САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

Институт ракетно-космической техники

Межвузовская кафедра космических исследований

Выпускная квалификационная работа на тему:

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ОТРАЖЕННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В НАВИГАЦИОННОМ ПРИЕМНИКЕ НАНОСПУТНИКА SAMSAT-ION

по направлению подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика (бакалавриат)

Студент группы 1415-240301D: Мюррей Даниил Гарриевич

Руководитель: к.т.н., доцент Баринова Е.В.

Самара, 2020

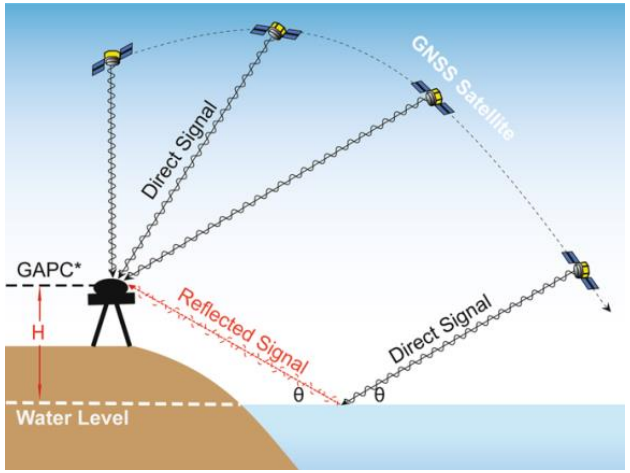
Актуальность работы

Бортовой навигационный приемник (НП) КА используется в задачах навигации, принимая и обрабатывая прямой сигнал с навигационных спутников.

Отраженные от окружающих приемник объектов сигналы в задачах навигации рассматриваются как источник шума. Однако, они могут служить для изучения объектов, которые их отражают.

Использование отраженных навигационных сигналов как инструмента зондирования позволяет расширить функциональность бортового НП.

На сегодняшний день использование отраженных сигналов является одним из наиболее перспективных средств ДЗЗ.



Источник: Peng, D., Hill, E.M., Li, L. *et al.* «*Application of GNSS interferometric reflectometry for detecting storm surges.*» *GPS Solut* 23, 47 (2019).

Постановка цели и задач ВКР

Цель ВКР: Исследование возможности выявления отраженных навигационных сигналов в навигационном приемнике наноспутника SamSat-ION.

Задачи:

1. Анализ литературы и примеров применения отраженных навигационных сигналов;
2. Исследование возможности детектирования навигационных сигналов, отраженных от орбитальных объектов;
3. Исследование возможности детектирования навигационных сигналов, отраженных от поверхности Земли;
4. Разработка модуля детектирования отраженного сигнала на базе КУНС SamSat-ION.

Анализ существующих примеров использования отраженных сигналов

В октябре 2003 года на солнечно-синхронную орбиту высотой **680 км** был выведен спутник UK-DMC, на борту которого находился ГНСС-Р приемник.

Для приема отраженных сигналов использовалась антенна с левой круговой поляризацией.

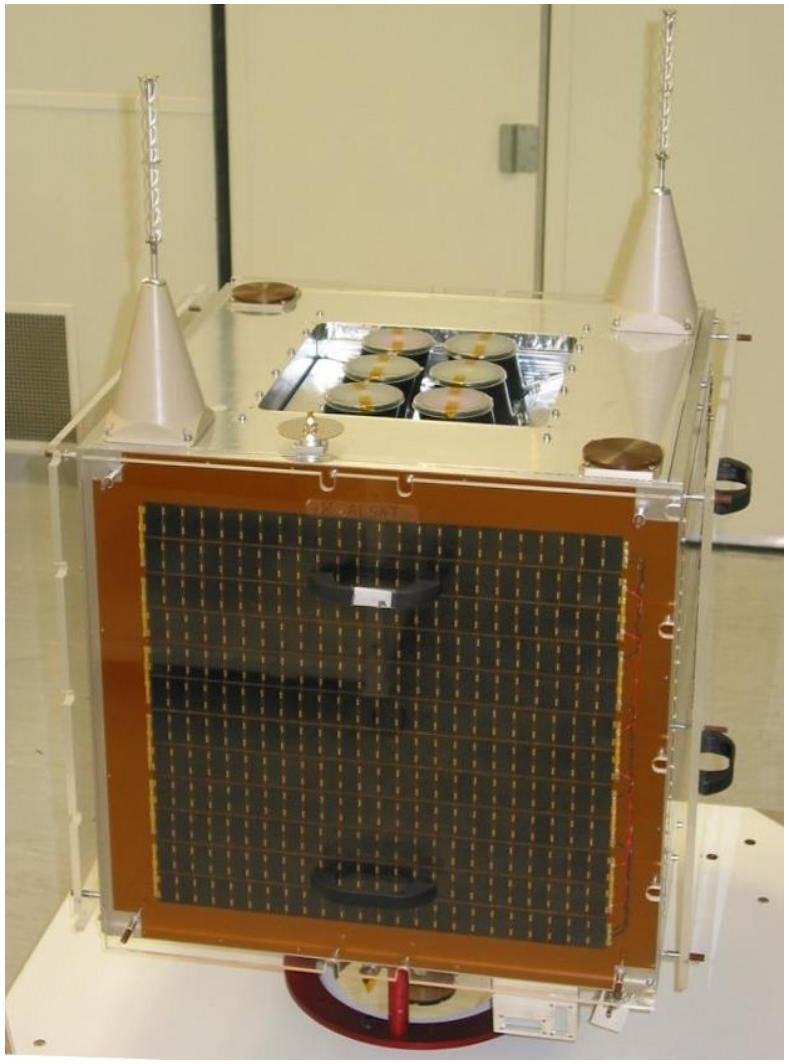
Габариты, см	Масса, кг	Коэффициент усиления антенны, дБи	Мощность шума приемника, дБВт
63 x 63 x 63	88	11,8	-142,2

Наиболее значимым источником при подготовке данной работы была диссертация С. Глисона «*Remote Sensing of Ocean, Ice and Land Surfaces Using Bistatically Scattered GNSS Signals From Low Earth Orbit*» (2006 г).

Модель отражения навигационного сигнала от поверхности океана была впервые предложена В. Заболотным и А. Вороновичем в работе «*Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application*» (2000 г).

При разработке модуля детектирования отраженного сигнала использовались:

- книга К. Борре, Д. Эйкоса, Н. Бертелсена и др. «*A Software-Defined GPS and Galileo Receiver*»
- статья С. Глисона «*A Real-Time On-Orbit Signal Tracking Algorithm for GNSS Surface Observations*».



КА «UK-DMC»

Отражение навигационных сигналов от земной поверхности (1)

Зона рассеивания – площадь, которая отражает навигационный сигнал. Каждой точке зоны рассеивания соответствует задержка и расстояния до приемника и передатчика.

Точка зеркального отражения S – центр зоны рассеивания, определяется наименьшей задержкой отраженного сигнала τ_0

Для определения возможности приема отраженных сигналов необходимо определить отношение сигнал/шум обработанного сигнала:

$$SNR = \frac{Y_S}{Y_N}$$

Мощность отраженного сигнала после обработки определяется по формуле:

$$Y_S(\hat{\tau}, \hat{f}) = \frac{2P_T T_I^2 \lambda^2 \hat{\sigma}^0}{3\cdot(4\pi)^3} G_T G_R \iint_{A_0} \frac{1}{R_R^2 R_T^2} \Lambda^2(\hat{\tau} - \tau) S(\hat{f} - f)^2 dA, \quad (1)$$

P_T, P_N – мощности излучаемого навигационного сигнала и шума,

G_T, G_R – усиления антенн передатчика и приемника,

R_T, R_R – расстояния от точки поверхности до передатчика и приемника,

λ – длина волны сигнала,

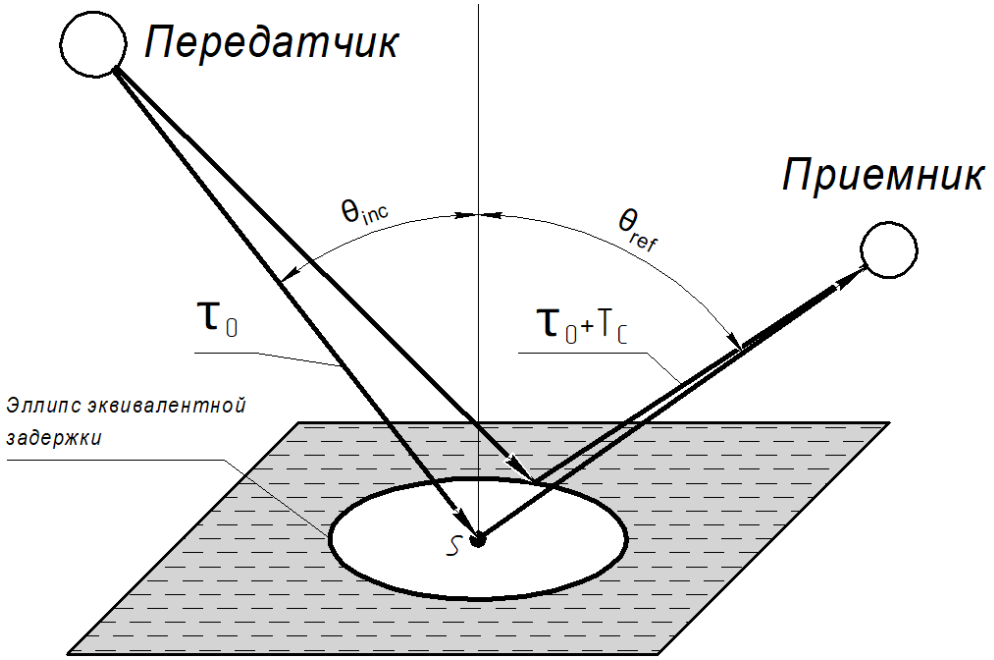
$\hat{\sigma}^0$ – двухпозиционная ЭПР точки поверхности,

A_0 – площадь, ограниченная эллипсом эквивалентной задержки,

T_I – время когерентного интегрирования сигнала при обработке,

Λ – функция корреляции дальномерного кода,

S – ослабление из-за сдвига частоты Доплера.



$T_C \approx 1$ мкс ~ *293 м*

Отражение навигационных сигналов от земной поверхности (2)

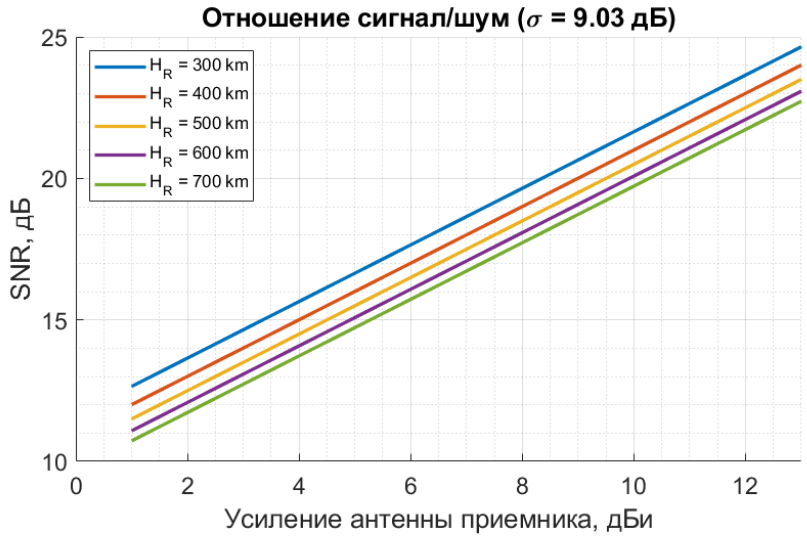
Значения *эффективной площади рассеивания* (ЭПР) для отражения от поверхности океана экспериментально определены по данным миссии UK-DMC. Для оценки отраженного сигнала возьмем минимальное и максимальное значения ЭПР:

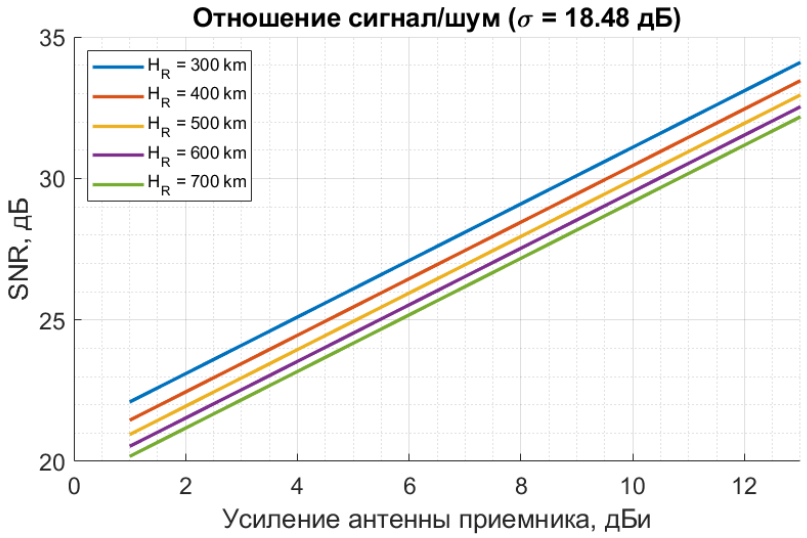
$\hat{\sigma}^0_{\min} = \mathbf{9,03}$ дБ – ЭПР поверхности океана при умеренном ветре,
$\hat{\sigma}^0_{\max} = \mathbf{18,48}$ дБ. – ЭПР поверхности спокойного океана.

Отношение сигнал/шум (SNR) определяется формулой:

$$SNR = \frac{Y_S}{Y_N} = \frac{2P_T\lambda^2\hat{\sigma}^0}{3P_N\cdot(4\pi)^3}\cdot G_T G_R G_{pr}\cdot\iint_{A_0}\frac{1}{R_R^2 R_T^2}S^2 dA \quad (2)$$

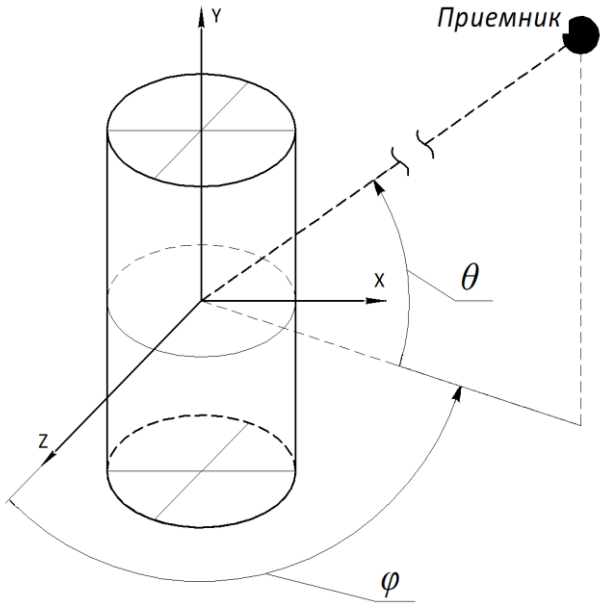
Полученные значения отношения сигнал/шум:

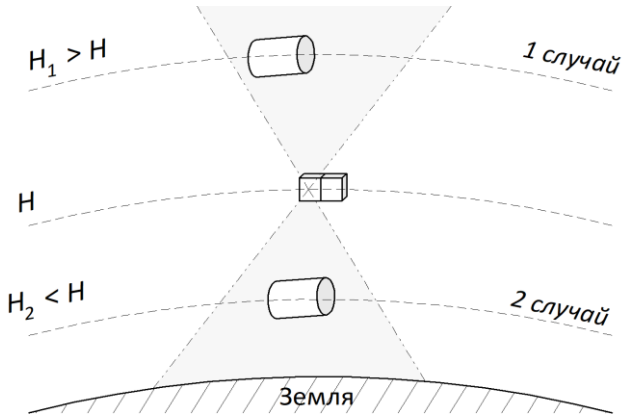




Параметр	Значение
Полоса частот приемника	2,4 МГц
Коэф. шума приемника	1,4 дБ
Шум	–171,8 дБВт
Время интегрирования	4 мс

Отражение навигационных сигналов от орбитальных объектов (1)





Для определения возможности приема отраженных сигналов от орбитальных объектов рассмотрим отражение навигационного сигнала от орбитальной ступени «Космос-3М»: цилиндра радиусом **1,2** м и высотой **6,5** м.

В системе координат, связанной с цилиндром, сигнал падает противоположно оси Z.

Направление на приемник задается углами **θ** и **φ**.

Мощность вычисляется с помощью основного уравнения радиолокации:

$$P_S = \frac{P_T G_T \lambda^2 \sigma G_R}{(4\pi)^3 R_R^2 R_T^2} \quad (3)$$

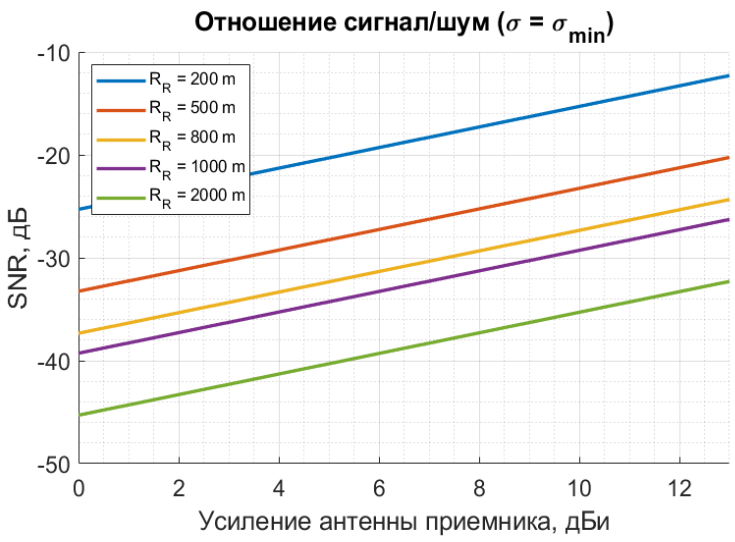
Двухпозиционная ЭПР моделируется в CST Studio Suite 2020 и усредняется по нескольким положениям. Минимальная, средняя и максимальная ЭПР:

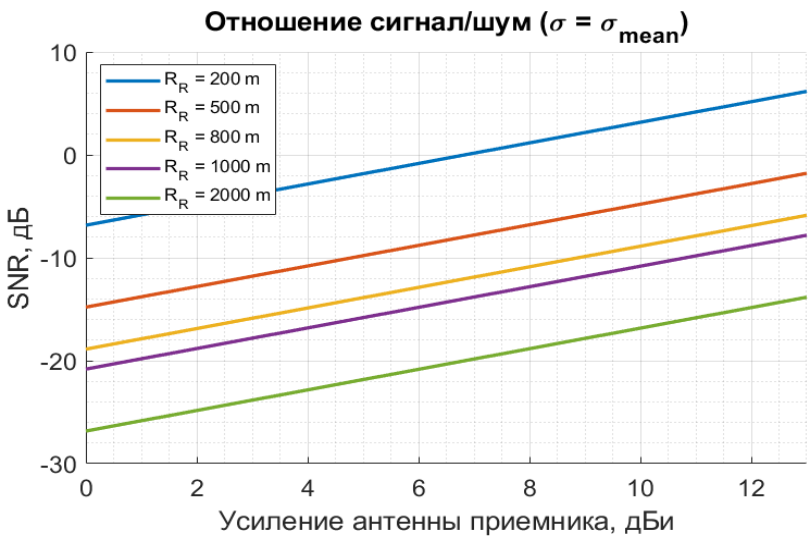
σ_{min}, дБ	σ_{mean}, дБ	σ_{max}, дБ
-10,1	8,36	28,6

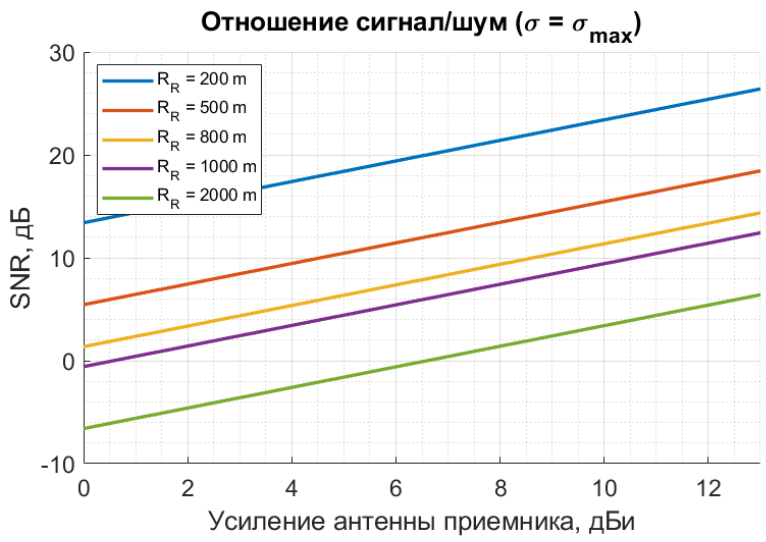
Мощность шума P_N:

$-\mathbf{185,6}$ дБВт – для антенны, направленной **от** Земли;
$-\mathbf{171,8}$ дБВт – для антенны, направленной **к** Земле.

Отражение навигационных сигналов от орбитальных объектов (2)







Параметр	Значение
Полоса частот приемника	2,4 МГц
Коэффициент шума приемника	1,4 дБ
Шум	–171,8 дБВт
Время интегрирования	4 мс

Модуль детектирования отраженного навигационного сигнала (1)

Для детектирования слабых отраженных сигналов используются рефлектометрические навигационные приемники. В данной работе рассматривается реализация модуля такого приемника на базе модуля слежения за прямым навигационным сигналом.

Модуль слежения за прямым навигационным сигналом (прямой канал) осуществляет демодуляцию и интегрирование входящего сигнала. Демодуляция осуществляется путем умножении сгенерированной реплики несущей и кодовой последовательности на входящий сигнал.

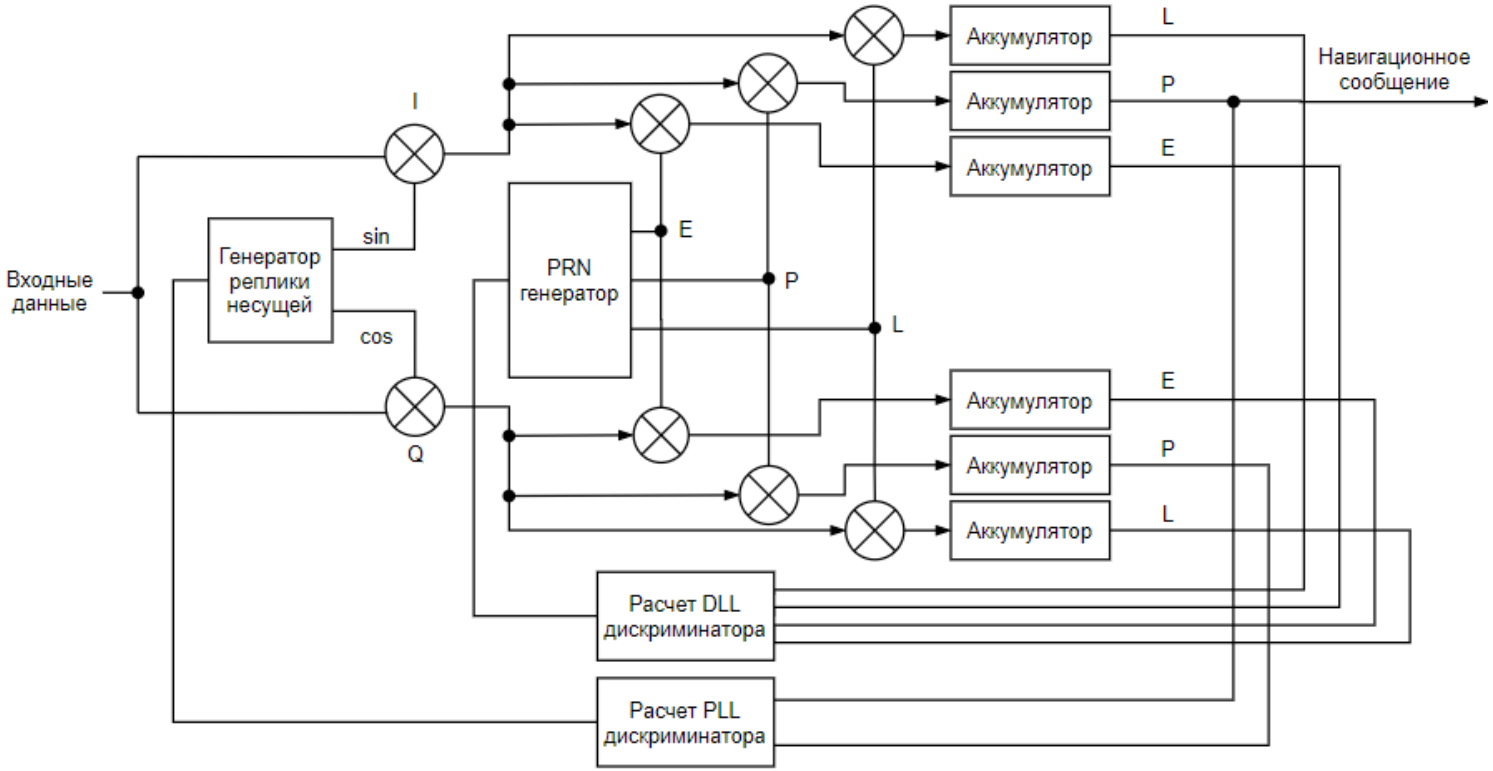


Схема канала слежения за прямым сигналом (основного канала)

Модуль детектирования отраженного навигационного сигнала (2)

Сигнал на входе навигационного приемника можно представить в виде:

$$x_k(t) = x^{dir}(t) + \sum_{i=1}^{N} x_i^{ref}(t) + N(t),$$

$$x^{dir}(t) = A_0(t)D(t)C(t)\cos(2\pi f_{L1}t),$$

$$x_i^{ref}(t) = A_i(t)D\left(t - \boldsymbol{\tau_i^{ref}}\right)C\left(t - \boldsymbol{\tau_i^{ref}}\right)\cos(2\pi(f_{L1} + \boldsymbol{f_{Di}})t + \boldsymbol{\varphi_i}).$$

τ_i^{ref} — задержка фазы кодовой последовательности,

f_{Di} – частота Доплера, соответствующая i-му отражателю,

φ_i – сдвиг фазы несущей i-го сигнала.

Отраженный сигнал представляет из себя задержанную и ослабленную реплику прямого навигационного сигнала. Следовательно, интегрирование отраженного сигнала производится путем умножения входных данных на задержанные значения генераторов основного канала.

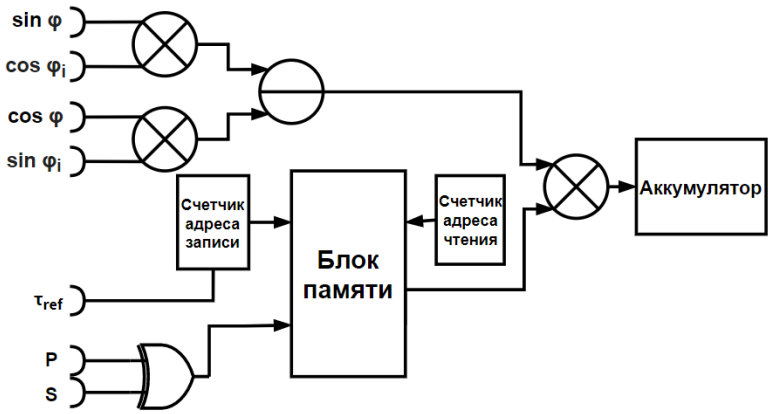
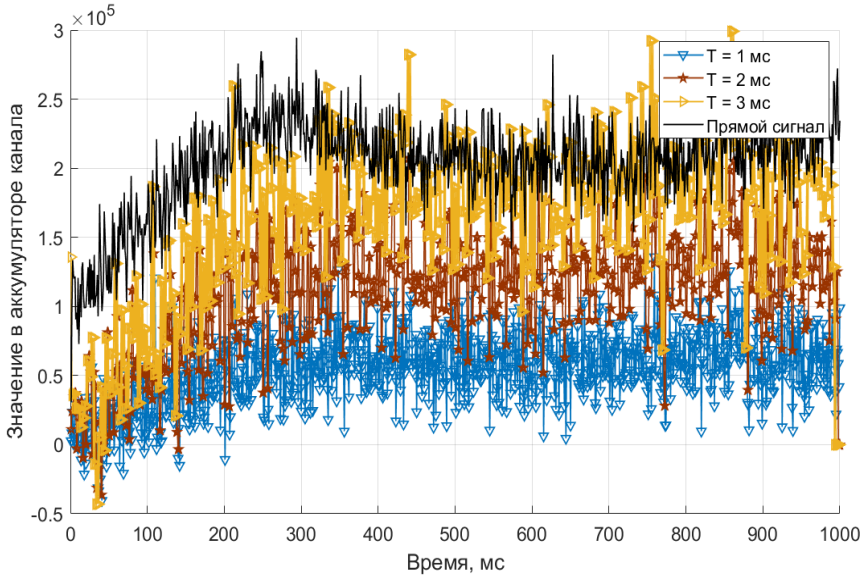


Схема субканала



Параметр моделирования	Значение
Коэффициент ослабления	0,3
С/Ш входного сигнала	-20 дБ
Задержка	3,4 чипа

Модуль детектирования отраженного навигационного сигнала (3)

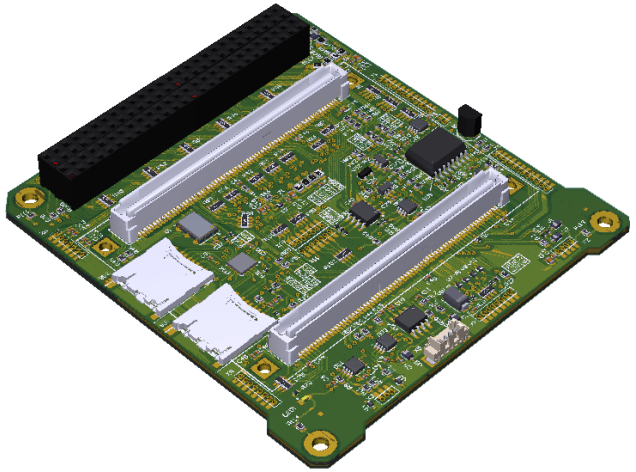
Была проведена реализация модуля детектирования отраженного сигнала рефлектометрического навигационного приемника.

Используемые ресурсы для блока программируемой логики системы на кристалле Xilinx Zynq-7000:

Тип элемента	Для основного канала	Для субканала
Таблицы перекодировки общего назначения (ТП)	2906 (5,46%)	2088 (3,92%)
ТП логических элементов	2867 (5,39%)	2088 (3,92%)
ТП модулей памяти	39 (0,22%)	0 (0,0%)
Логические ячейки	1919 (1,80%)	610 (0,57%)
D-триггеры	1918 (1,80%)	610 (0,57%)
Регистры-защелки	1 (< 0,1%)	0 (0,0%)
Ячейки ЦОС	2 (0,91%)	2 (0,91%)

Digilent Zedboard

MYC-C7Z015 CPU Module



Плата установки MYC-C7Z015
КУНС SamSat-ION

Заключение

В результате работы была показана потенциальная возможность детектирования отраженных от земной поверхности и орбитальных объектов сигналов и использование бортового навигационного приемника в научных задачах .

В результате расчета отношения сигнал/шум было показано, что значение С/Ш отраженных от поверхности Земли сигналов при минимальной ЭПР имеет более высокие значения по сравнению с сигналами, отраженными от орбитальных объектов, однако может серьезно уменьшаться с увеличением скорости ветра в нижних слоях атмосферы. Рекомендуется исследование дополнительных средств повышения мощности входного сигнала и фильтрации шума.

Также было показано, что высота орбиты приемника слабо влияет на значение отношения сигнал/шум отраженного от Земли сигнала: уменьшение орбиты на 100 км дает около 1 дБ приращения С/Ш.

На обнаружение отраженных от орбитальных объектов сигналов существенно влияет их положение относительно приемника и ориентация относительно направления подсвечивающего сигнала. Детектирование таких сигналов может быть затруднено при некоторых положениях объекта, что показано при расчете С/Ш при минимальной определенной ЭПР.

В результате работы была разработана реализация модуля детектирования отраженных сигналов рефлектометрического навигационного приемника, проведена валидация используемого алгоритма детектирования. По отчетам об объеме занимаемых ресурсов ПЛИС было показано, что основной канал и субканал близки по ресурсоемкости. Соответственно, на рассматриваемом устройстве в общей сложности возможно реализовать 18 каналов слежения за прямыми или отраженными сигналами.

САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ