



**Программа прикладных исследований:**

**«Развитие космических технологий мониторинга процессов на земной поверхности и в литосфере, создание элементной базы и аппаратуры для его проведения, разработка приборов, аппаратно-программных средств и подсистем космической техники»**

## **Проект:**

**«Разработка экспериментального образца модуля обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем для использования в КА и функциональных дополнениях»**

**Научный руководитель: Ахмедов Д.Ш.**

**Ответственный исполнитель: Богуспаев Н.Б.**



**Цель проекта на 2017 год:** Разработка экспериментального образца модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем и экспериментального образца локальной системы дифференциальной коррекции.

**Задания на 1, 2, 3 и 4 кварталы 2017 года:**

1. Разработать макетный образец корреляционного блока модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем.
2. Разработать имитационную модель модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем.
3. Разработать экспериментальный образец модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем.
4. Разработать экспериментальный образец локальной системы дифференциальной коррекции на основе модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

## Аппаратные компоненты макетного образца ГНСС SDR приемника



48 x 40 x 13 mm



Компоненты макетного образца	Описание
ГНСС антенна	Активная GPS антенна ublox ANN-MS-0-005; рабочая частота $1575 \pm 3$ МГц; встроенный малошумящий усилитель с усилением 27 дБ и коэффициентом шума 1.8 дБ; коаксиальный кабель длиной 5 метров; диапазон питания антенны от 2.7 до 7 В
Радиочастотный модуль	Дочерняя плата USRP DBSRX2; прием сигналов на частотах с 800 МГц до 2.3 ГГц; настраиваемая аналоговая полоса пропускания с 8 МГц до 80 МГц; настраиваемый усилитель сигнала от 0 до 73 дБ

## Аппаратные компоненты макетного образца ГНСС SDR приемника

### Компоненты макетного образца

### Описание

Программно-определяемая радиосистема (SDR)

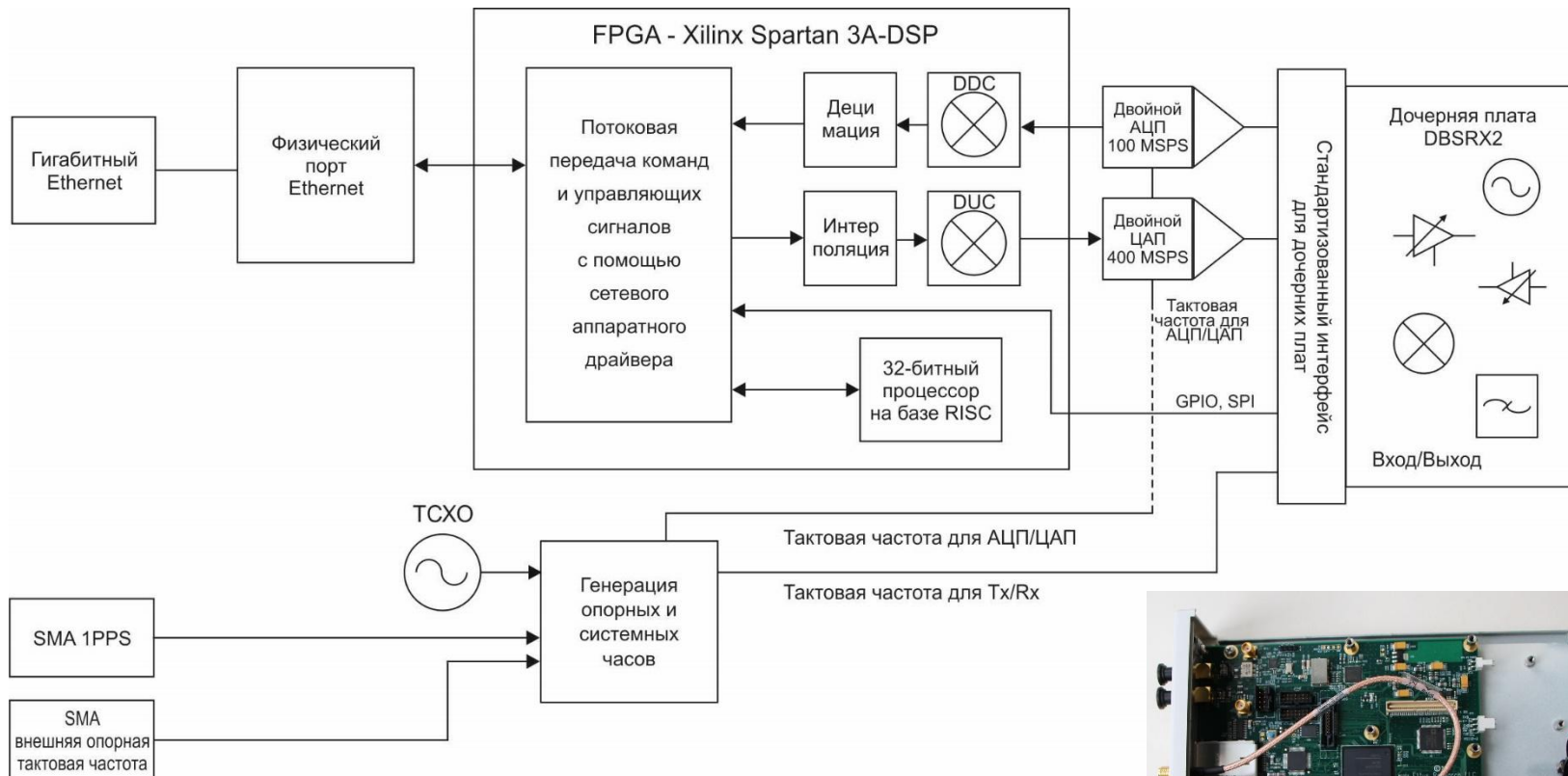
Универсальная программируемая радиосистема USRP N210; полоса пропускания промежуточной частоты до 25 МГц; размер сэмпла 16 бит; пропускная способность АЦП 100 Мсэмплов/с; интерфейс Ethernet со скоростью передачи данных 1 Гбит/с; максимальная частота дискретизации 25 Мсэмплов/с; встроенный генератор опорной частоты TCXO 2.5 ppm

ПК с установленным ПО корреляционного блока

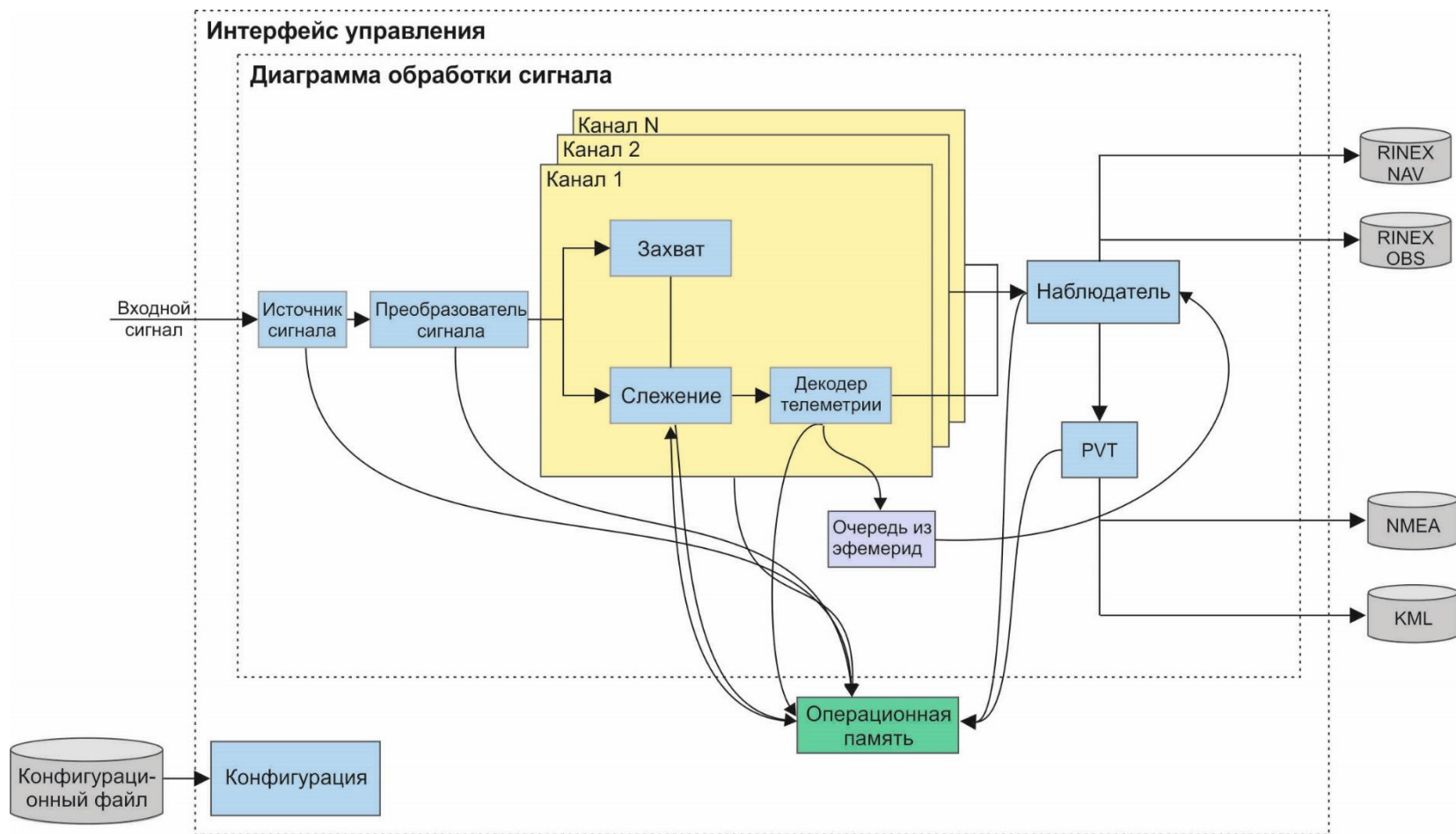
Операционная система Linux Ubuntu Debian 16.04; ЦПУ Intel(R) Core(TM) i3-2130, 3.40 ГГц; ОЗУ 4 Гб; порт Ethernet со скоростью передачи данных 1 Гбит/с



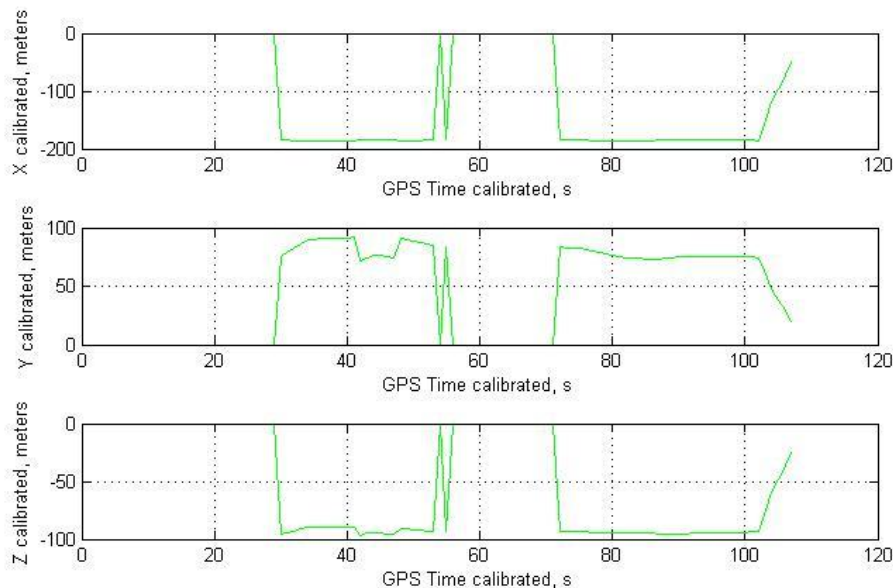
# Структурная схема программно-определяемой радиосистемы (SDR) USRP N210



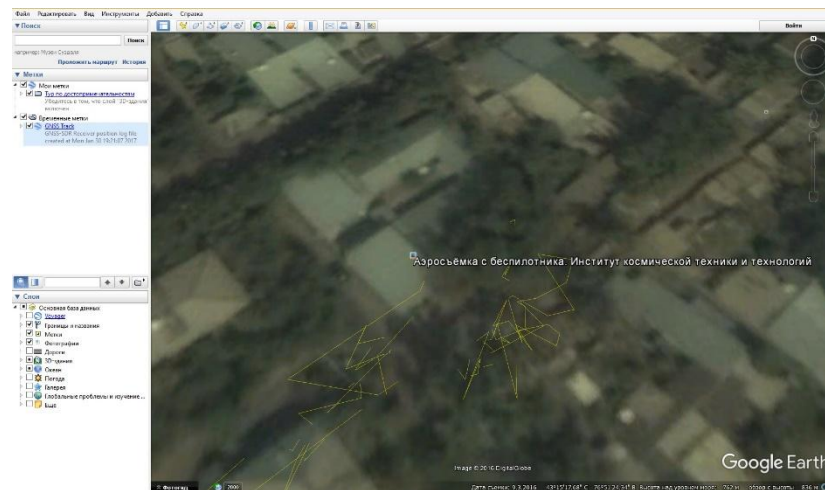
# Функциональная схема программного обеспечения макетного образца корреляционного блока



## Результаты позиционирования с помощью ГНСС SDR приемника



СКО по оси X равна 13.5 м  
 СКО по оси Y равна 8.85 м  
 СКО по оси Z равна 9.60 м

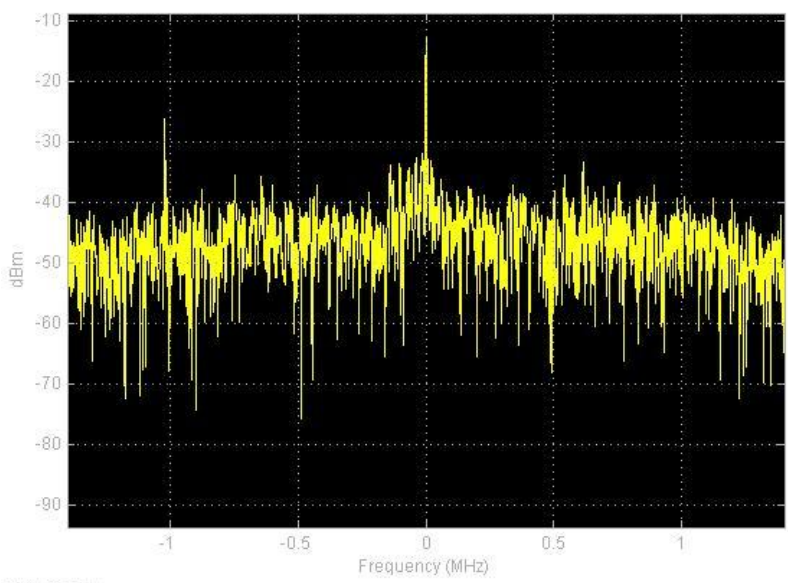
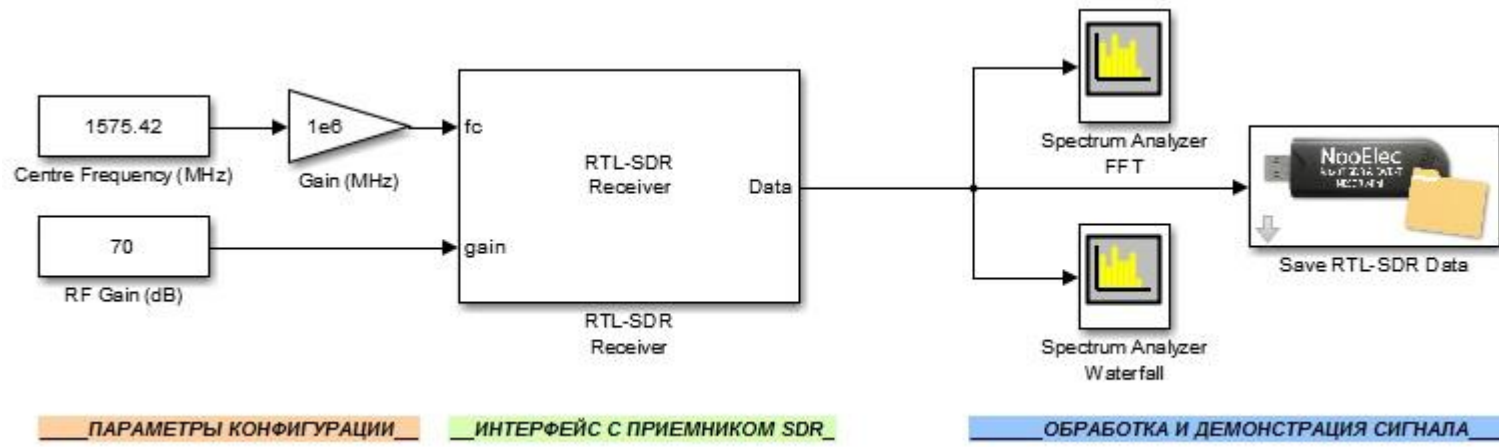


KML файл с координатами импортирован в приложение Google Earth

Результаты получены при следующей конфигурации основных параметров приема и обработки радиосигналов ГНСС:

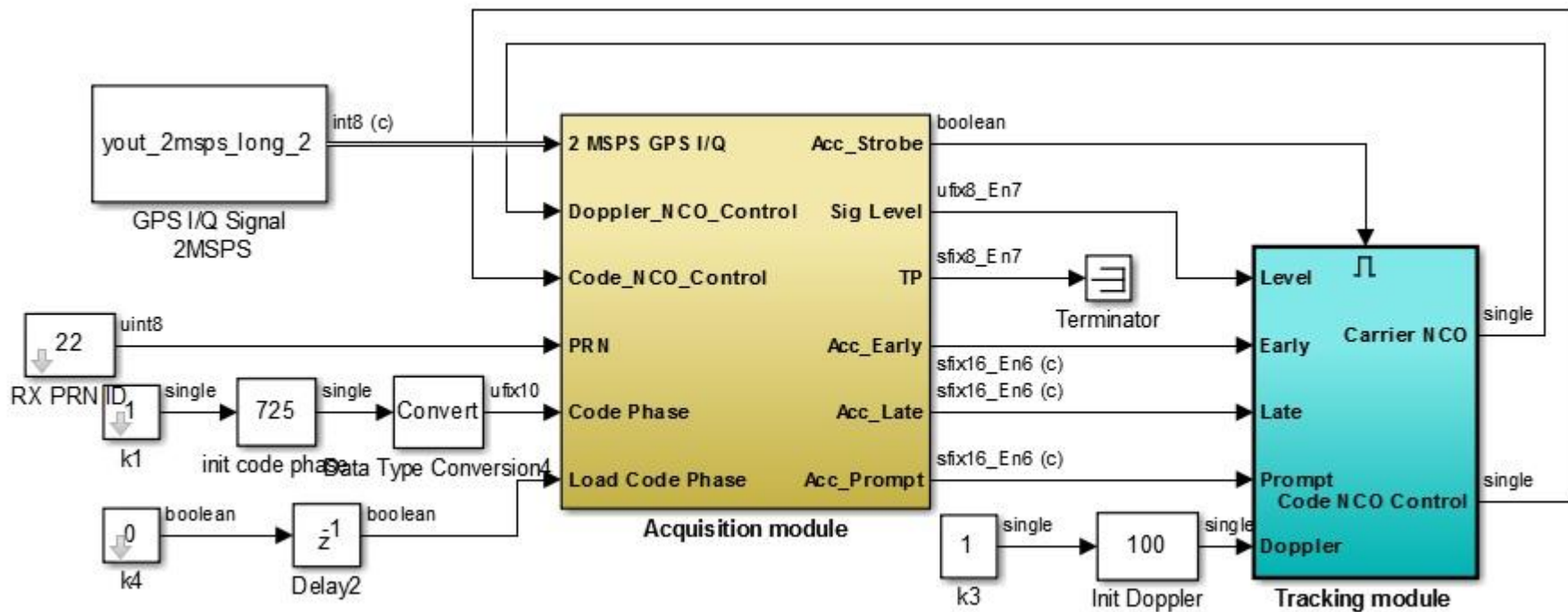
- частота входного аналогового радиосигнала равна 1575420000 Гц (частота L1 GPS);
- скорость обработки сигналов на ПК равна 2 Мсэмплов/с;
- усиление сигнала на радиочастотном модуле равна 70 дБ;
- количество навигационных каналов в радиотракте равно 8.

# Имитационная модель высокочастотной приемной части модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС

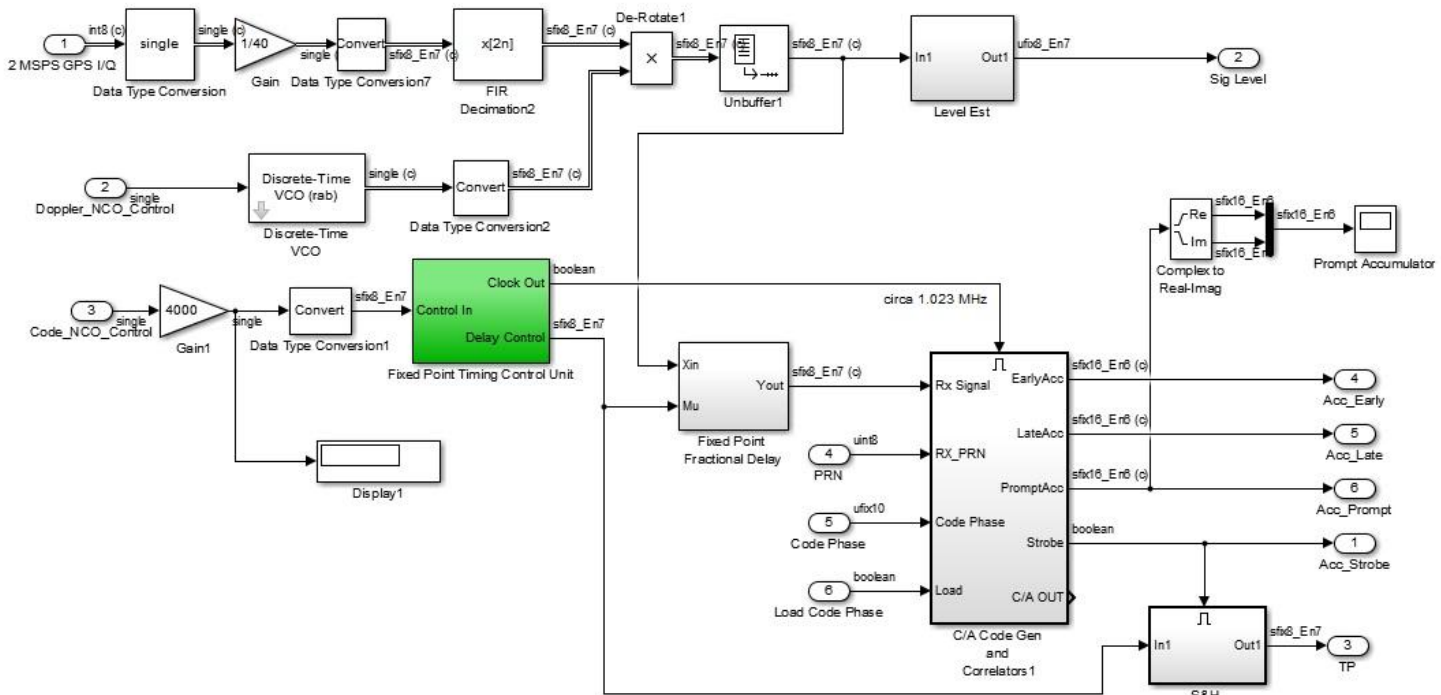




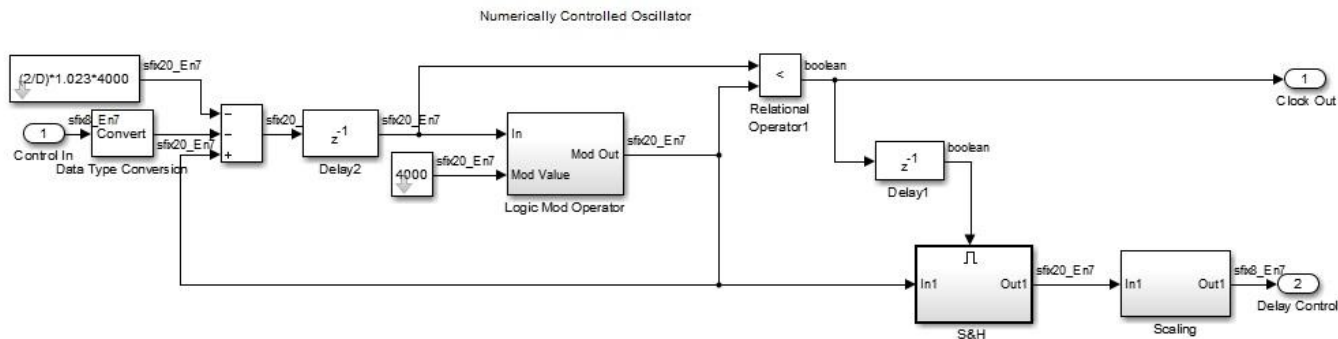
# Имитационная модель модуля приёма и обработки радиосигналов ГНСС



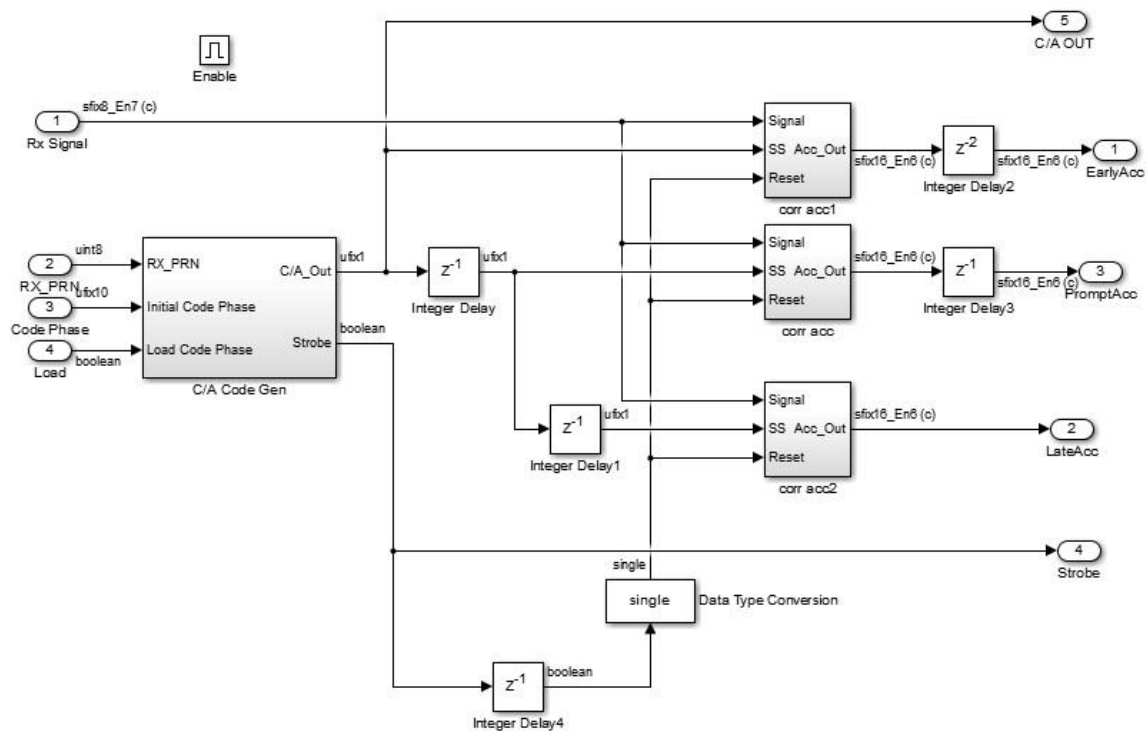
## Блок поиска и выделения навигационного сигнала



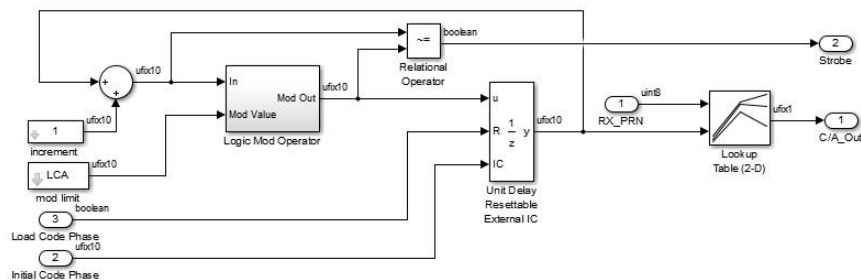
## Генератор с числовым программным управлением



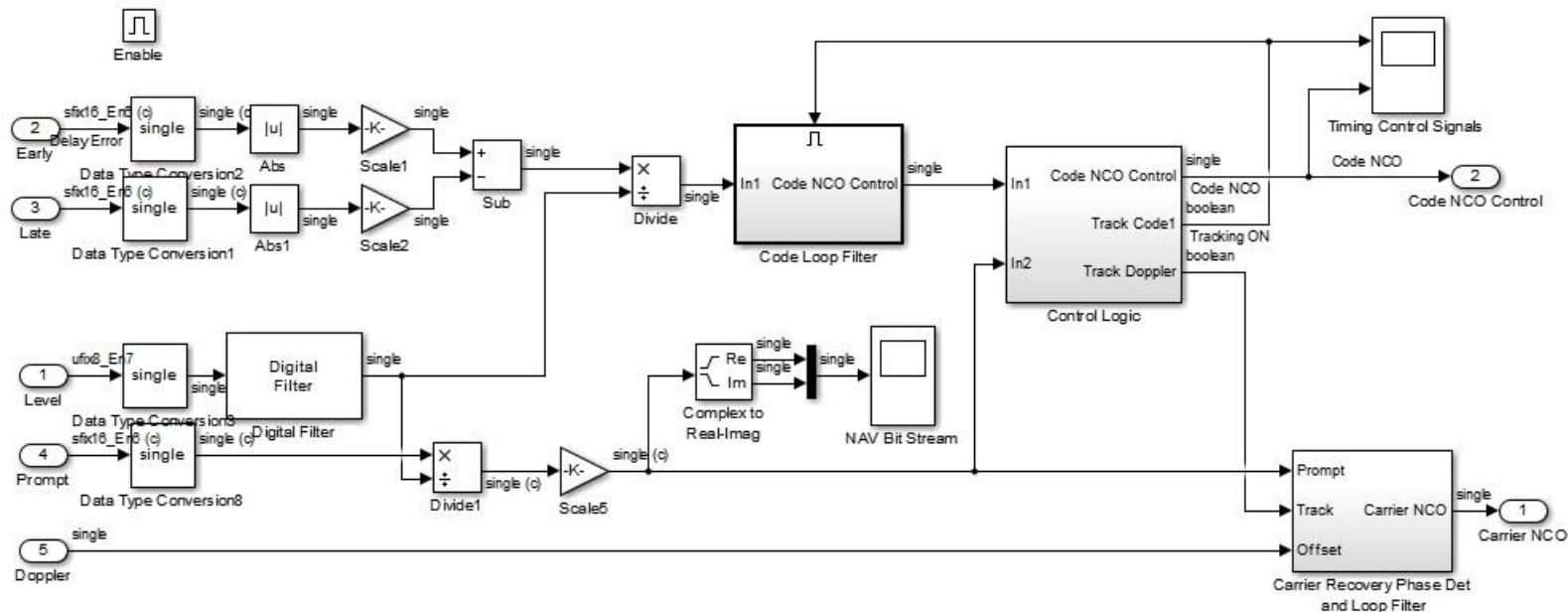
## Блок корреляции и генерации C/A кода



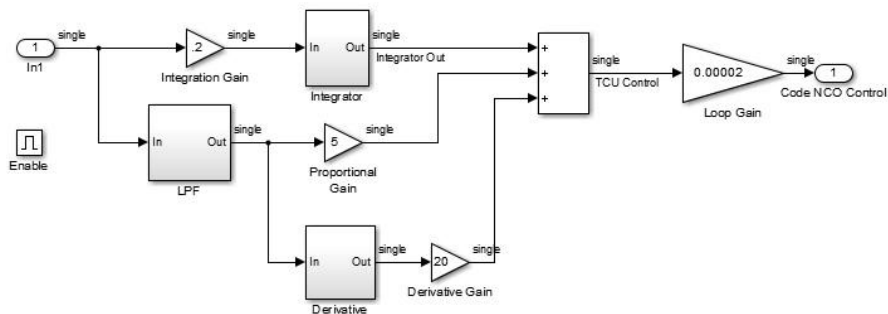
## Блок генерации C/A кода



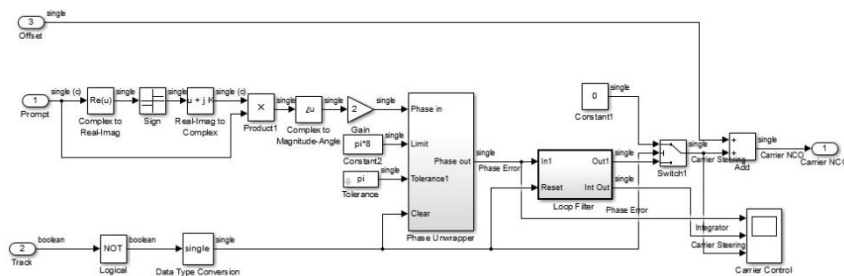
## Блок слежения за навигационным сигналом



## Блок слежения за кодовым сдвигом

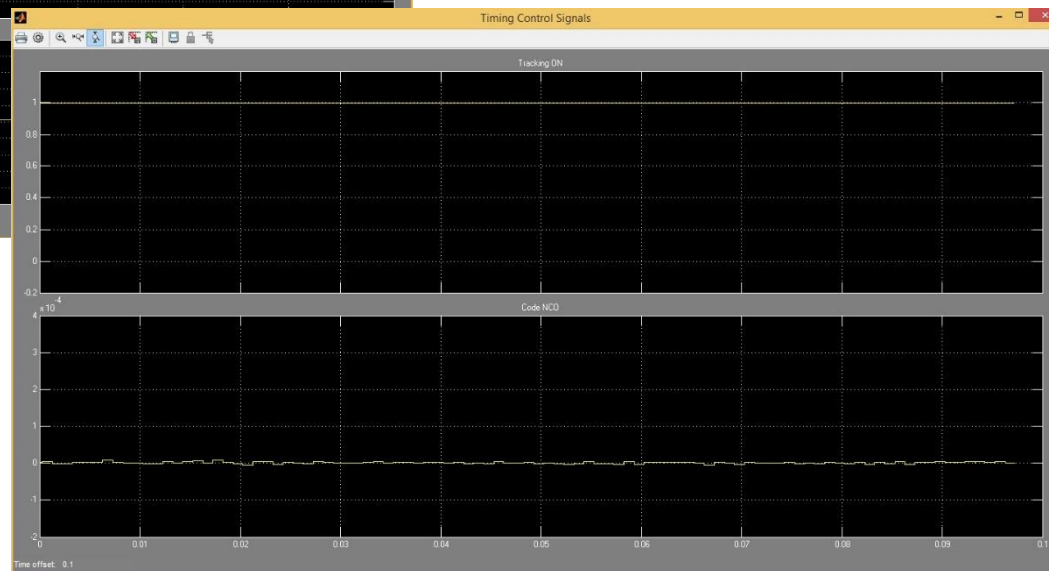
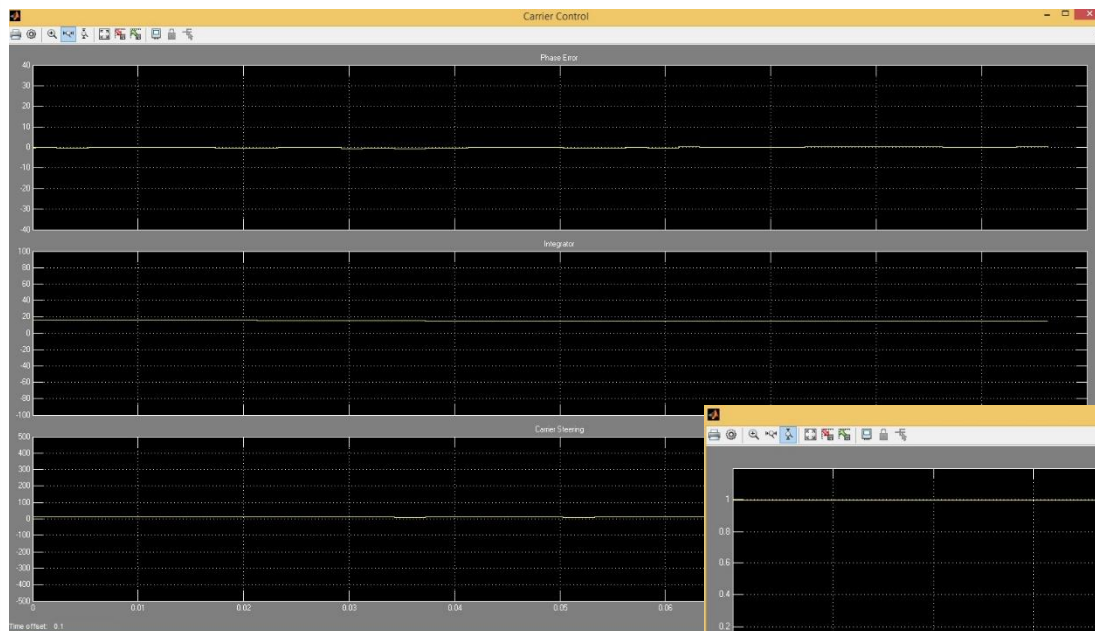


## Блок слежения за доплеровским сдвигом



# Результаты тестирования имитационной модели

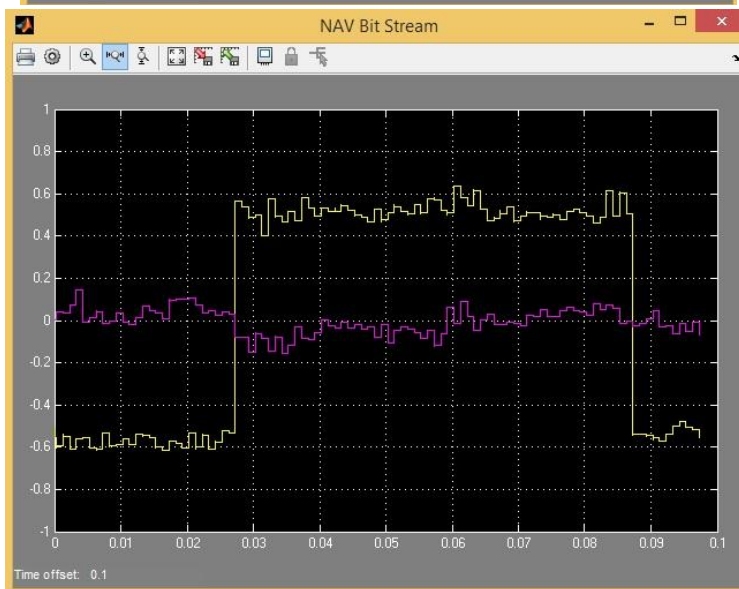
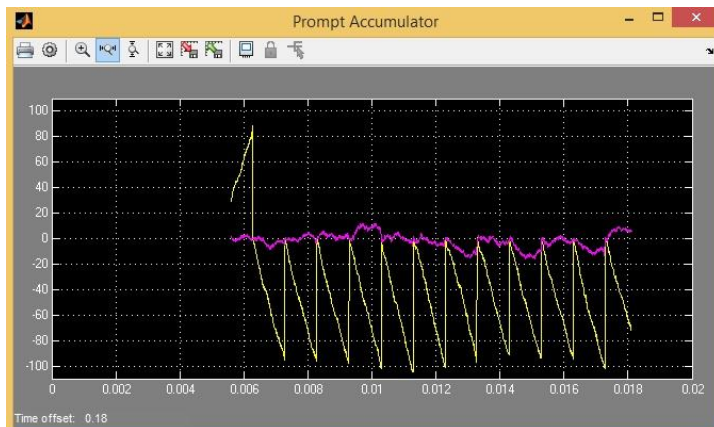
## Слежение за кодовым и доплеровским сдвигами



## Управление генератором кодовой последовательности

# Результаты тестирования имитационной модели

## Аккумулятор точной кодовой последовательности



## Битовый поток навигационных данных

УТВЕРЖДАЮ  
 Директор  
 Института космической  
 техники и технологий  
 Ахмедов Д.Ш.  
 2017 г.

Акт  
 тестирования имитационной модели модуля приёма и обработки радиосигналов  
 глобальных навигационных спутниковых систем

Мы, нижеподписавшиеся представители ДПО «Институт космической техники и технологий»: заведующий лабораторией спутниковых навигационных технологий Богуспасов Н.Б. и заведующий сектором программно-математического обеспечения Раскальев А.С. составили настоящий Акт тестирования имитационной модели модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

Согласно ТЗ на разработку, выполнены все требования к имитационной модели модуля приёма и обработки радиосигналов ГИСС:

- тестирование имитационной модели проводилось на битовых потоках IQ-отчетов, которые записывались с помощью имитационной модели высокочастотной приемной части модуля приёма и обработки радиосигналов, индивидуального к SDR-приемнику NanoFlex. Следующие параметры задавались на входе имитационной модели: латентный номер несущего сигнала GPS, доплеровская частота входящего сигнала, а также смещение нолонения C/A кода во входном сигнале относительно тестовой шкалы времени:

- все модули имитационной модели работали в составе единой системы полностью аналогично тому, как это происходит в блоках приёма, захвата и слежения за навигационным сигналом в реальном ГИСС-приемнике на базе SDR-технологии;
- в результате испытания имитационной модели было показано, что поток навигационных битов имеет заметные скачки в начале навигационных кадров, численные управляющие генераторы (NCO) производят эффективное слежение за фазой кода и доплеровским сдвигом навигационного сигнала, принятого в реальном режиме времени.

Тестирование имитационной модели модуля приёма и обработки радиосигналов ГИСС проводилось в лаборатории спутниковых навигационных технологий в соответствии с разработанной методикой испытаний.

Результаты испытаний подтвердили соответствие разработанной имитационной модели модуля приёма и обработки радиосигналов ГИСС требованиям ТЗ на разработку модуля приёма и обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем для использования в КА и функциональных дополнениях.

Заведующий лабораторией  
 спутниковых навигационных  
 технологий

Богуспасов Н.Б.

Заведующий сектором  
 программно-математического  
 обеспечения лаборатории спутниковых  
 навигационных технологий

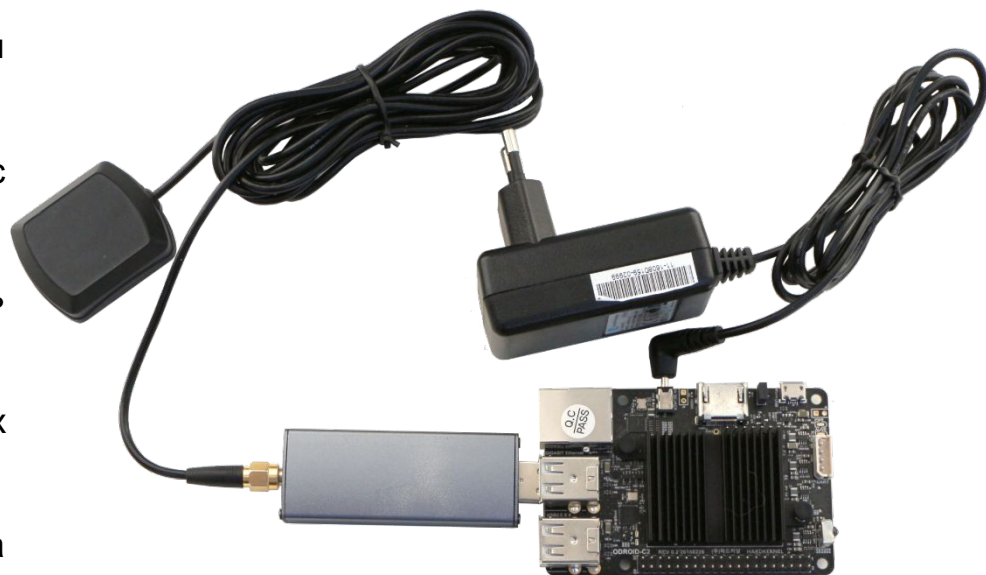
Раскальев А.С.

## Экспериментальный образец модуля обработки радиосигналов ГНСС

Экспериментальный образец модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС имеет следующие характеристики:

- точность позиционирования в реальном режиме времени (СКО) 4 м;
- масса экспериментально образца вместе с антенной 140 г;
- максимальная потребляемая мощность модуля 10 Вт (5 В, 2 А);
- полная стоимость комплектующих составила 105 долларов США.

Внедрение экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС за счет отечественной разработки программного обеспечения модуля позволяет снять ограничения CoCom на высоту и скорость позиционируемого объекта.



## Аппаратные компоненты экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС



48 x 40 x 13 mm

**Компоненты экспериментального образца**

**Описание**

ГНСС антенна

Активная GPS антенна ublox ANN-MS-0-005; рабочая частота  $1575 \pm 3$  МГц; встроенный малошумящий усилитель с усилением 27 дБ и коэффициентом шума 1.8 дБ; коаксиальный кабель длиной 5 метров; диапазон питания антенны от 2.7 до 7 В

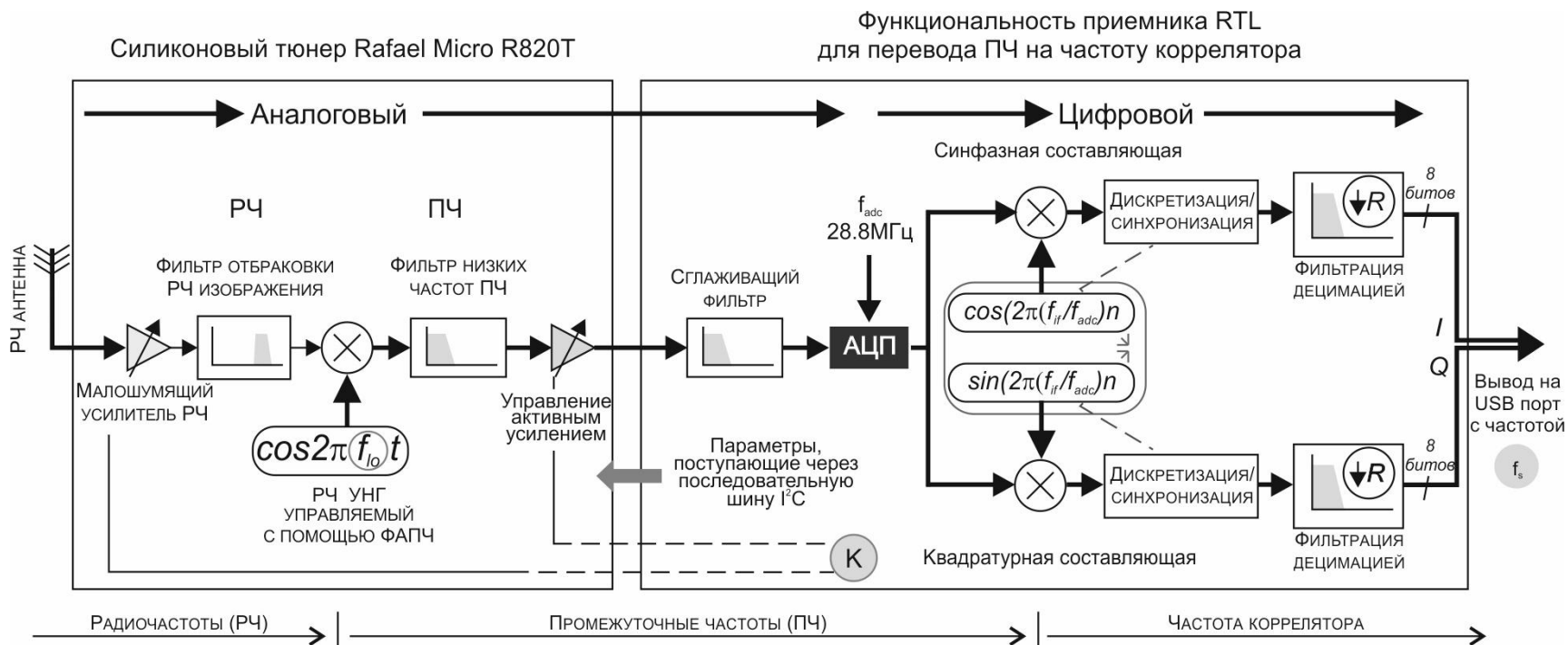
Программно-определяемый радиомодуль (SDR)

Программно-конфигурируемый SDR приемник RTL2832; широкая полоса частот приема в 24-1750 МГц, переменная ширина фильтра, а также возможность его подключения и питания через USB шину. RTL2832 производит усиление, оцифровку, семплирование и понижение частоты принятого сигнала.





# Функциональная схема RTL SDR фронтенда



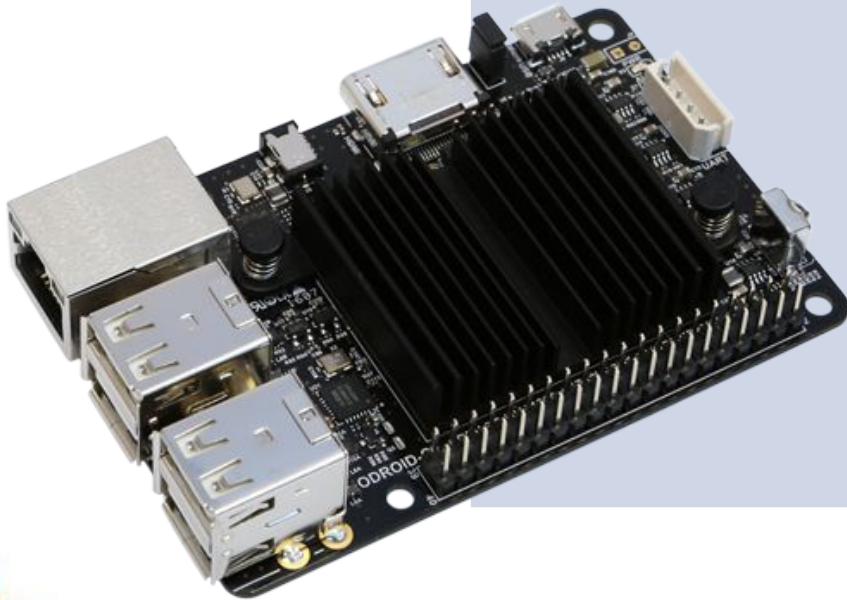
## Аппаратные компоненты экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС

### Компоненты экспериментального образца

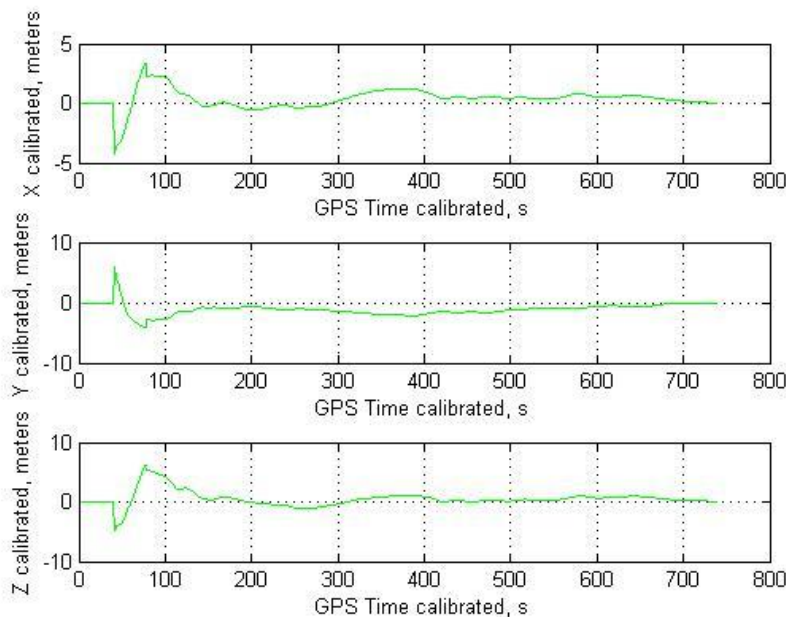
Микроконтроллер с установленным цифровым коррелятором

### Описание

Микроконтроллер ODROID-C2, который является новейшей 64-разрядной платформой на четырех ядерном процессоре Amlogic ARM Cortex-A53 (ARMv8), работающем на частоте 2ГГц. Платформа ODROID-C2 поддерживает операционную систему Ubuntu Debian. На ODROID-C2 установлен программный коррелятор, который делает большую часть работы по цифровой обработке GPS сигнала, а именно производит захват, слежение и декодирование оцифрованного сигнала с последующим решением задачи позиционирования.



## Результаты позиционирования с помощью экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС

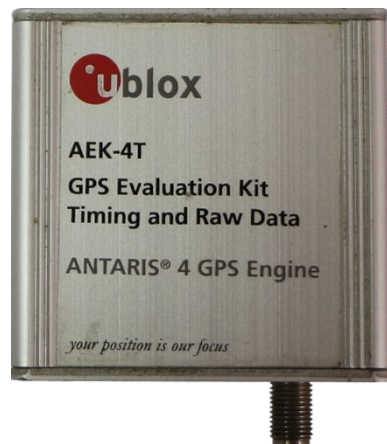


СКО по оси X равна 2.59 м, СКО по оси Y равна 3.18 м, СКО по оси Z равна 2.33 м

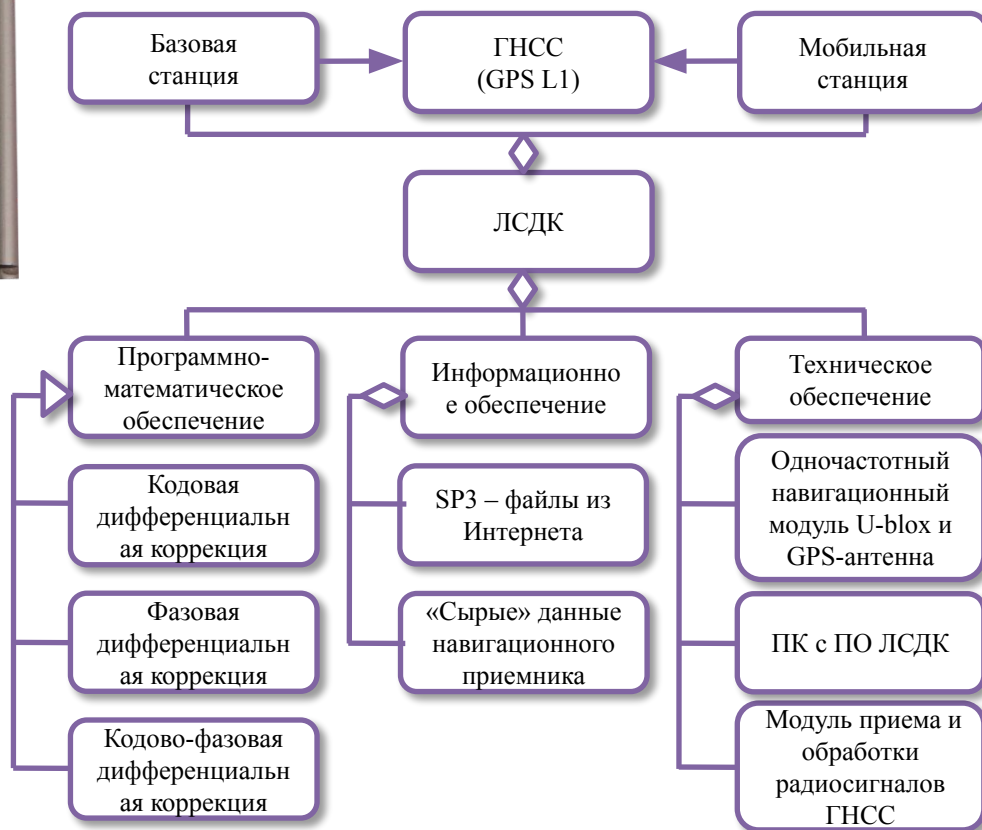
Результаты получены при следующей конфигурации основных параметров приема и обработки радиосигналов ГНСС:

- частота входного аналогового радиосигнала равна 1575420000 Гц (частота L1 GPS);
- скорость обработки сигналов на микроконтроллере равна 2 Мсэмпл/с;
- усиление сигнала на радиочастотном модуле равно 50 дБ;
- количество навигационных каналов в радиотракте коррелятора равно 4.

# Локальная система дифференциальной коррекции (ЛСДК) на основе модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС



Структурная схема ЛСДК при работе в режиме постобработки



## Математическое обеспечение ЛСДК

$$AX=B \quad (1)$$

В системе уравнений (1):

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \boxtimes \\ A_m \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ N_2 \\ \boxtimes \\ N_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ \boxtimes \\ B_m \end{bmatrix},$$

где:  $A_i = \begin{bmatrix} P \cdot E_i & F \\ \sigma P \cdot E_i & 0_{n-1 \times n-1} \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} P \cdot y_{\phi,i} \\ \sigma P \cdot y_{\rho,i} \end{bmatrix}, \quad i \in [1, m]; \quad E_i = \frac{1}{L_1} \frac{X_{s_i} - X_r}{\|X_{s_i} - X_r\|};$

$$P = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{n} & 1 - \frac{1}{n - \sqrt{n}} & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} & \boxtimes & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} \\ 1/\sqrt{n} & \frac{1}{n - \sqrt{n}} & 1 - \frac{1}{n - \sqrt{n}} & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} \\ \boxtimes & \boxtimes & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} & \boxtimes & \boxtimes \\ 1/\sqrt{n} & \boxtimes & \frac{1}{n - \sqrt{n}} & \boxtimes & \boxtimes \\ -\frac{1}{n - \sqrt{n}} & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} & -\frac{1}{n - \sqrt{n}} & \boxtimes & 1 - \frac{1}{n - \sqrt{n}} \end{bmatrix};$$

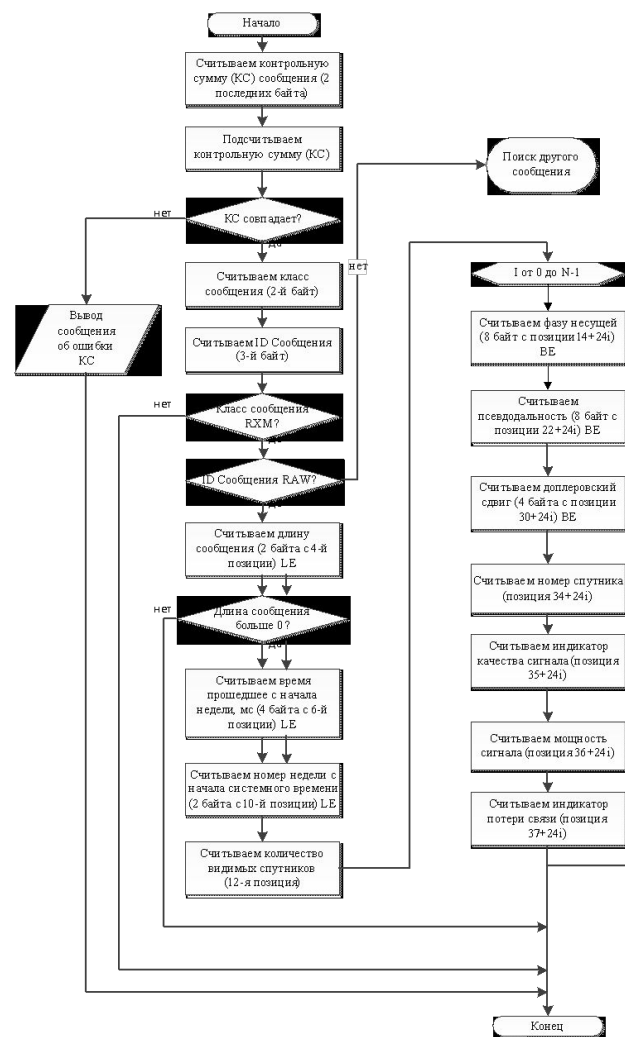
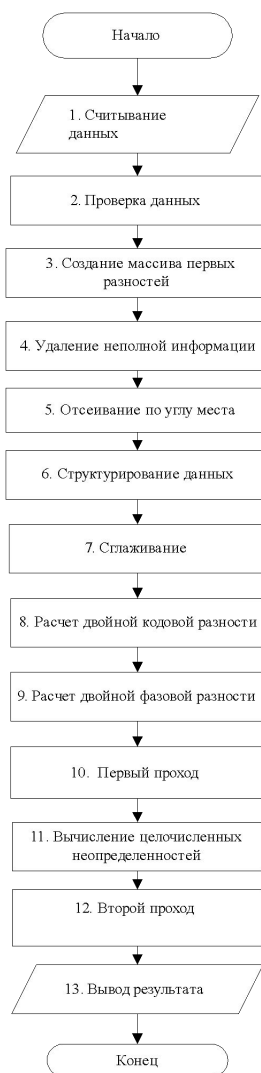
$X_{s_i}$  – координаты спутника в  $i$ -ую эпоху

$X_r$  – координаты базового приемника;

$m$  – количество эпох;

$n$  – количество спутников.

# Алгоритмическое обеспечение ЛСДК



# Программное обеспечение ЛСДК

Trisponder v 1.0 - Программа высокоточного определения расстояний (Базовая станция)

Файл

GPS устройство | Сырые данные | Эфемериды | Ионосфера | Файлы данных | Вычисления | Результаты | Базовая станция | Положение GPS

Дата 03.08.2008  
Время 7:01:45

SV	QI	SNR	LOCK	Фаза несущей	Псевдодалность	Доплер
23	7	50	0	105176079.0618	20314288.9907	-77.9617
13	7	48	0	108419138.2212	20931267.2311	2125.0439
16	7	40	0	11459020.1505	22114507.0400	2072.0550
25	7					
7	7					
6	7					
3	7					
20	7					
27	7					
31	7					
19	7					
4						

Trisponder v 1.0 - Программа высокоточного определения расстояний (Базовая станция)

Файл

GPS устройство | Сырые данные | Эфемериды | Ионосфера | Файлы данных | Вычисления | Результаты | Базовая станция | Положение GPS

№ спутника	Crs	dn
18		
19	1.690625E+001	1.412786E
20	-4.618750E+001	1.597869E
21		
22		
23	9.531250E+001	1.306717E
24		
25	5.853125E+001	1.482704E
26		
27	5.368750E+001	1.440412E
28		
4		

Trisponder v 1.0 - Программа высокоточного определения расстояний

№ точки	Широта	Долгота	Высота
1	43° 15' 18,3484"	76° 51' 24,0780"	772,41 м
2	43° 15' 17,6691"	76° 51' 23,9894"	682,33 м
3	43° 15' 17,9300"	76° 51' 24,0824"	705,37 м
4	43° 15' 17,2717"	76° 51' 23,7544"	608,65 м

Инициализация

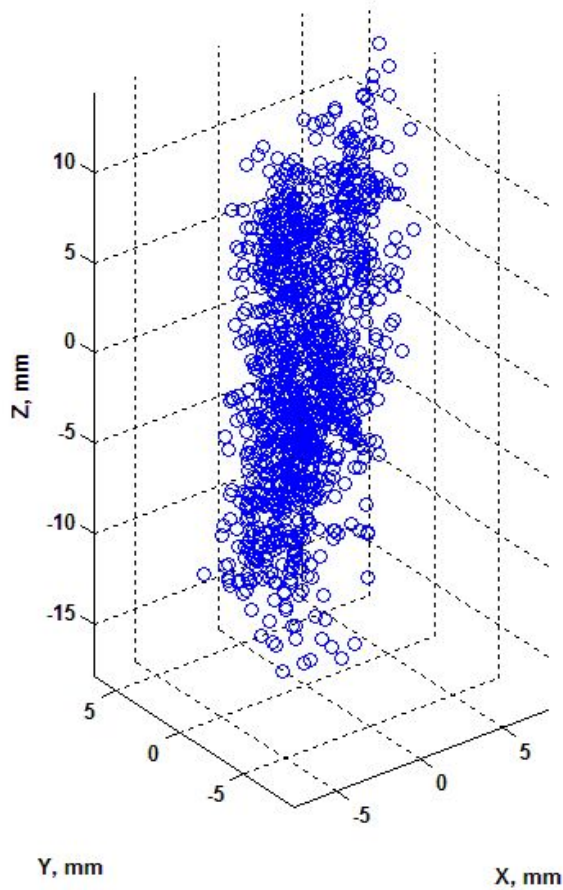
Фиксировать точку

Завершить съемку

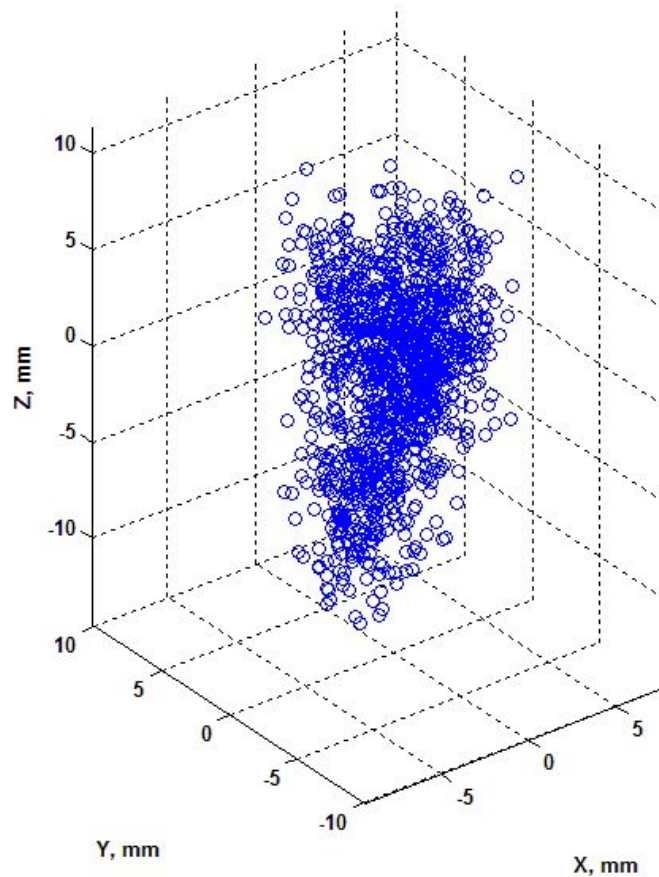
Отмена

№ сигнала - 105 | X - 43° 15' 18,1649" | Y - 76° 51' 24,0791" | Z - 723,77 м

## Результаты тестирования ЛСДК



Экспериментальный образец приема и обработки радиосигналов ГНСС в качестве мобильной станции ЛСДК



Экспериментальный образец приема и обработки радиосигналов ГНСС в качестве базовой станции ЛСДК





# Внедрение экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС



УТВЕРЖДАЮ

Директор ТОО «Точприбор»

Иманов Т.С.

«02» августа 2017 г.

АКТ

о внедрении экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС

Мы, нижеподписавшиеся представитель ДТОО «Институт космической техники и технологий»: заведующий лабораторией спутниковых навигационных технологий Богуслаев Н.Б. и представитель ТОО «Точприбор» Шишова В.В., составили настоящий акт, что ТОО «Точприбор» принял к внедрению экспериментальный образец модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС, позволяющий решать следующие задачи:

- определять координаты приемной антенны модуля в режимах реального времени и постобработке;
- производить конфигурирование параметров цифровой обработки сигналов ГНСС на программном и пользовательском уровнях.

Экспериментальный образец модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС имеет следующие характеристики:

- точность позиционирования в реальном режиме времени (СКО) 4 м;
- масса экспериментально образца вместе с антенной 140 г;
- максимальная потребляемая мощность модуля 10 Вт (5 В, 2 А).

Внедрение экспериментального образца модуля приема и обработки радиосигналов ГНСС за счет отечественной разработки программного обеспечения модуля позволяет снять ограничения CoCom на высоту и скорость позиционируемого объекта.

Заведующий лабораторией  
спутниковых навигационных  
технологий

Бухгалтер




Богуслаев Н.Б.

Шишова В.В.

## Публикаций по теме проекта за 1, 2, 3 и 4 кварталы 2017 года

*Опубликованы:*

1. Myrzaliev A.T., Raskaliyev A.S., Akhmedov D.Sh., Averyanov A. A. Application of SDR-technologies as GPS receiver correlator software // 6-я Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее» к 60-летию запуска первого искусственного спутника Земли и 80-летию со дня рождения Конюхова С.Н., г. Днепропетровск, Украина, 23-26 мая 2017 г. – С. 48-49.
2. Раскалиев А.С., Мурзалиев А.Т., Богуспаев Н.Б. Разработка макетного образца коррелятора приемника ГНСС на базе технологии SDR // Международная конференция "Цифровые технологии в науке и индустрии - 2017" (DTS&I-2017), Алматы, 19-20 мая 2017 г. - С. 21-25.
3. Раскалиев А.С., Мурзалиев А.Т., Богуспаев Н.Б. Опытные испытания программного обеспечения коррелятора приемника GPS на базе технологии SDR // Вестник КазННТУ имени К.И. Сатпаева. – Алматы, 2017. – №5 (123). – С. 125-131.

*Представлен доклад на семинаре в рамках международного форума «Казахстанский путь в космос: реалии и перспективы – 2017»:*

4. Раскалиев А.С., Мурзалиев А.Т., Богуспаев Н.Б. Разработка экспериментального образца модуля обработки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Международный семинар «5-ые Фесенковские чтения «Космическая наука в Казахстане: состояние и перспективы».— Астана, 19-20 октября 2017 г. - 1 стр.



**Спасибо за внимание!**