенной, из радиочастотного диапазона ($L1$, $L2$) на промежуточную частоту, усиление и частотная селекция;
3. Дискретизация и квантование сигнала промежуточной частоты;
4. Оценка информативных параметров радиосигналов, для чего в современных приемниках производится поиск сигналов, передача на слежение и слежение за навигационными сигналами.
5. Прием цифрового сообщения, передаваемого в радиосигналах;
6. Расчет положения, ориентации, скорости и времени потребителя по накопленной информации, измеренным параметрам радиосигнала, принятому сообщению и информации от дополнительных источников;
7. Взаимодействие с потребителем с помощью того или иного интерфейса: прием команд и выдача координатно-временного обеспечения.

Первая задача решается устройством, называемым антенной. В подавляющем большинстве навигационных приемников в качестве антенного элемента выступают микрополосковые керамические патч-элементы различных размеров (рис.2.1).

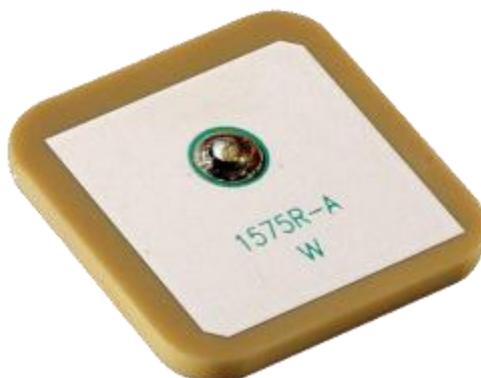


Рис.2.1. Антенный патч-элемент, предназначенный для приема сигналов в частотном диапазоне $L1$

В данной работе патч-элемент с согласованной 50-Омной линией используется для приема эфирных сигналов.

Следующим за антенной функциональным блоком навигационного приемника выступает малошумящий усилитель (МШУ, рис.2.2). Как следует из названия, МШУ представляет собой активный усилитель заданного диапазона частот с низким коэффициентом шума. МШУ участвует в аналоговой обработке сигнала, конечные цели которой - при минимальном ухудшении отношения сигнал/шум:

- понизить несущую частоту сигнала до промежуточной, на которой производится цифровая обработка сигнала;
- увеличить амплитуду смеси сигналов и шума до рабочих уровней АЦП, поддерживать значение;
- произвести частотную селекцию (максимальное подавление вне полосы сигналов).

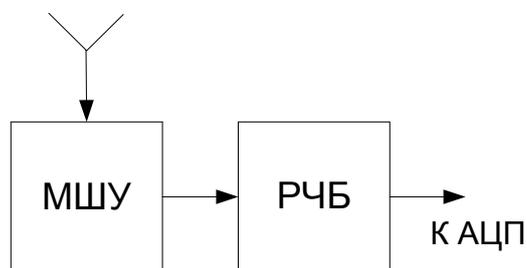


Рис.2.2. Составная часть навигационного приемника от антенны до входа АЦП

К характеристикам МШУ предъявляются особые требования, т.к. он является первым каскадом цепочки усилителей. Как известно из курса РПУ, это означает, что он во многом определяет общий коэффициент шума радиочастотной части приемника. Для минимизации общего коэффициента шума следует максимизировать коэффициент усиления МШУ и минимизировать его собственный коэффициент шума. Характерное значение коэффициента усиления МШУ НАП составляет 24-30 дБ, коэффициент шума – 1-2 дБ.

При необходимости разнести в пространстве антенный элемент и навигационный модуль, МШУ выносят вместе с антенным элементом (и объединяют в одном корпусе, рис.2.3). В противном случае, наличие затуханий в радиокабеле приводит к катастрофическому возрастанию коэффициента шума радиочастотной части приемника.

В теоретическом курсе изложен ряд теоретических моделей, описывающих МШУ и радионавигационные сигналы. Работа предполагает проверку теоретических построений на соответствие поведению изучаемых объектов.



Рис.2.3. Внешний антенный модуль НАП со встроенным МШУ

2.3. Домашняя подготовка

1. Запишите математическую модель радионавигационного сигнала на выходе антенны. Укажите характерные значения параметров модели.
2. Запишите математическую модель, связывающую сигнал на входе и выходе МШУ НАП. Укажите характерные значения параметров модели.
3. Разработайте и опишите методику измерения коэффициента усиления МШУ и его АЧХ с помощью приборов, входящих в состав стенда.
4. Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

2.4. Лабораторное задание

В рамках лабораторной работы требуется выполнить следующие пункты:

1. оценить мощность навигационных сигналов;
2. исследовать характеристики МШУ.

2.4.1. Оценка мощности навигационных сигналов

Для оценки мощности навигационных сигналов необходимо выполнить следующие задания:

1. Собрать экспериментальную установку, изображенную на рис.2.4. Длина кабеля, соединяющего выход пассивной антенны и вход МШУ, должна быть минимальной. В поле видимости антенны должно находиться не менее 1/6 небосвода.

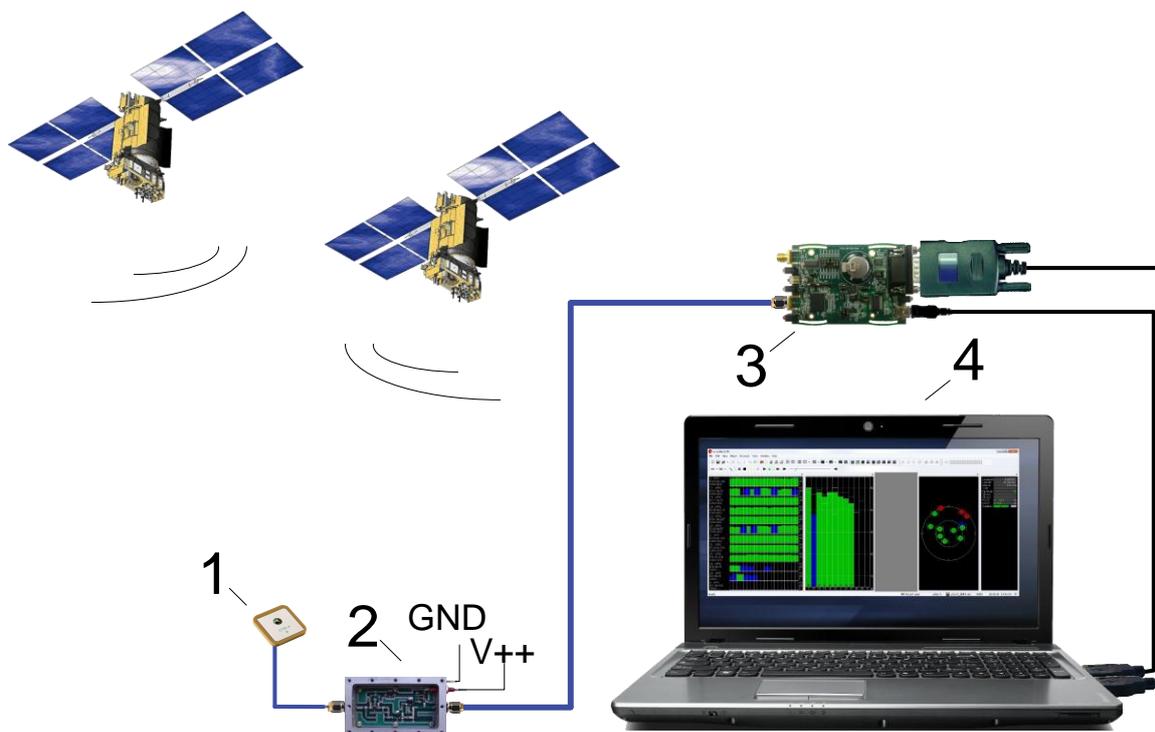


Рис.2.4. Схема экспериментальной установки для измерения мощности эфирного сигнала, первое состояние (1 - пассивная антенна, 2 - МШУ, 3 - модуль навигационного приемника, 4 - персональный компьютер)

2. Включить навигационный модуль, подать питание на МШУ.
3. Включить интерфейсное ПО используемого навигационного модуля. Установить связь с приемником.
4. Ожидать в течение нескольких минут захвата сигнала всех видимых спутников. В интерфейсном ПО открыть отображение оценок отношений сигнал/шум в каналах обработки. Перенести значения в отчет.
5. Собрать экспериментальную установку, изображенную на рис.2.5, подключив вместо пассивной антенны ко входу МШУ векторный генератор сигналов (или другой имитатор сигналов при наличии).

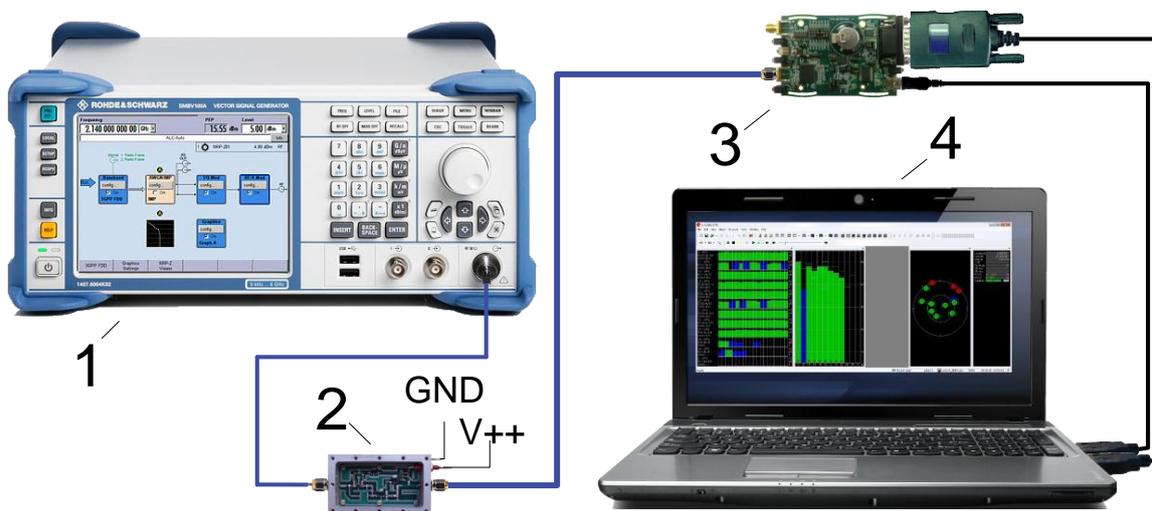


Рис.2.5. Схема экспериментальной установки для измерения мощности эфирного сигнала, второе состояние (1 - векторный генератор (имитатор) сигналов, 2 - МШУ, 3 - модуль навигационного приемника, 4 - персональный компьютер)

6. Включить генератор. Запустить имитацию сигнала одного спутника той системы, сигналы которой наблюдались в п. 4. Если наблюдались сигналы нескольких систем, повторить пункты 6-10 для всех систем.

7. Перезапустить навигационный модуль с полным стиранием накопленной информации.

8. Дождаться, когда навигационный модуль обнаружит имитируемый сигнал и передаст его на слежение.

9. Регулируя мощность имитируемого сигнала, добиться совпадения измерений отношения сигнал/шум, производимых навигационным модулем с наибольшим из измерений, полученных в п. 4 для данной системы. Занести мощность имитируемого сигнала, измеренную по шкале генератора, в отчет.

10. Уменьшая мощность имитируемого сигнала, добиться совпадения измерений отношения сигнал/шум, производимых навигационным модулем с наименьшим из измерений, полученных в п. 4 для данной системы. Занести мощность имитируемого сигнала, измеренную по шкале генератора, в отчет. В предположении о монотонности функции измерителя отношения сигнал/шум от мощности сигнала, можно считать полученные значения измерениями мощности сигналов соответствующих спутников на выходе антенны.

2.4.2. Исследование характеристик МШУ

Для исследования характеристик МШУ необходимо выполнить следующие пункты:

1. Собрать экспериментальную установку, изображенную на рис.2.6.

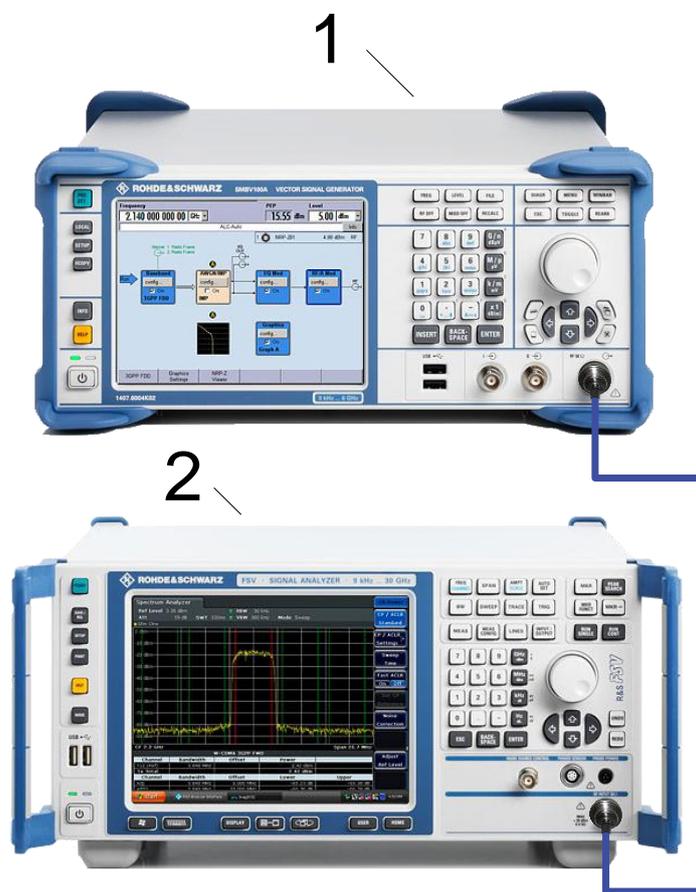


Рис.2.6. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик МШУ НАП, первое состояние (1 - генератор тестового имитационного сигнала, 2 - анализатор спектра)

2. На генераторе сигнала запустить имитацию сигнала одного навигационного спутника. Установить выходную мощность около -40 дБм.

3. Включить анализатор спектра, установить параметры анализа (центральную частоту, полосу), соответствующие сигналу. Отрегулировать RBW и VBW, занести спектральную плотность мощности сигнала в отчет.

4. Перевести анализатор спектра в режим измерения мощности. Померить мощность сигнала по первым нулям, занести результат измерений и изображение с экрана анализатора спектра в отчет.

5. Изменить экспериментальную установку в соответствии со схемой, изображенной на рис.2.7, включив между генератором и анализатором спектра МШУ. При включении в схему МШУ выход генератора подключать ко входу МШУ, выход МШУ подключать ко входу анализатора спектра.

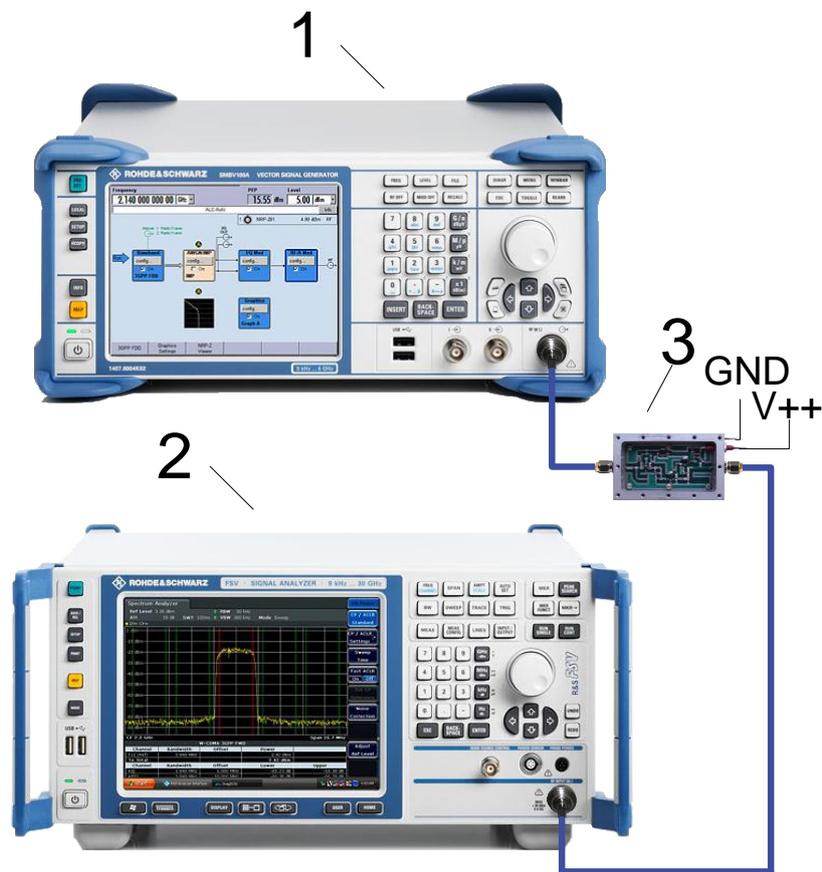


Рис.2.7. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик МШУ НАП, второе состояние (1 - генератор тестового имитационного сигнала, 2 - анализатор спектра, 3 - МШУ)

6. С помощью анализатора спектра измерить мощность сигнала на выходе МШУ. Занести результат в отчет. На основании полученных данных и измерений, проведенных в п. 4, рассчитать коэффициент усиления МШУ. Сравнить экспериментально полученный коэффициент усиления с ожидаемым при подготовке к работе.

7. Варьируя частоту имитируемого сигнала, определить примерную полосу пропускания (усиления) МШУ. Занести результат в отчет.

Сравнить экспериментально полученный результат с ожиданиями при подготовке к работе.

8. Дискретно перестраивая частоту сигнала в пределах полутора полос пропускания измерить АЧХ МШУ. Промежуточные результаты фиксировать в таблице в отчете. После проведения измерений построить график АЧХ.

9. Для векторного генератора сигнала установить режим генерации набора колебаний (*Multicarrier CW Signal Generation* для генераторов Rohde&Schwarz), настроить их несущие частоты на рабочие частоты МШУ.

10. Выключить режим измерения мощности анализатора спектра. Наблюдать АЧХ, перенести в отчет.

Результаты проведенного исследования, комментарии и выводы оформляются в виде индивидуального отчета.

2.5. Контрольные вопросы

1. Что такое МШУ НАП? Какие функции возлагаются на этот элемент?
2. Каковы основные характеристики МШУ?
3. Как определяется коэффициент шума НАП в целом?
4. Какую полосу имеет навигационный сигнал GPS L1 C/A?
5. Какую полосу занимает диапазон навигационных сигналов ГЛОНАСС L1?
6. Какова мощность сигнала ГЛОНАСС L1 ПТ на входе приёмника в соответствии с интерфейсным контрольным документом?
7. Какова центральная частота навигационных сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением в диапазоне L1?
8. Как оценить мощность сигнала на выходе МШУ НАП?
9. Как измеряется коэффициент шума МШУ?
10. Как соотносится мощность шума и мощность сигнала на выходе МШУ?
11. Что такое коэффициент шума?
12. В чём состоит физический смысл понятия «коэффициент шума»?
13. Чему равен типовой коэффициент шума в НАП СРНС?
14. Какой тип антенны наиболее часто применяется с НАП СРНС?
15. Какую Вы можете предложить методику измерения полосы МШУ?
16. Как рассчитывается мощность сигнала на выходе антенны?
17. Какой типовой коэффициент усиления МШУ?

18. Какова характерная мощность полезного сигнала одного спутника на входе и выходе МШУ НАП и коэффициент усиления МШУ НАП? Какую Вы можете предложить методику измерения коэффициента усиления МШУ НАП?

19. Какова характерная мощность выходного сигнала МШУ НАП? Как соотносятся мощность полезных сигналов навигационных спутников и мощность собственного шума МШУ НАП? Каков совместный коэффициент усиления МШУ и радиочастотного блока НАП (от выхода пассивной антенны до входа АЦП)?

20. Какую Вы можете предложить методику измерения коэффициента шума МШУ НАП?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАВИГАЦИОННЫХ МОДУЛЕЙ»

Цель работы: ознакомиться с современными образцами навигационной аппаратуры потребителей, их интерфейсными программами; развить представления об основных характеристиках навигационной аппаратуры в общем, отечественного и зарубежного производства в частности; освоить методику оценивания чувствительности навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем; развить навыки использования радиотехнических измерительных приборов.

3.1 Общая информация

В лабораторной работе №3 объектом проведения экспериментальных исследований является модуль навигационного приемника (далее по тексту — модуль НП, навигационный модуль), работающий в составе навигационной аппаратуры потребителей (НАП) (рис.3.1) [1, 5].

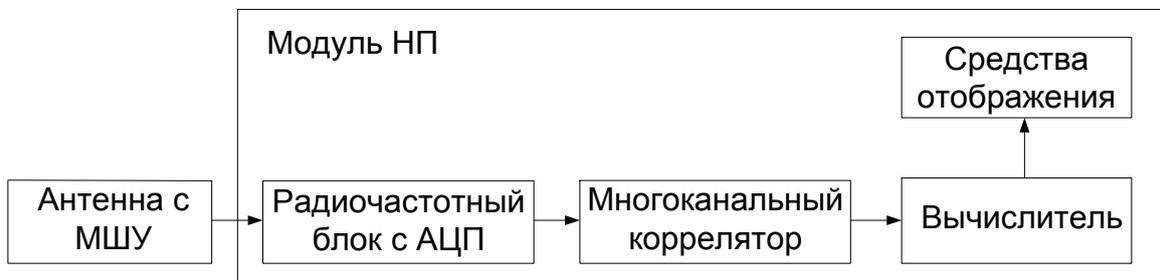


Рис.3.1. Структурная схема НАП

3.1.1. Основные понятия

Под *чувствительностью* модуля НП понимается его способность работать в условиях приема слабых сигналов. В качестве характеристики чувствительности принимается граничное наименьшее значение мощности $P_{s,min}$ полезного сигнала (одного типа и одного спутника) на выходе пассивной антенны, при котором модуль НП еще может решать целевую задачу с заданными характеристиками.

Под заданными характеристиками решения целевой задачи понимается выдача навигационного 3D-решения без перерывов, превышающих 10-секундный интервал.

Чувствительность навигационного модуля – одна из его важнейших характеристик. Обеспечение номинальной мощности сигнала гарантируется навигационной системой в случае прямой видимости спутника на открытой местности. В городских условиях, под листвой деревьев, внутри транспортных средств и помещений сигнал может быть значительно ослаблен. В таких условиях от приемника требуется максимальная чувствительность.

Размерность количественной характеристики чувствительности, как следует из определения, совпадает с размерностью мощности. На практике применяют логарифмическую шкалу, выражая чувствительность в [дБВт] или [дБм] с помощью нелинейного преобразования (логарифма по основанию 10) отношения описываемой мощности к 1Вт или 1мВт соответственно:

$$P_{[dBW]} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{[W]}}{1_{[W]}} \right),$$
$$P_{[dBm]} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{[W]}}{0.001_{[W]}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{[mW]}}{1_{[mW]}} \right) = P_{[dBW]} + 30.$$

Различают *чувствительность слежения* и *чувствительность поиска*. Отличие заключается в состоянии приемника на момент ослабления сигнала с номинального уровня.

Если к моменту ослабления сигнала навигационный модуль успел произвести поиск и захват сигналов всех видимых спутников, выделил навигационную информацию и производит выдачу навигационного решения – приемник находится в режиме слежения. В таких условиях его чувствительность максимальна. Уровень чувствительности современных навигационных модулей в режиме слежения – около -160 дБм (или -190 дБВт).

Если к моменту включения приемника сигнал уже был ослаблен, говорят о чувствительности поиска.

Задача поиска слабого сигнала требует значительных вычислительных ресурсов, время поиска существенно возрастает и может превысить требуемое. В методике в качестве максимального времени до выдачи навигационного 3D-решения выбрано значение в 300 секунд. Превышение ожидания неприемлемо для большинства потребителей.

Помимо поиска сигналов, в режиме "холодного" старта приемнику необходимо выделить навигационную информацию. Низкая мощность входного сигнала приводит к низкому отношению сигнал/шум и возрастанию ошибок выделения передаваемых бит сообщения. Не выделив эфемеридную информацию, приемник не может решить навигационную задачу – она требует сведения о положении спутников. В современных навигационных модулях развитие блоков быстрого поиска привело к ситуации, в которой невозможность выделения навигационной информации стала главным ограничением чувствительности поиска. Чувствительность поиска в режиме "холодного" старта современных навигационных модулей около -145 дБм.

Помимо режимов "холодного" старта, при котором приемник не содержит информации о состоянии спутникового созвездия, производители выделяют режим "теплого" и "горячего" старта. Отличаются они наличием той или иной вспомогательной информации, накопленной приемником - времени, эфемерид, альманахов и т.д.

Основными путями повышения чувствительности НАП являются:

- оптимизация алгоритмов обработки сигналов в НАП;
- прием и обработка перспективных двухкомпонентных (пилот и данных) сигналов ГНСС;
- использование высококачественных комплектующих и элементной базы;
- получение дополнительной информации извне навигационной системы, например, по каналам сотовой связи (A-GPS).

3.1.2. Схемы экспериментальных установок

На рис.3.2 представлена схема экспериментальной установки, предназначенной для измерения коэффициента затухания сборного аттенюатора (табл.3.1). На рис.3.3 приведена основная схема проведения экспериментов по измерению чувствительности навигационных модулей (табл.3.1).

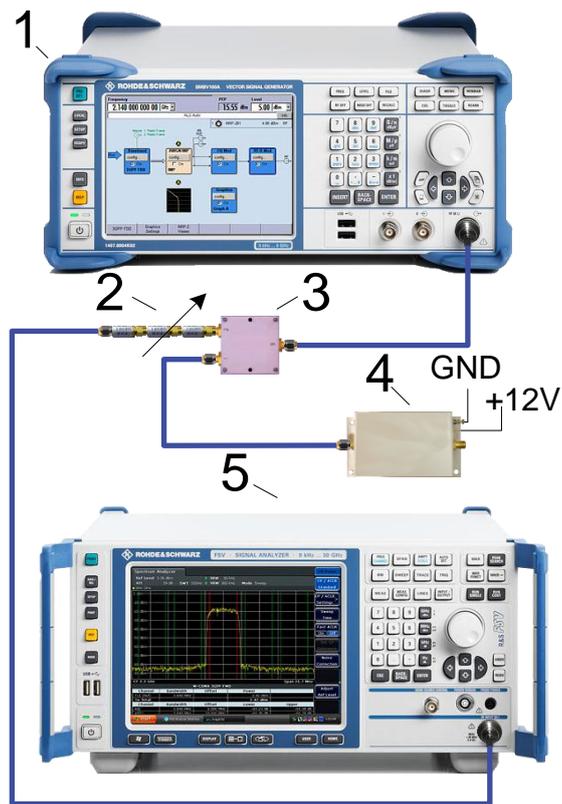


Рис.3.2. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик аттенюатора

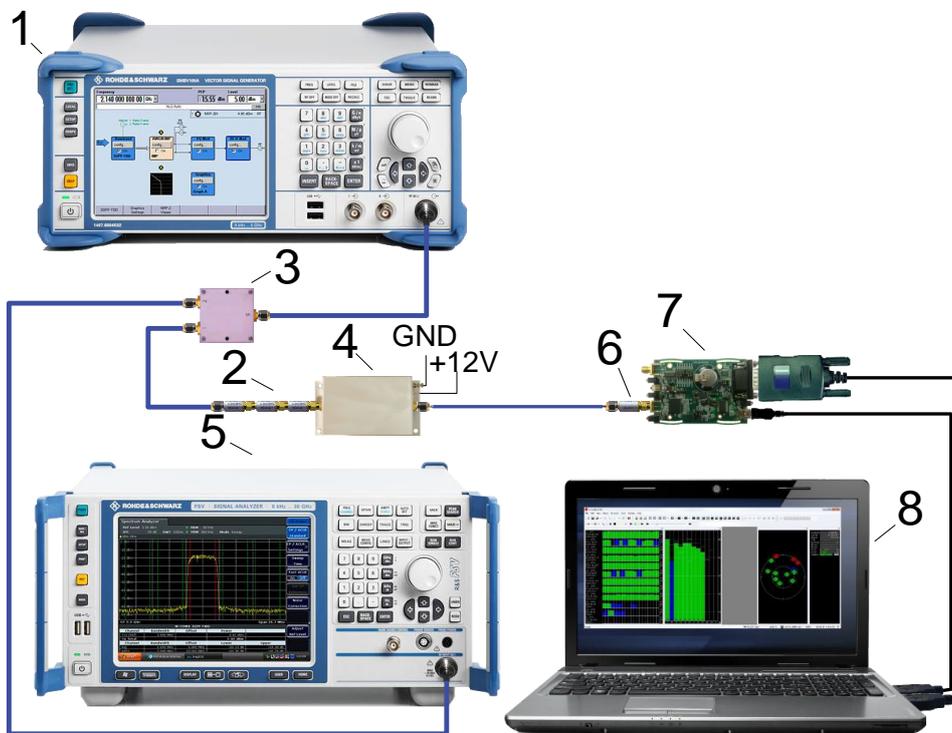


Рис.3.3. Схема экспериментальной установки для измерения чувствительности навигационных модулей

Используемое в работе оборудование

Номер на схемах	Прибор	Пример	Функция	Кол-во
1	Генератор навигационного сигнала	R&S SMBV, R&S SMU	Имитация навигационных сигналов	1
4	Аттенюаторы 30 дБ L-диапазона	MiniCircuits VAT-30+	Ослабление сигнала до уровня, соответствующему выходной мощности приемной антенны навигационной аппаратуры потребителей	3
3	ВЧ-разветвитель L-диапазона	MiniCircuits ZAPD-2DC-S+	Разветвление суммарного сигнала к анализатору спектра и навигационному модулю	1
4	Малозумящий усилитель (МШУ)	MiniCircuits ZRL-2400LN+	Имитация МШУ навигационной аппаратуры потребителей	1
5	Анализатор спектра	R&S FSV, R&S FSU	Измерение мощности навигационного и калибровочного сигналов	1
6	DC-Block (отсечка постоянного тока)	MiniCircuits BLK-89-S+	Предотвращение подачи постоянного напряжения от навигационного модуля к аттенюаторам	1
7	Модуль навигационного приемника		Объект исследования	1
8	Персональный компьютер с интерфейсными кабелями		Выполнение интерфейсной программы, обмен данными с навигационными модулями, питание навигационных модулей.	1
-	Соединительные кабели L-диапазона		Соединение генератора и разветвителя, соединение аттенюатора и МШУ, соединение МШУ и навигационного модуля, соединение разветвителя и спектроанализатора.	4
-	Источник питания	GW Instek GPS-4303	Питание МШУ, навигационных модулей	1

3.2. Домашнее задание

1. Письменно подготовить ответы на контрольные вопросы.

2. Подготовить заготовку будущего отчета, включая бланки протоколов. В качестве используемых навигационных сигналов предполагать GPS L1 C/A. Исследуемые приемники будут выбраны в лаборатории в зависимости от бригады.

3.3. Лабораторное задание

Для проведения экспериментального исследования чувствительности модуля НП выполните подготовительный этап 1, а затем выполните пункты методики, соответствующие плану экспериментальных исследований. Результаты фиксируйте в протоколе (Приложение 1).

3.3.1. Определение коэффициента передачи сборного аттенюатора

Коэффициент ослабления сборного аттенюатора может отличаться от суммы номиналов. На первом этапе проведем измерение этого коэффициента, заодно освоив управление генератором сигнала и анализатором спектра.

1. Собрать экспериментальную установку для измерения характеристик аттенюатора согласно рис.3.2, включив в схему аттенюатор как показано на рисунке. В качестве аттенюатора использовать сборный с номинальным коэффициентом ослабления 85-95 дБ.

2. Включить генератор сигнала (далее ГС). Выключить модуляцию (*Mod off*). Установить выходную мощность, по шкале генератора, на значение 0 дБм. Установить частоту, равную центральной частоте рабочего диапазона (для GPS L1 1575,42 МГц).

3. Включить анализатор спектра (далее АС). Перевести АС в режим измерения мощности в полосе равной полосе используемого навигационного сигнала. Дальнейшие измерения мощности с помощью АС проводить в этом режиме, устанавливая в качестве центральной частоты анализа центральную частоту навигационного сигнала.

Несущая частота сигналов GPS частотного диапазона L1 составляет 1575.42 МГц, полоса гражданских сигналов с C/A кодом по первым нулям - 2.046 МГц. Для настройки АС необходимо указать центральную частоту анализа (*Central frequency*), полосу анализа (*Span*), шаг анализа (*RBW*) и полосу сглаживающего фильтра (*VBW*).

4. С помощью ГС и АС определить коэффициент ослабления аттенюатора K_{att} , дБ:

4.1. Включить радиочастотный выход генератора (*RF on*), подав тем самым гармоническое колебание с выбранной частотой и амплитудой на его выход.

4.2. С помощью АС измерить мощность гармонического колебания после прохождения аттенюатора. Записать измеренное значение P_{with} в протокол.

4.3. Исключить из схемы аттенюатор - соединить кабелем разветвитель и АС.

4.4. Измерить мощность $P_{without}$ гармонического сигнала с помощью АС, занести значение в протокол.

4.5. Найти $K_{att} = P_{without} - P_{with}$. Занести значение K_{att} (положительное число) в протокол.

Помимо погрешности коэффициента затухания в аттенюаторе, на точность проводимых измерений влияет асимметрия разветвителя (~0.05 дБ) и разность потерь в кабелях от разветвителя до АС и аттенюаторов (до 2 дБ). Для упрощения методики измерение этих параметров пропустим.

3.3.2. Определение чувствительности навигационного модуля

1. Записать в протокол название исследуемого навигационного модуля, тип используемых навигационных сигналов. При необходимости выполнить пункт подготовки 1, занести полученные значения K_{att} в протокол.

2. Собрать экспериментальную установку согласно рис.3.3.

3. Включить ПК и запустить программное обеспечение (ПО) для отображения, сохранения и установки параметров модуля НП.

4. На ГС запустить требуемый сценарий имитации. Убедиться, что мощности всех имитируемых сигналов равны, а их число равно 4. Записать количество и тип имитируемых сигналов в протокол.

5. Включить радиочастотный выход ГС (*RF on*) и модуляцию (*Mod on*). Изменением выходной мощности генератора добиться мощности сигнала ГС для каждого спутника на входе АС равным $P_{SA} = -125 + K_{att} \pm 2$ дБм по измерениям АС (SA – spectrum analyser). С учетом аттенюатора данный уровень соответствует нормальному уровню сигнала на входе МШУ. Учсть при этом, что при использовании сигналов с кодовым разделением АС производит измерение сразу 4 имитируемых сигналов. Соответственно, чтобы получить измеренное значение мощности одного сигнала, необходимо из измеренной мощности 4 сигналов отнять 6 дБ (что примерно соответствует умножению на 1/4 в линейной шкале).

6. Включить модуль НП.

7. Установить связь интерфейсного ПО с модулем НП. Задать параметры работы в соответствии с планом проведения экспериментальных исследований:

- система (GPS);
- частотный диапазон (L1);
- тип сигналов (C/A).

8. Через 2 минуты убедиться, что модуль НП функционирует нормально: в течение 2 минут выдает навигационное 3D-решение без прерывов, превышающих 10 сек. Если условие не выполняется, проверить правильность выполнения пунктов 1, 2-7. Если проверка не выявила нарушений пунктов методики, сообщить преподавателю.

9. Выключить модуль НП.

10. На ГС перезапустить требуемый сценарий имитации. Установить уровень сигнала ГС на входе АС для каждого спутника равным $P_{SA} = P_{search,start} + K_{att} \pm 1$ дБм по измерениям АС (не забыть о вычитании 6 дБ при имитации 4 сигналов с кодовым разделением). В качестве значения $P_{search,start}$ для современных модулей (u-blox NEO-6Q, NAVIS NV08C) взять -144 дБм, для приемников предыдущих поколений (CH-4706) выбрать -133 дБм.

11. Включить модуль НП. Установить связь ЭВМ с модулем НП и задать параметры работы как в п. 7. При необходимости дать команду перезапуска в режиме холодного старта. При выбранной мощности навигационных сигналов навигационный модуль не должен осуществлять их захват.

12. Увеличить мощность навигационного сигнала на 1 дБ, выждать 300 секунд, проконтролировать наличие/отсутствие навигационного 3D-решения на выходе НП.

13. Если за 300 секунд навигационный модуль не начал выдавать навигационное 3D-решение, повторить п.п. 12-13.

14. Если за 300 секунд модуль начал выдавать навигационное 3D-решение, зафиксировать в протоколе граничное значение мощности одного навигационного сигнала на входе АС $P_{search,SA,i}$ по измерениям АС, не забывая учесть число спутников. Здесь i - номер повторения эксперимента.

15. Рассчитать и занести в протокол мощность одного сигнала на входе МШУ $P_{search,i} = P_{search,SA,i} - K_{att}$. Рассчитанное значение соответствует чувствительности поиска навигационного модуля в режиме холодного старта в i -ом эксперименте.

16. С помощью общего регулятора выходной мощности ГС уменьшать мощность навигационного сигнала на 1 дБ раз в минуту до тех пор, пока модуль НП не перестанет выдавать навигационное 3D-решение. Измерить с помощью АС мощность навигационного сигнала одного спутника $P_{track,SA,i}$ на входе АС, занести значение в протокол.

17. Рассчитать и занести в протокол мощность навигационного сигнала на входе МШУ $P_{track,i} = P_{track,SA,i} - K_{att}$. Рассчитанное значение со-

ответствует чувствительности навигационного модуля в режиме слежения в i -ом эксперименте.

18. Повторить проведение эксперимента (п.п. 10-17) необходимое количество раз. В п. 10 в качестве $P_{search,start}$ можно взять $P_{search,start} = P_{search,i-1} - 2$ дБм, где $P_{search,i-1}$ - граничное значение чувствительности поиска, полученное в предыдущем эксперименте по набору статистики.

19. Рассчитать среднее значение чувствительности модуля в режиме холодного старта $P_{search} = \langle P_{search,i} \rangle$. Занести результат в протокол.

20. Рассчитать среднее значение чувствительности модуля в режиме слежения $P_{track} = \langle P_{track,i} \rangle$. Занести результат в протокол.

3.4. Контрольные вопросы

1. Какова мощность навигационного сигнала системы ГЛОНАСС, NAVSTAR GPS на выходе антенны в условиях прямой видимости согласно ИКД? В каких пределах может изменяться мощность навигационного сигнала одного спутника на выходе антенны НАП для каждой из систем?

2. Чему равны значения отношение сигнал/шум в канале обработки навигационного сигнала современного приемника, если мощность сигнала на входе МШУ (выходе пассивной антенны) составляет -160 дБм; -145 дБм?

3. Какова вероятность ошибки при демодуляции одного бита при использовании оптимального алгоритма приема и мощности сигнала -145 дБм, если производится передача данных с помощью BPSK сигнала со скоростью 50 бит/с, а сигнал наблюдается на фоне АБГШ с односторонней спектральной плотностью мощности $N_0 = -200$ дБВт/Гц?

3.5. Приложение 1. Бланк протокола

Протокол экспериментальных исследований чувствительности модуля НП _____

Таблица П.1.1

Тип навигационных сигналов	
Сценарий движения потребителя	

1. Измерение характеристик сборного аттенюатора:

Мощность сигнала на входе АС при использовании аттенюаторов:

$P_{with} =$ дВт

Мощность сигнала на выходе АС без аттенюаторов: $P_{without} =$
 dBm

Коэффициент ослабления аттенюатора: $K_{att} = +$ dB

2. Измерение чувствительности навигационного модуля

Тип навигационных сигналов и их количество:

Результаты измерений чувствительности поиска в режиме холодного старта (табл.П.1.2, П.1.3):

Таблица П.1.2

№ эксперимента, i	Мощность на входе АС $P_{search,SA,i}$ дБм	Мощность на входе МШУ $P_{search,i}$ дБм
1		
2		
3		
4		
5		

Таблица П.1.3

Параметр	Значение
Среднеарифметическое значение чувствительности поиска P_{search} , дБм	

Результаты косвенных измерений чувствительности слежения (табл.П.1.4, П.1.5):

Таблица П.1.4

№ эксперимента, i	Мощность на входе АС $P_{track,SA,i}$ дБм	Мощность на входе МШУ $P_{track,i}$ дБм
1		
2		
3		
4		

Таблица П.1.5

Параметр	Значение
Среднеарифметическое значение чувствительности слежения P_{track} , дБм	

3.6. Приложение 2. Описание навигационного модуля НАВИС СН-4706

Навигационный модуль СН-4706 – одноплатный 24-х канальный навигационный приемник, предназначен для интегрирования в различные системы в качестве навигационного датчика. СН-4706 обеспечивает определения текущих значений координат (широты, долготы, высоты), вектора скорости потребителя, а также текущего времени по сигналам СНС ГЛОНАСС, GPS и SBAS.

Основные заявленные характеристики модуля СН-4706 приведены в табл.П.2.1. Фотография модуля представлена на рис.П.2.1.

Таблица П.2.1

Основные характеристики модуля СН-4706

Характеристика	Значение
Год начала серийного производства	2008
Время выдачи первого навигационного решения: - «холодный старт» (отсутствие альманахов СНС) - «теплый старт» (наличие альманахов СНС, координат и времени) - «горячий старт» (наличие альманахов СНС, координат, эфемерид и времени)	90 с 60 с 15 с
Потребляемая мощность	0.9 Вт
Масса	20 г
Габаритные размеры	35х35х6мм



Рис.П.2.1. Фотография модуля CH-4706

3.7. Приложение 3. Описание интерфейсной программы навигационных модулей u-center

В качестве одного из исследуемых выступает модуль НП u-blox NEO-6Q производства швейцарской компании u-blox Holding AG. Компания предоставляет специальную интерфейсную программу для управления модулем НП, получения и обработки результатов его работы - *u-center*.

Взаимодействие между программой *u-center* и модулем НП организуется посредством USB-интерфейса. Опосредованно от программы распространяется драйвер модуля НП, предназначенный для использования в операционных системах семейства Windows.

Основное окно программы представлено на рис.П.3.1.

Для установки соединения между программой и модулем НП необходимо подключить приемник к компьютеру и в пункте меню *Receiver* выбрать соответствующий порт (рис.П.3.2).

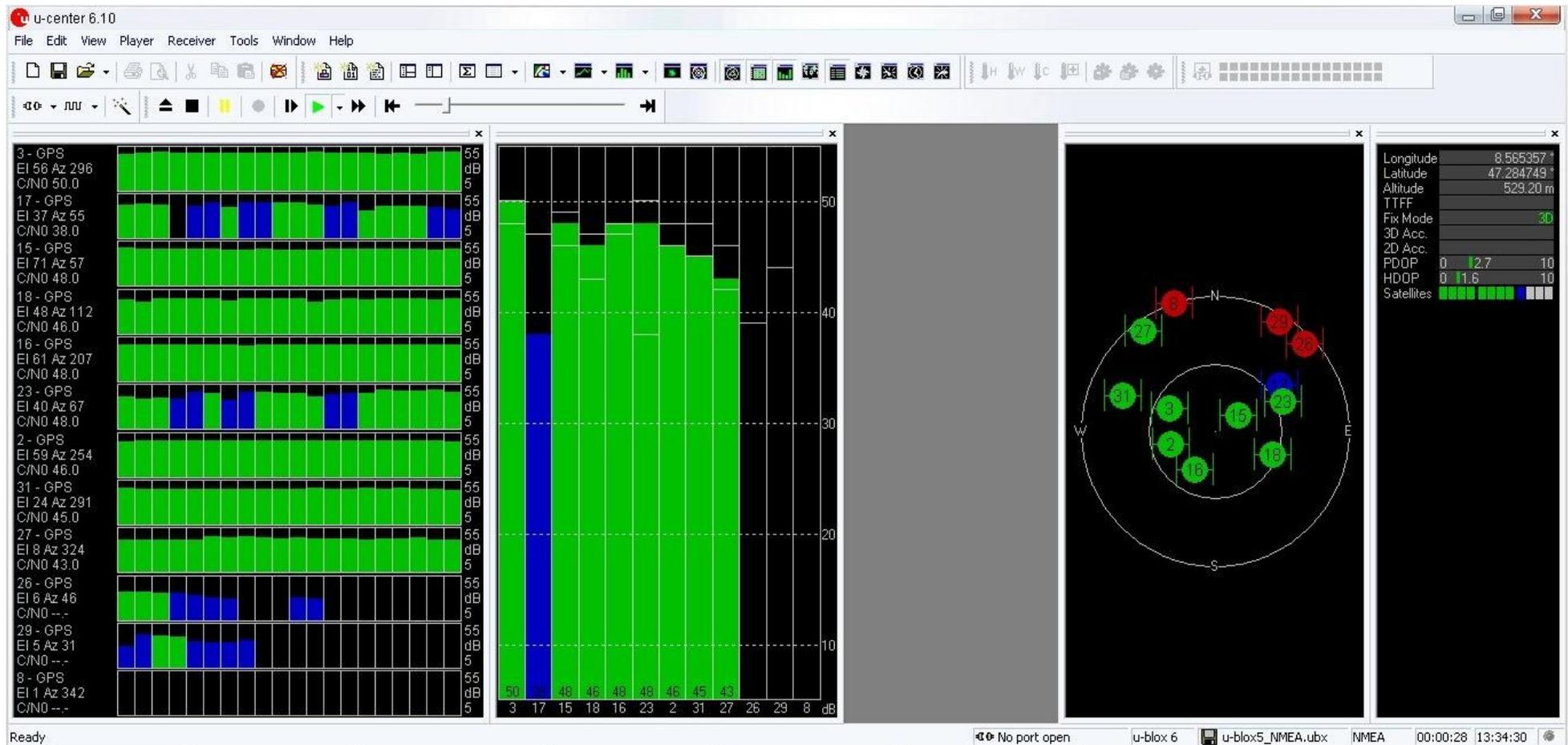


Рис.П.3.1. Основное окно программы u-center 6.10

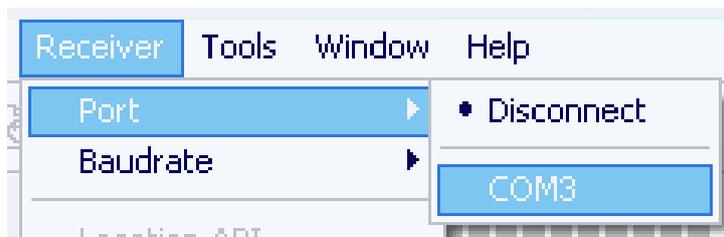


Рис.П.3.2. Выбор порта в программе u-center 6.10

Отображение флага выдачи 3D решения в программе u-center производится в окне *Data View* (рис.П.3.3).



Рис.П.3.3. Окно Data View программы u-center 6.10

Программа позволяет осуществить перезапуск приемника с помощью команды *Coldstart* через соответствующий пункт меню *Receiver* (рис.П.3.4).

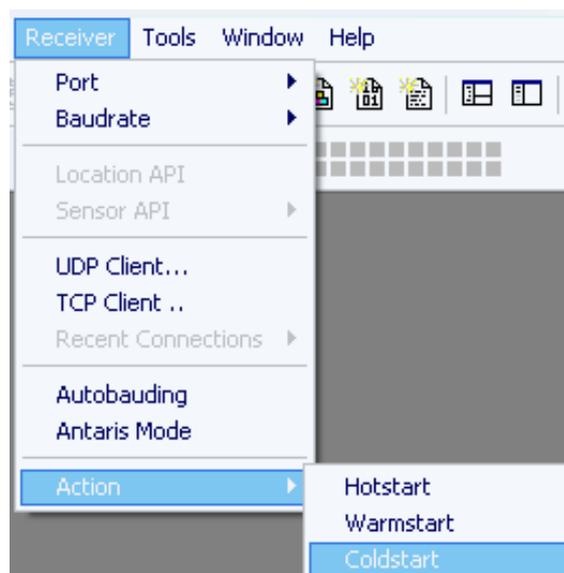


Рис.П.3.4. Передача команды на холодный старт

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ НАВИГАЦИОННЫХ МОДУЛЕЙ»

Цель работы: ознакомиться с современными образцами навигационной аппаратуры потребителя, их интерфейсными программами; освоить методику оценивания помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем; развить навыки использования радиотехнических измерительных приборов.

4.1. Общая информация

В лабораторной работе №4 объектом проведения экспериментальных исследований является модуль навигационного приемника (далее по тексту — модуль НП, навигационный модуль), работающий в составе навигационной аппаратуры потребителей (НАП) (рис.3.1) [1, 5].

4.1.1. Основные сведения

Под *помехоустойчивостью* модуля НП понимается его способность работать в условиях воздействия внешних помех. В качестве характеристики помехоустойчивости принимается граничное (наибольшее) значение отношения мощности помехового сигнала к мощности полезного сигнала на входе модуля НП, при котором модуль НП еще может решать целевую задачу с заданными характеристиками:

$$K_{J/S} = P_J / P_S, \quad (4.1)$$

где P_S — мощность полезного сигнала одного навигационного спутника на выходе антенны, P_J — мощность помеховых сигналов на выходе антенны. Если мощности навигационных сигналов не равны, то P_S — мощность самого слабого сигнала из участвующих в навигационном решении.

Под заданными характеристиками решения целевой задачи понимается выдача навигационного 3D-решения без перерывов, превышающих 10-секундный интервал.

Параметр $K_{J/S}$, который называется *коэффициентом подавления* НП, удобно характеризовать в децибелах, т.е.

$$J/S = 10 \log_{10} (K_{J/S}), \text{ дБ.} \quad (4.2)$$

Основными путями повышения помехозащиты НАП являются:

- введение избыточности по навигационным сигналам, т.е. увеличение числа принимаемых и обрабатываемых навигационных сигналов, в том числе от различных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);
- прием и обработка перспективных двухкомпонентных (пилот и данных) сигналов ГНСС;
- использование высококачественных комплектующих и элементной базы;
- оптимизация алгоритмов обработки сигналов в НАП;
- комплексирование НАП ГНСС с другими информационными системами и в первую очередь с инерциальной навигационной системой (ИНС);
- частотная селекция (компенсация) помех;
- пространственная селекция (подавление) помех с использованием антенных решеток с управляемой диаграммой направленности.

4.1.2. Схемы экспериментальных установок

На рис.4.1 представлена схема экспериментальной установки, предназначенной для измерения характеристик аттенюатора, на рис.4.2 приведена схема разветвителя с соединительными кабелями и отсечкой постоянного тока.

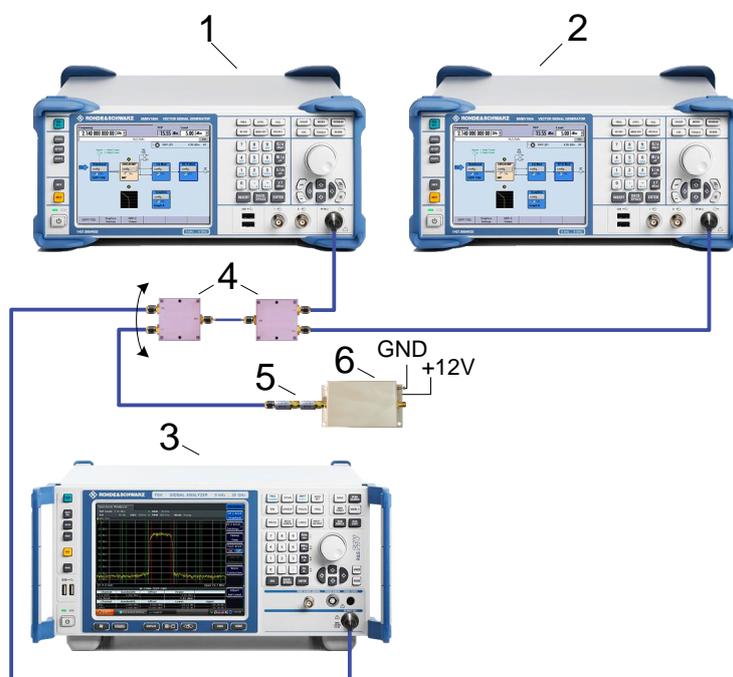


Рис.4.1. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик разветвителя

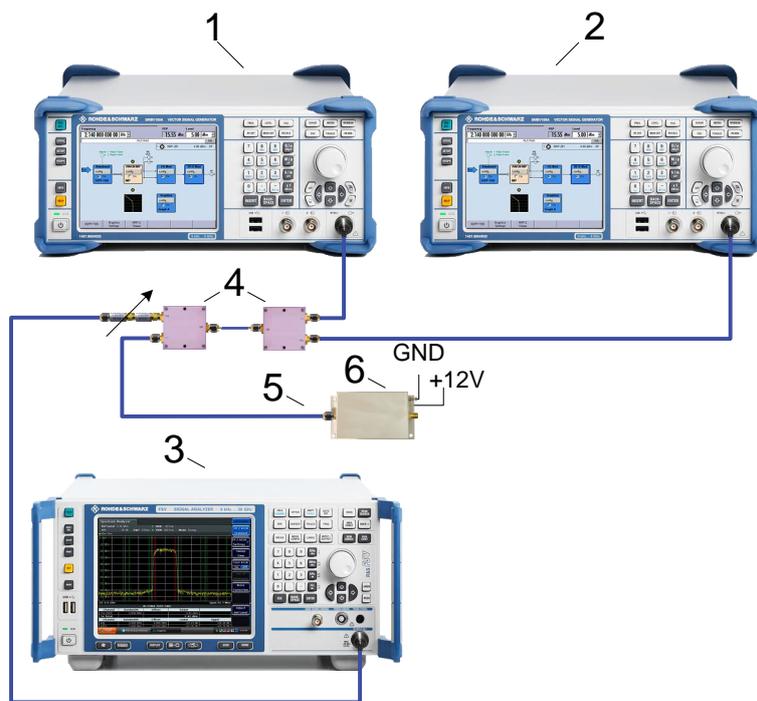


Рис.4.2. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик аттенюатора

На рис.4.3 представлена основная схема проведения экспериментов по измерению помехоустойчивости и чувствительности навигационных модулей (табл.4.1).

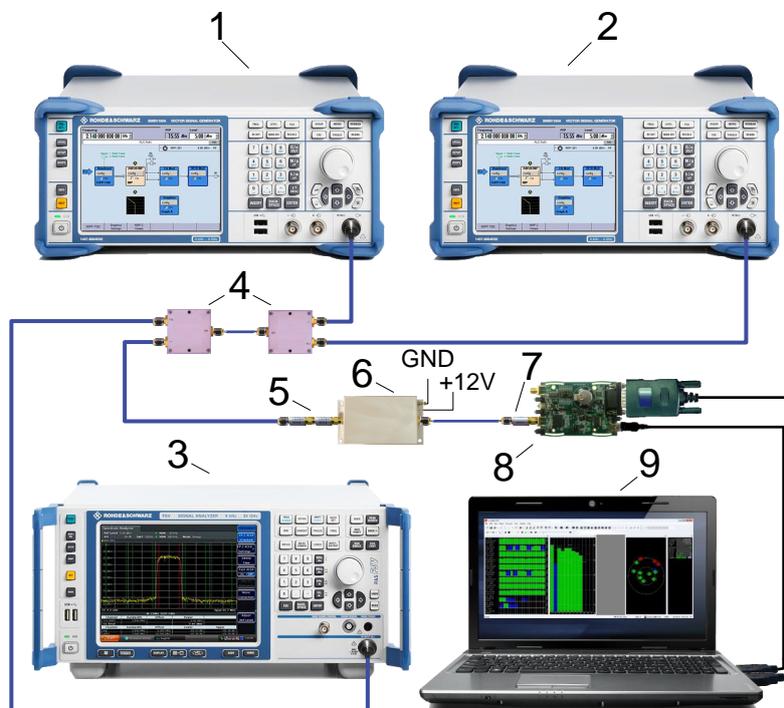


Рис.4.3. Схема экспериментальной установки для измерения чувствительности и помехоустойчивости навигационных модулей

Используемое в работе оборудование

№ на схе- мах	Прибор	Пример	Функция	Кол- во
1	Генератор навига- ционного сигнала	R&S SMBV, R&S SMU	Имитация навигационных сигналов	1
2	Генератор помехо- вого сигнала	R&S SMBV, R&S SMU, R&S SMC (только гармо- нические)	Генерация помеховых сигна- лов: гармонических, шумовых, сигналоподобных.	1
3	Анализатор спек- тра	R&S FSV, R&S FSU	Измерение мощности навига- ционного сигнала, помехи, ка- либровочных сигналов	1
4	ВЧ- сумма- тор/разветвитель L- диапазона	MiniCircuits ZAPD-2DC-S+	Суммирование помехового и навигационного сигналов; разветвление суммарного сиг- нала к анализатору спектра и навигационному модулю	2
5	Аттенюатор 30 дБ L-диапазона	MiniCircuits VAT-30+	Ослабление сигнала до уров- ня, соответствующему выход- ной мощности приемной ан- тенны навигационной аппара- туры потребителей	2
6	Малозумящий усилитель (МШУ)	MiniCircuits ZRL-2400LN+	Имитация МШУ навигацион- ной аппаратуры потребителей	1
7	DC-Block (отсечка постоянного тока)	MiniCircuits BLK-89-S+	Предотвращение подачи по- стоянного напряжения от навигационного модуля к ат- тенюаторам	1
8	Модуль навига- ционного приемника		Объект исследования	1
9	Персональный компьютер с ин- терфейсными кабе- лями		Выполнение интерфейсной программы, обмен данными с навигационными модулями, питание навигационных моду- лей.	1
10	Соединительные кабели L-диапазона		Соединение генераторов и сумматора, соединение сум- маторов, соединение аттенюа- тора и МШУ, соединение МШУ и навигационного мо- дуля, соединение разветвителя и спектроанализатора.	6
11	Источник питания	GW Instek GPS- 4303	Питание МШУ, навигацион- ных модулей	1

4.2. Лабораторное задание

Для проведения экспериментального исследования помехоустойчивости модуля НП выполните подготовительные этапы 1, 2, а затем выполните пункты методики, соответствующие составленному плану экспериментальных исследований. Результаты фиксируйте в протоколе (Приложение 1).

4.2.1. Определение коэффициента передачи аттенюатора

1. Собрать экспериментальную установку для измерения характеристик аттенюатора согласно рис.4.1. В качестве аттенюатора использовать сборный с номинальным коэффициентом ослабления 50-60 дБ.

2. Включить генератор навигационного сигнала (ГНС), анализатор спектра (далее АС). Перевести АС в режим измерения мощности в полосе равной полосе используемого навигационного сигнала. Дальнейшие измерения мощности с помощью АС проводить в этом режиме, устанавливая в качестве центральной частоты анализа центральную частоту навигационного или помехового сигнала.

3. С помощью ГС и АС определить коэффициент ослабления аттенюатора K_{att} , дБ. При включенном в схему аттенюаторе установить на ГС формирование синусоидального сигнала с частотой, равной центральной частоте рабочего диапазона (для ГЛОНАСС L1 1602,0 МГц, для GPS L1 1575,42 МГц) и мощностью, измеряемой АС, $P_{with} = -70$ дБм. Исключить их схемы аттенюатор - соединить разветвитель и АС. Измерить мощность $P_{without}$ синусоидального сигнала с помощью АС. Найти $K_{att} = P_{without} - P_{with}$. Занести значение K_{att} (положительное число) в протокол.

4.2.2. Определение разности коэффициентов передачи разветвителя

1. Собрать экспериментальную установку для измерения характеристик разветвителя согласно рис.4.2.

2. Установить на ГНС формирование синусоидального сигнала с частотой, равной центральной частоте рабочего диапазона (для ГЛОНАСС L1 1602,0 МГц, для GPS L1 1575,42 МГц) и мощностью, измеряемой АС, $P_{g,1} = -60$ дБм. Текущий выход разветвителя, соединенный с АС, считать *первым*.

3. Перекоммутировать выходы разветвителя (при возможности, вместе с соединительными кабелями). Измерить мощность сигнала $P_{g,2}$ с

помощью АС. Текущий выход разветвителя, соединенный с АС, считать вторым.

4. Определить разность коэффициентов передачи разветвителя как $\Delta K = P_{g,2} - P_{g,1}$, зафиксировать полученное значение в протоколе. В дальнейшем второй выход использовать для подключения к АС, первый - к МШУ.

4.2.3. Определение помехоустойчивости навигационного модуля в условиях холодного старта

1. При необходимости выполнить пункты подготовки 1, 2, занести полученные значения K_{att} , ΔK в протокол.

2. Занести в протокол параметры, используемые при проведении экспериментов:

- $T1 = 60$ сек;
- $T2 = 300$ сек.

3. Собрать экспериментальную установку согласно рис.4.3.

4. Включить ЭВМ и запустить ПО для отображения, сохранения и установки параметров модуля НП.

5. На ГНС запустить требуемый сценарий имитации. Установить уровень сигнала ГНС (далее навигационный сигнал) для каждого спутника равным $P_S = -125 + \Delta K + K_{att} \pm 1$ дБм по измерениям АС. Занести измеренное значение P_S в протокол.

6. Включить модуль НП.

7. Установить связь ЭВМ с модулем НП. Задать параметры работы в соответствии с планом проведения экспериментальных исследований:

- система (ГЛОНАСС или GPS);
- частотный диапазон (L1);
- тип сигналов (СТ или С/А).

8. Через 2 минуты убедиться, что модуль НП в течение 2 минут выдает навигационное 3D-решение без перерывов, превышающих 10 сек. Если условие не выполняется, проверить правильность выполнения пунктов 1, 2, 2-7. Если проверка не выявила нарушений пунктов методики, записать в качестве оценки параметра $J / S = 0$. Сообщить преподавателю. Перейти к следующему пункту плана экспериментальных исследований.

9. Выключить модуль НП и ВЧ выход ГНС.

10. Установить на генераторе помехового сигнала (далее ГПС) соответствующие экспериментальному исследованию тип и параметры выходных сигналов (далее помеховых сигналов) в соответствии с Приложением В.

11. Включить выход ГПС, контролируя значения по АС установить мощность помехового сигнала на втором выходе разветвителя $P_J = P_{J,max} = -70 \text{ дБм} + K_{att}$. Полоса измерения АС должна быть согласованной с полосой соответствующего навигационного сигнала при каждом измерении.

12. Включить ВЧ выход ГНС, затем включить модуль НП. Установить связь ЭВМ с модулем НП и задать параметры работы как в п. 7.

13. С помощью общего регулятора мощности ГПС синхронно уменьшать мощность помехового сигнала P_J на 3 дБ (по показаниям ГПС или АС) через каждый интервал времени T_1 , контролируя отсутствие выдачи навигационного 3D-решения. Когда модуль НП начнет выдавать навигационное 3D-решение, выключить ВЧ выход ГНС. Измерить с помощью АС мощность помехового сигнала. Занести в протокол измеренную мощность помехового сигнала $P_{J,0}$.

14. Установить мощность помехового сигнала на втором выходе разветвителя $P_J = P_{J,0} + 10 \text{ дБм}$ по измерениям АС. Перезапустить сценарий имитации на ГНС, включить ВЧ выход ГНС.

15. Выключить и включить модуль НП, установить связь ЭВМ с модулем НП и задать параметры работы как в п. 7. Выждать время T_2 , убедиться в отсутствии навигационного 3D-решения. Если навигационное 3D-решение всё же выдается, то повторить п.п. 14-15, увеличив мощность помехового сигнала на 3 дБ с помощью общего регулятора мощности ГПС.

16. Уменьшить мощность помехи на 1 дБ, выждать время T_2 , проконтролировать наличие/отсутствие навигационного 3D-решения на выходе НП.

17. При отсутствии навигационного 3D-решения в течение 2 минут без перерывов, превышающих 10-секундный интервал, повторить пп. 15-17.

18. При наличии навигационного 3D-решения в течение 2 минут без перерывов, превышающих 10-секундный интервал, зафиксировать граничное значение мощности $P_{J,i} = P_J \text{ дБм}$ помехового сигнала.

19. Рассчитать коэффициент подавления НП по формуле $J / S_i = P_{J,i} - P_S$ (дБ). Зафиксировать рассчитанное значение в протоколе.

20. Набрать статистику значений J / S_i из 5 экспериментов повторяя выполнение пп. 14-18. Выполнение п. 14 допускается начинать с установки $P_J = P_{J,i-1} + 2 \text{ дБм}$, где $P_{J,i-1}$ – граничное значение мощности помехового сигнала, полученное в предыдущем эксперименте по набору статистики.

21. Рассчитать среднеарифметическое значение J / S по полученным значениям J / S_i , $i = 1, \dots, 5$. Зафиксировать рассчитанное значение J / S в протоколе.

4.2.4. Определение помехоустойчивости навигационного модуля в условии слежения

1. При необходимости выполнить пункты подготовки 1, 2, занести полученные значения K_{att} , ΔK в протокол.

2. Занести в протокол параметры, использующиеся при испытаниях:

- $T1 = 30$ секунд;

- $T2 = 120$ секунд.

3. На ГНС запустить требуемый сценарий имитации. Установить уровень сигнала ГНС (далее навигационный сигнал) для каждого спутника равным $P_S = -125 + \Delta K + K_{att} \pm 1$ дБм по измерениям АС. Занести измеренное значение P_S в протокол.

4. Собрать экспериментальную установку согласно рис.4.3. Включить ЭВМ и запустить ПО для отображения, сохранения и установки параметров модуля НП.

5. Включить модуль НП.

6. Установить связь ЭВМ с модулем НП. Задать параметры работы:

- система (ГЛОНАСС или GPS);

- частотный диапазон (L1);

- тип сигналов (СТ или С/А).

7. Через 2 минуты убедиться, что модуль НП в течение 2 минут выдает навигационное 3D-решение без перерывов, превышающих 10 сек. Если условие не выполняется, проверить правильность выполнения пунктов 1, 2, 3-6. Если проверка не выявила нарушений пунктов методики, записать в качестве оценки параметра $J/S = 0$. Сообщить преподавателю. Перейти к следующему пункту плана экспериментальных исследований.

8. Выключить модуль НП и ВЧ выход ГНС.

9. Установить на ГПС соответствующий экспериментальному исследованию тип и параметры выходного сигнала (далее помехового сигнала) в соответствии с Приложением В.

10. Включить выход ГПС, контролируя значения по АС установить мощность помехового сигнала на втором выходе разветвителя $P_J = P_{J,min} = -110$ дБм + K_{att} . Полоса измерения АС должна быть согласованной с полосой соответствующего навигационного сигнала при каждом измерении.

11. Включить модуль НП, установить связь ЭВМ с модулем НП и задать параметры работы как в п. 6. Через 2 минуты убедиться, что модуль НП в течение 2 минут выдает навигационное 3D-решение без перерывов, превышающих 10 сек.

12. С помощью общего регулятора выходной мощности ГПС увеличивать мощность помехи на выходе ГС на 3 дБ через каждый интервал

времени T_1 до тех пор, пока модуль НП не перестанет выдавать навигационное 3D-решение. Выключить ВЧ выход ГНС. Измерить с помощью АС мощность помехового сигнала. Занести в протокол измеренную мощность помехового сигнала $P_{J,0}$.

13. Отключить ВЧ выход ГПС. Выключить модуль НП. Включить ВЧ выход ГНС. Перезапустить сценарий имитации на ИС.

14. Включить модуль НП, установить связь ЭВМ с модулем НП и задать параметры работы как в п. 6.

15. Через 2 минуты убедиться, что модуль НП в течение 2 минут выдает навигационное 3D-решение без перерывов, превышающих 10 сек.

16. При испытаниях на помехоустойчивость в некогерентном/когерентном режиме слежения, перевести модуль НП в некогерентный/когерентный режим с помощью интерфейсного ПО на ПК.

17. Контролируя значения по АС установить мощность помехового сигнала на втором выходе разветвителя $P_J = P_{J,0} - 6$ дБм. Включить выходной сигнал ГПС. Через 2 минуты убедиться, что модуль НП в течение 2 минут выдает навигационное 3D-решение без перерывов, превышающих 10 сек. Иначе, повторить выполнение п.п. 13-17, уменьшив выходную мощность ГПС на 3 дБ.

18. Увеличить мощность помехи на 1 дБ. Проконтролировать, выдает ли модуль НП в течение 2 минут навигационное 3D-решение без перерывов, превышающих 10 сек. Если условие выполняется, повторить п. 18.

19. При нарушении условия п. 18: выключить ВЧ выход ИС, уменьшить выходную мощность помехи на 1 дБ, зафиксировать граничное значение мощности $P_{J,i} = P_J$ помехового сигнала по измерениям АС.

20. Рассчитать коэффициент подавления НП по формуле $J / S_i = P_{J,i} - P_S$ (дБ). Зафиксировать рассчитанное значение в протоколе.

21. Набрать статистику значений J / S_i из 5 экспериментов повторяя выполнение пп. 13-20. Выполнение п. 17 допускается начинать с установки $P_J = P_{J,i-1} - 3$ дБм, где $P_{J,i-1}$ - граничное значение мощности помехового сигнала, полученное в предыдущем эксперименте по набору статистики.

22. Рассчитать среднеарифметическое значение J / S по полученным значениям J / S_i , $i = 1, \dots, 5$. Зафиксировать рассчитанное значение J / S в протоколе.

4.3. Контрольные вопросы

1. Какова мощность навигационного сигнала системы ГЛОНАСС, NAVSTAR GPS на выходе антенны в условиях прямой видимости согласно ИКД?

2. В каких пределах может изменяться мощность навигационного сигнала одного спутника на выходе антенны НАП для каждой из систем?

4.4. Приложение 1. Бланк протокола

4.4.1. Помехоустойчивость поиска

Протокол экспериментальных исследований помехоустойчивости модуля НП _____ в режиме поиска сигналов (табл.П.1)

Таблица П.1

Тип навигационных сигналов	
Тип помехи	
Сценарий движения потребителя	

1. Параметры:

$$T1 = 60 \text{ сек}$$

$$T2 = 300 \text{ сек}$$

2. Коэффициент ослабления аттенюатора

$$K_{att} = + \quad \text{дБ}$$

Разность коэффициентов передачи разветвителя (2 - 1)

$$\Delta K = \quad \text{дБ}$$

3. Мощность сигнала одного спутника по измерениям АС (второй выход разветвителя)

$$P_s = - \quad \text{дБм.}$$

4. Мощность помехового сигнала по измерениям АС, при котором модуль НП захватил сигналы не менее чем 4 НС и выдавал навигационное 3D-решение в течение 2 минут без перерывов более 10 сек:

$$P_{J,0} = - \quad \text{дБм,}$$

5. Результаты косвенных измерений J/S (табл.П.2, П.3)

Таблица П.2

№ эксперимента, i	$P_{J,i}$, дБм	J/S_i , дБ
1		
2		
3		
4		
5		

Таблица П.3

Параметр	Значение
Среднеарифметическое значение J/S , дБ	

4.4.2. Помехоустойчивость слежения

Протокол экспериментальных исследований помехоустойчивости модуля НП _____ в режиме слежения (табл.П.4)

Таблица П.4

Тип навигационных сигналов	
Тип помехи	
Сценарий движения потребителя	

1. Временные параметры:

$T_1 =$

$T_2 = 120$ сек

2. Коэффициент ослабления аттенюатора

$K_{att} = +$ дБ

Разность коэффициентов передачи разветвителя (2 - 1)

$\Delta K =$ дБ

3. Мощность сигнала одного спутника по измерениям АС (второй выход разветвителя):

$P_s = -$ дБм.

4. Приближенное значение мощности помехового сигнала по измерениям АС, при котором модуль НП прекращает выдачу навигационного 3D-решения (в течение 2 минут без перерывов более 10 сек):

$P_{J,0} = -$ дБм,

5. Результаты косвенных измерений J/S (табл.П.5, П.6)

Таблица П.5

№ эксперимента, i	$P_{J,i}$, дБм	J/S_i , дБ
1		
2		
3		
4		
5		

Таблица П.6

Параметр	Значение
Среднеарифметическое значение J/S , дБ	

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

«ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯТОРА АП СРНС ГЛОНАСС С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ»

Цель работы: исследовать структуру и свойства функциональных элементов корреляторов АП СРНС, а также характеристики процессов, происходящих в корреляторах АП СРНС; ознакомиться с ИКД ГЛОНАСС.

5.1. Состав стенда

Для выполнения лабораторной работы №5 необходим персональный компьютер с ОС семейства Linux или Windows с установленным пакетом ПО Matlab.

5.2. Описание имитационной модели

Имитационная модель «Фронтенд и корреляционный канал навигационного приемника» демонстрирует процессы и преобразования, проходящие в фронтенде, АЦП и корреляторе навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем.

5.2.1. Возможности имитационной модели

Имитационная модель позволяет получить осциллограммы и спектры процессов в описанных блоках:

- при приеме сигнала на фоне мешающей гармонической помехи и без неё;
- при наличии и отсутствии собственного шума приемника;
- при различных значениях полосы пропускания фронтенда приемника;
- при различном числе разрядов АЦП;
- при различном числе разрядов опорных колебаний в корреляторе;
- при различных настройках формирующего опорное ПСП регистра сдвига.

Расчет корреляционных сумм проводится тремя способами:

1. По сформированным отсчетам сигнала на выходе АЦП путем перемножения с опорными сигналами и последующим накоплением – для различных значений задержки ПСП. Позволяет рассчитать графики корреляционных сумм в зависимости от разности задержек опорной ПСП ДК и ПСП ДК сигнала на выходе АЦП.

2. На основании имеющихся данных о параметрах сигнала и фильтров производится расчет математических ожиданий статистических эквивалентов. Позволяет сравнить результаты работы коррелятора с моделью статистического эквивалента.

3. С помощью пошаговой модели с имитацией работы регистров схемы коррелятора, реализованной в ПЛИС или ASIC.

5.2.2. Базовые математические модели

Так как моделирование производится на ЭВМ, в качестве моделей непрерывных процессов в радиочастотном блоке используются дискретизированные по времени последовательности.

Модель шкалы времени описывается следующими формулами:

$$t_{k,l} = t_{k,0} + l \cdot T_d; \quad t_{k+1,0} = t_{k,0} + L \cdot T_d = t_{k,0} + T,$$

где T_d – интервал дискретизации, T – интервал накопления в корреляторе [1].

Модель сигнала на выходе радиочастотного блока описывается выражением:

$$y_{f_e,k,l} = K_f \cdot (S_{k,l} + J_{k,l} + n_{k,l}),$$

где K_f – операторный коэффициент передачи цифрового фильтра с заданной полосой; $S_{k,l} = A \cdot G_c(t_{k,l} - \tau_k) \cdot \cos(\omega_{if}t_{k,l} + \omega_{d,k}lT_d + \varphi_k)$ – модель полезного сигнала; $J_{k,l} = A_j \cdot \cos(\omega_j t_{k,l} + \varphi_{j,k})$ – модель гармонической помехи; $n_{k,l}$ – ДБГШ с дисперсией σ_n^2 .

Модель сигнала на выходе АЦП представлена в виде:

$$y_{k,l} = Qu(y_{fe,k,l}),$$

Где $Qu(\)$ – нелинейная функция квантования.

Модель корреляционных сумм описывается следующими формулами [1, 5, 6, 7]:

$$I_k = \sum_{l=1}^L y_{k,l} \cdot G_c(t_{k,l} - \tilde{\tau}_k) \cdot \cos(\omega_{if}t_{k,l} + \tilde{\omega}_{d,k}lT_d + \tilde{\varphi}_k);$$

$$Q_k = \sum_{l=1}^L y_{k,l} \cdot G_c(t_{k,l} - \tilde{\tau}_k) \cdot \sin(\omega_{if}t_{k,l} + \tilde{\omega}_{d,k}lT_d + \tilde{\varphi}_k).$$

5.2.3. Работа с имитационной моделью

Интерфейс модели

Взаимодействие с имитационной моделью производится посредством графического интерфейса пользователя (рис.5.1). С его помощью происходит установка параметров моделирования, запуск событий и получение результатов.

Настройка и запуск генератора дальномерного кода

С помощью фрейма *Настройка генератора* (рис.5.2) производится установка параметров регистра сдвига, выполняющего функцию генератора дальномерного кода. С помощью выбора соответствующих CheckBox'ов производится замыкание обратной связи, с помощью полей ввода - установка начального значения. Сделанные изменения интерактивно отображаются на общей схеме коррелятора. Нажатие кнопки *OK* производит запуск генерирования ПСП - 511 тактов, что соответствует одному периоду ПСП СТ сигнала ГЛОНАСС [1, 4]. При этом во фрейме отображается график значения 7 бита регистра. Сформированное ПСП используется в дальнейшем для расчетов корреляционных сумм.

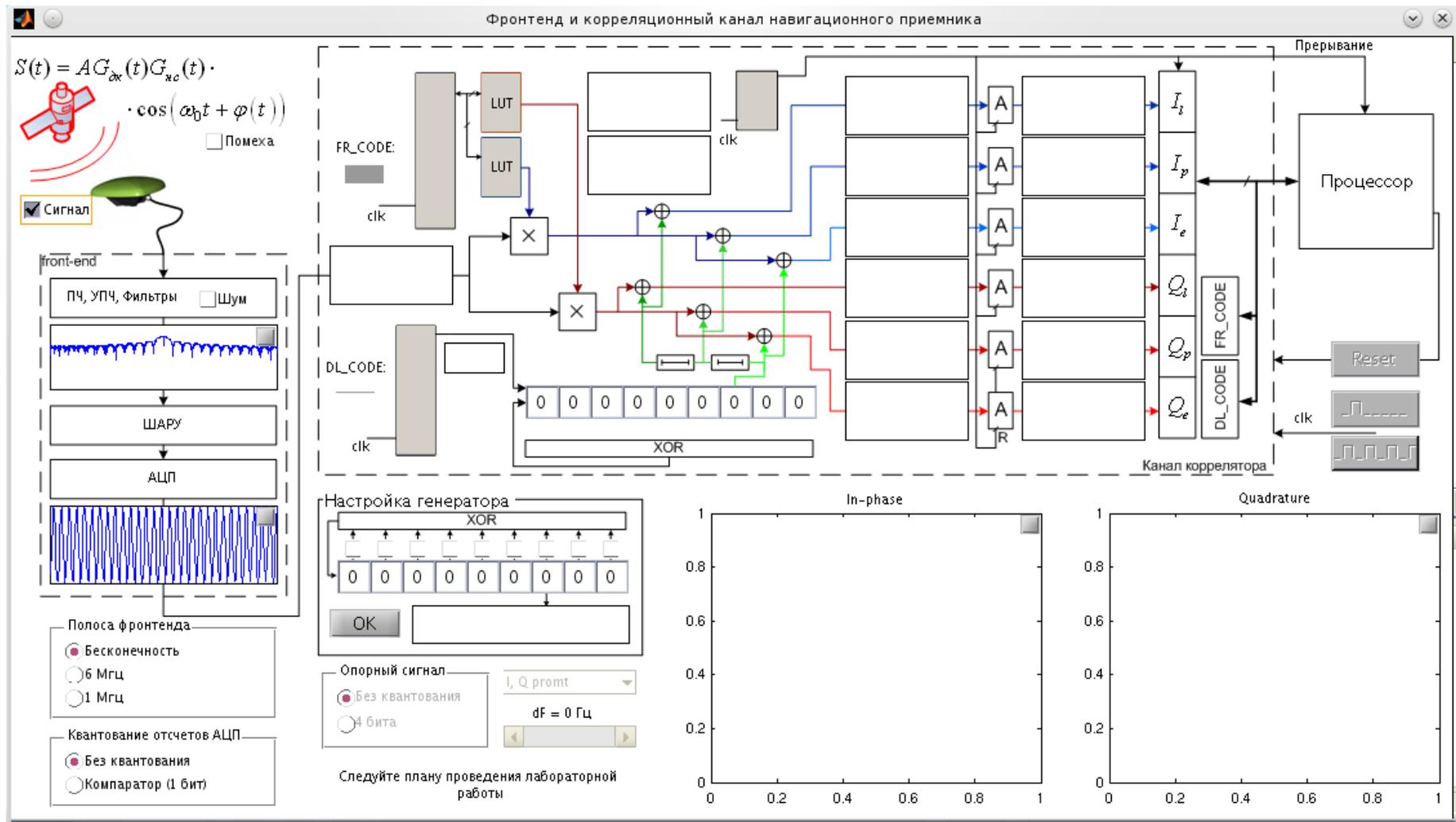


Рис.5.1. Интерфейс имитационной модели

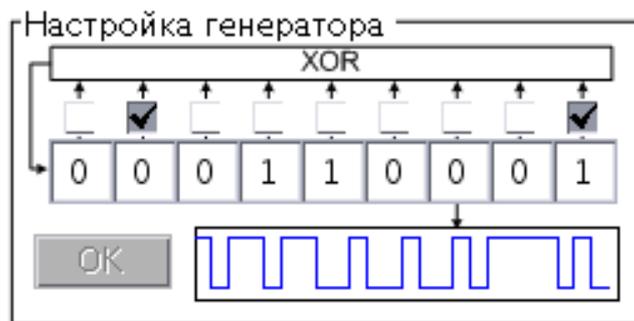


Рис.5.2. Фрейм Настройка генератора

Включение сигнала, помехи и собственного шума приемника

С помощью CheckBox *Сигнал*, *Помеха*, *Шум* (рис.5.3) производится включение/выключение имитации полезного сигнала, аддитивной гармонической помехи и аддитивного собственного шума приемника соответственно.

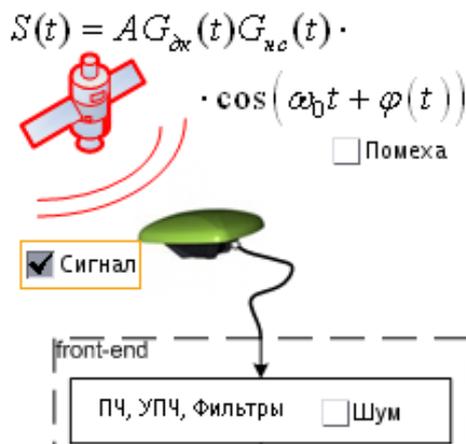


Рис.5.3. CheckBox'ы Сигнал, Помеха, Шум

Выбор полосы фроненда

Установка полосы фроненда производится во фрейме *Полоса фроненда* (рис.5.3):

1. *Бесконечность* – отсутствуют зеркальные каналы приема и внеполосные помехи, но спектр полезного сигнала ограничивается только частотой дискретизации (51.1 МГц);
2. *6 МГц* – отсутствуют зеркальные каналы и внеполосные помехи, спектр полезного сигнала ограничен фильтром с полосой 6 МГц;
3. *1 МГц* – отсутствуют зеркальные каналы и внеполосные помехи, спектр полезного сигнала ограничен фильтром с полосой 1 МГц.

На обобщенной схеме фроненда отображается график спектральной плотности мощности сигнала на входе шумового АРУ. С помощью

кнопки в правом верхнем углу производится открытие графика в отдельном окне.

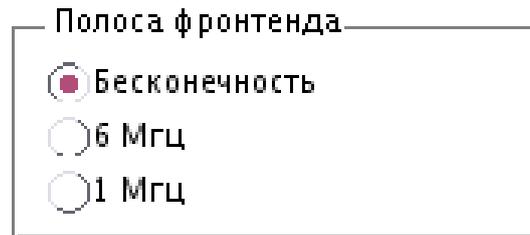


Рис.5.4. Фрейм *Полоса фронтеда*

Выбор разрядности АЦП

Установка числа разрядов АЦП производится во фрейме *Квантование отсчетов АЦП* (рис.5.5):

1. *Без квантования* - квантование не производится, отсчеты хранятся в переменных типа double (64 бита, плавающая точка);
2. *Компаратор (1 бит)* - входной сигнал АЦП пропускаются через компаратор, выходные отсчеты АЦП принимают значения $\{-1; +1\}$.

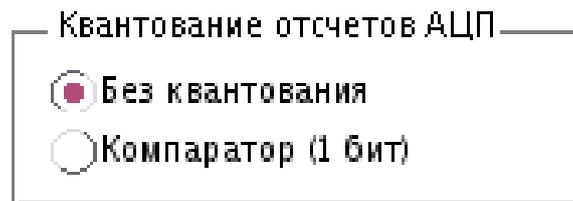


Рис.5.5. Фрейм *Квантование отсчетов АЦП*

На обобщенной схеме фронтеда отображается осциллограмма сигнала на выходе АЦП (точки отсчетов соединены прямыми отрезками). С помощью кнопки в правом верхнем углу производится открытие графика в отдельном окне.

Выбор разрядности опорного сигнала коррелятора

Установка числа разрядов опорного сигнала коррелятора производится во фрейме *Опорный сигнал* (рис.5.6):

1. *Без квантования* - квантование не производится, отсчеты хранятся в переменных типа double (64 бита, плавающая точка);
2. *4 бита* - опорный сигнал коррелятора принимает значения $\{-7; -6; \dots; 0; \dots; 6; 7\}$.

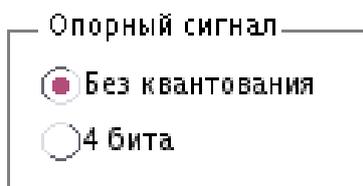


Рис.5.6. Фрейм Квантование отсчетов АЦП

Выбор набора квадратур

Значение рассчитанных корреляционных сумм, как функции от разности задержек дальномерного кода сигнала и дальномерного кода опорных колебаний, отображается на графиках в нижнем правом углу (рис.5.7). Открытие графиков в отдельном окне выполняется посредством нажатия на соответствующую кнопку в правом верхнем углу.

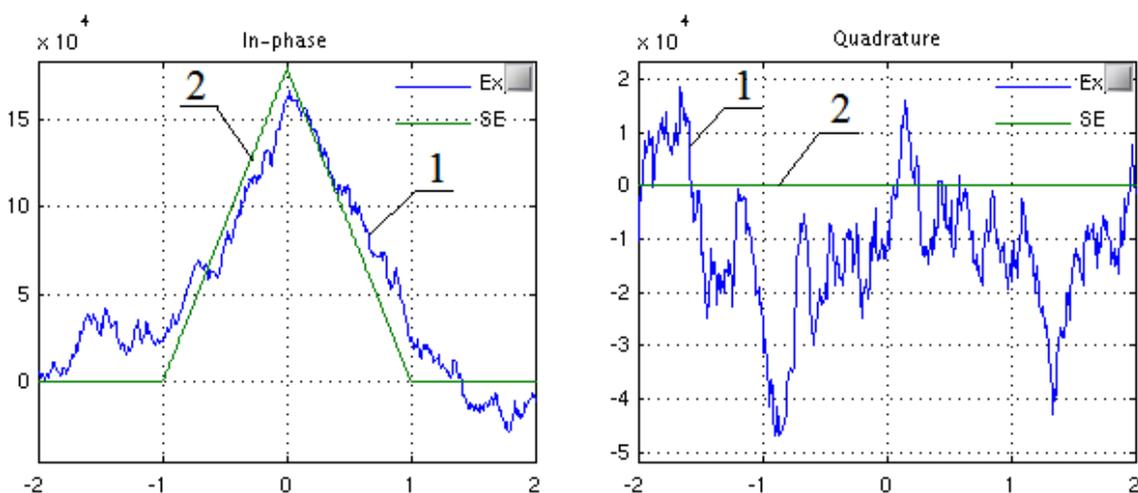


Рис.5.7. Графики вычисленных корреляционных сумм как функции разности задержек дальномерных кодов сигнала и опорных колебаний (график 1 – эксперимент; график 2 - статэквивалент)

Моделью рассчитываются три пары квадратур: earlier, prompt, later. Переключение между их отображением осуществляется с помощью выпадающего списка (рис.5.8):

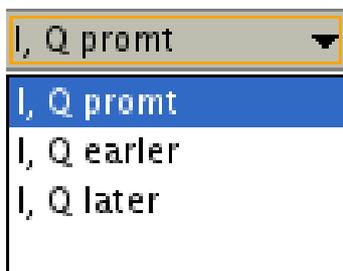


Рис.5.8. Выбор пары корреляционных сумм

Запуск пошаговой модели

Для более наглядного представления процессов, проходящих в аппаратном корреляторе, в правом верхнем блоке основного окна программы расположена интерактивная схема аппаратного коррелятора (рис.5.9).

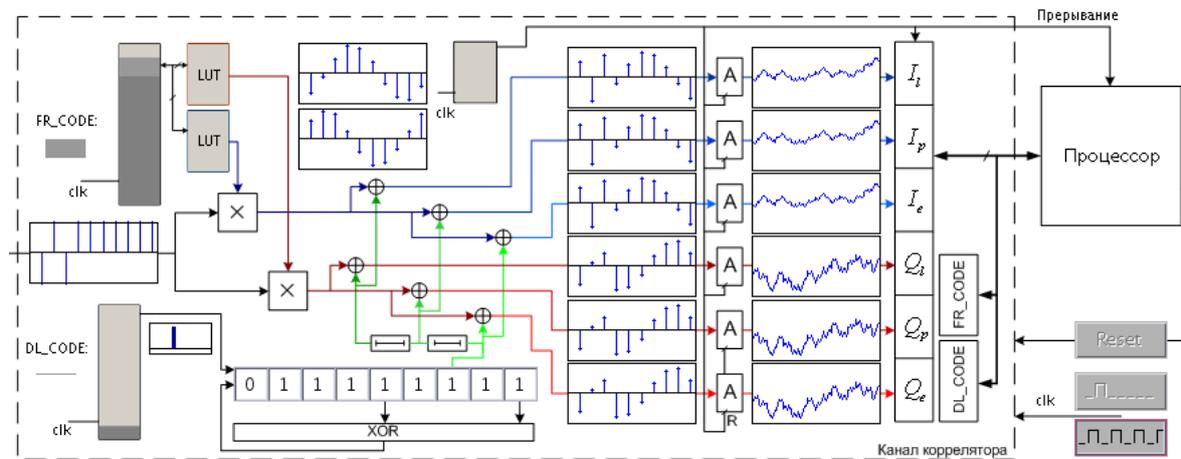


Рис.5.9. Выбор пары корреляционных сумм

Помимо настройки формирующего опорное ПСП регистра и изменения сигнала на выходе АЦП, пользователь может имитировать сигналы, поступающие в коррелятор:

- тактовые сигналы (clk) с помощью кнопок  - подать один импульс,  - включить тактовый генератор;
- сигнал сброса (R) с помощью кнопки .

5.3. Домашняя подготовка

1. Ознакомиться с данным методическим пособием.
2. Создать шаблон отчета для результатов домашней подготовки и лабораторного задания
3. Изучить разделы ИКД ГЛОНАСС L1 СТ и GPS L1 C/A, посвященные схемам формирования дальномерного кода [2, 3]. Привести схемы блоков формирования дальномерного кода в отчете.
4. Привести выражения для статистических эквивалентов выходных отсчетов коррелятора.

5.4. Лабораторное задание

1. Отключить шум приемного устройства. В качестве значения полосы фронтенда выбрать «Бесконечность». Квантование принимаемой реализации и опорного сигнала отключить. Расстройку опорного сигнала по частоте установить нулевой. На основании ИКД установить параметры схемы формирования ДК. Перенести схему в отчет. Занести в отчет вычисленные корреляционные функции. Определить промежуточную частоту сигнала, полосу сигнала.

2. Установить полосу фронтенда равной 6 МГц, 1 МГц. Перенести корреляционные функции в отчет. Оценить групповое время запаздывания.

3. В качестве значения полосы фронтенда выбрать «6 МГц». Перенести в отчет наглядный отрезок сигнала. Включить шум. Сравнить квадрат СКО шума (считая размах за 3 СКО) и мощность сигнала. Определить отношение мощности сигнала к односторонней спектральной

плотности шума: $q_{c/n_0} = \frac{P_s}{N_0}$ (привести к размерности дБГц). Перенести в

отчет отрезок реализации сигнала в смеси с шумом, корреляционные функции.

4. Наблюдать за изменением шумовой составляющей корреляционных функций при изменении полосы фронтенда. Исследовать зависимость мощности шумовой составляющей корреляционных компонент от полосы фронтенда, сделать соответствующие записи в отчете.

5. Выключить шум. Варьируя ошибку по частоте с шагом 200 Гц в диапазоне от -2 до +2 кГц, составить таблицу зависимости от ошибки по частоте компонент I_p , Q_p при нулевой ошибке по задержке. Сравнить результат со статистическим эквивалентом.

6. Включить шум. Исследовать влияние квантования входных отсчетов и опорных сигналов на корреляционные суммы.

7. Включить узкополосную помеху, исследовать её влияние на корреляционные суммы. Определить отношение мощности помехи к мощности сигнала.

8. Установить нулевую ошибку по частоте. В отсутствии узкополосной помехи при наличии шума приемника провести исследование процессов в пошаговой модели коррелятора.

5.5. Контрольные вопросы

1. Что такое коррелятор?
2. В каком случае оптимальный алгоритм обработки сводится к коррелятору?
3. Какую математическую операцию осуществляет коррелятор?
4. Сколько компонент на выходе коррелятора реализуется в типовом НАП.
5. Чем отличаются компоненты коррелятора?
6. Как формируется опорный гармонический сигнал коррелятора?
7. Как формируется опорный дальномерный код коррелятора?
8. Как формируется псевдослучайная последовательность сигнала ГЛОНАСС ПТ?
9. Как управляется частота опорного гармонического сигнала?
10. Как управляется фаза опорного гармонического сигнала?
11. Как управляется скорость следования символов опорного дальномерного кода?
12. Как управляется задержка опорного дальномерного кода?
13. В какие моменты времени вступают в силу новые управляющие коды коррелятора?
14. Как осуществляется синхронизация интервалов накопления сигнала в корреляторе с принимаемым сигналом?
15. Как осуществляется снятие измерений фазы и задержки?
16. Как происходит обмен данными между процессором и коррелятором?
17. Как влияет частота дискретизации сигнала на работу коррелятора?
18. Какова точность управления частотой опорного гармонического сигнала?
19. Какова точность установки скорости следования символов дальномерного кода?
20. Как влияет разрядность АЦП на работу коррелятора?
21. Как технически реализуется коррелятор в НАП?
22. Как влияет полоса фронт-энда на процесс на выходе коррелятора?
23. Чем отличаются компоненты I и Q на выходе коррелятора?
24. Чем отличаются компоненты I_E и I_L на выходе коррелятора?
25. Зачем нужна компонента Q на выходе коррелятора?
26. Зачем нужна компонента I_E на выходе коррелятора?
27. Как выбирается расстройка между компонентами коррелятора?
28. Как влияет тип дальномерного кода на параметры коррелятора?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. Перова А.И., Харисова В.Н.. — изд. 4-е, перераб. и доп.. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.

2. ИКД ГЛОНАСС

3. ИКД NAVSTAR GPS

4. Шатилов, А.Ю. Характеристики радиосигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou и функциональных дополнений SBAS [Текст]: учебное пособие по курсам "Основы построения спутниковых радионавигационных систем" и "Особенности спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo": для студентов, обучающихся по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" / А. Ю. Шатилов; М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исслед. ун-т "МЭИ". - Москва: МЭИ, 2016. - 36 с.: ил., табл., цв. ил.; 29 см.; ISBN 978-5-7046-1650-4: 200 экз.

5. Перов А.И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. – М.: Радиотехника, 2012. — 240 с.

Дополнительный

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

7. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. — 398 с.

8. Elliott Kaplan, Christopher J. Hegarty. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition.

9. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, Chris G. Bartone. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration 3rd Edition.