

Практическое занятие по дисциплине «Технология обработки и передачи данных»

Дата: 11.04.2020

Цель занятия. Программная реализация процедуры обнаружения сигнала от спутника системы глобального позиционирования GPS.

Задание. На основе анализа принятого сигнала сформировать список обнаруженных спутников. Для каждого спутника произвести грубую оценку частоты доплеровского сдвига и фазы псевдослучайной последовательности.

Подготовка к выполнению работы. Изучить принципы работы систем спутникового позиционирования, структуру сигналов системы GPS, методы обнаружения сигналов.

Техническое оснащение: работа выполняется на языке программирования Python в среде Google Collaboration (<https://colab.research.google.com/>), требуется аккаунт в сервисах Google.

Постоянная ссылка на описание работы: http://rf-lab.org/courses_content/b1_v_dv_6_1

Библиографический список.

1. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. –М.:Горячая линия-Телеком, 2005. -272с.-ил.
2. Пестряков В.Б. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. - Москва, "Советское Радио", 1973.
3. Никифоров А.А. Создание лабораторного стенда для приема сигналов спутниковых систем навигации. ВЕСТНИК Молодых ученых Московского государственного университета приборостроения и информатики, Выпуск №9. Москва, 2011. – сс 55-66. ISBN 978-5-8068-0484-7. [Ссылка на электронный ресурс.](#)
4. Tsui J. B. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach / James Bao-yen Tsui. – 2nd ed. ISBN 0-471-70647-7. 2005.
5. Sattelite Position and WAAS Status. [Ссылка на электронный ресурс.](#)

Контрольные вопросы.

1. Опишите основные принципы технологии кодового разделения доступа.
2. Дайте определение расширяющей последовательности.
3. Укажите основные свойства расширяющих последовательностей.

4. В чем отличие последовательного и параллельного алгоритмов обнаружения сигнала?
5. Нарисуйте укрупненную схему формирования сигнала с расширенным спектром.

Список сокращений и условных обозначений.

АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь.
БПФ	Быстрое преобразование Фурье.
МШУ	Маломощный усилитель.
ОЗУ	Оперативное запоминающее устройство.
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема.
ПСП	Псевдослучайная последовательность.
ПФ	Полосовой фильтр.
ФНЧ	Фильтр нижних частот.
C/A code	Coarse Acquisition Code. (Расширяющая ПСП для грубой оценки псевдодальности/для обнаружения сигнала).
GPS	Global Positioning System.
LR	Likelihood Ratio. Отношение правдоподобия.
LLR	Log Likelihood Ratio. Логарифмическое отношение правдоподобия.
RS-232	Стандарт физического уровня для асинхронного обмена.
WAAS	Wide Area Augmentation System. (Система распространения поправок).



Приемная антенна.



Смеситель.



Сложение по модулю два.



Генератор синусоидального сигнала.



Генератор прямоугольных импульсов.



Фазовращатель на 90 градусов.



Аналоговый фильтр.

Теоретическое введение.

Система спутникового позиционирования представляет собой

однонаправленную систему распространения сигналов от спутниковой группировки, находящейся на орбите земли, к абонентам, находящимся на поверхности земли. Определение координат абонента происходит на основе оценки задержек распространения сигнала от нескольких спутников до абонента. Каждый спутник передает уникальную псевдослучайную цифровую последовательность (ПСП), на основе которой приемник может оценить разности расстояний до нескольких спутников. Используя дополнительную информацию от спутника (альманах и эфемириды) приемник может определить точное расположение спутников в момент измерения и, решив нелинейную систему алгебраических уравнений, найти свои координаты. Прием сигнала осуществляется на основе специализированного устройства [3] с функцией сохранения оцифрованного сигнала на промежуточной частоте. Структурная схема приемника изображена на Рис.1.

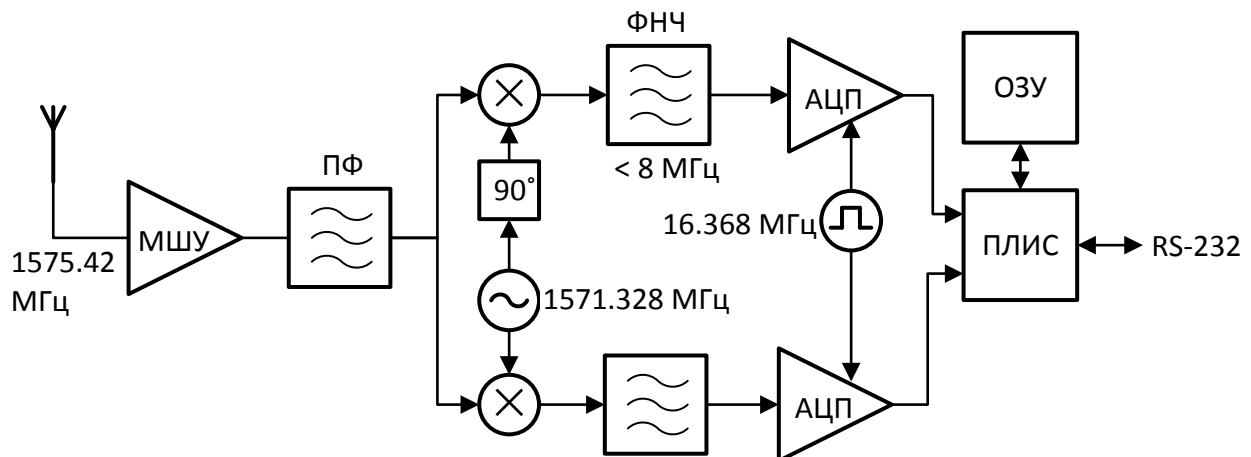


Рис. 1. Структурная схема приемного оборудования для получения оцифрованного сигнала GPS [3].

Сигнал спутника на частоте 1575.42 МГц поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ) и далее через полосовой фильтр (ПФ) на модуль смесителя. После смесителя выделяются две квадратурные компоненты на промежуточной частоте 4.092 МГц. Эти сигналы поступают на двухбитовые аналого-цифровые преобразователи с частотой дискретизации 16.368 МГц. Микропрограммное обеспечение ПЛИС осуществляет заполнение памяти захваченным сигналом и дальнейшую передачу этой информации по порту RS-232 на компьютер. Сигнал сохраняется в текстовом файле следующего вида.

Mon Jan 25 14:22:29 2010
#

```
# the default cfg
# 0 0xa2939a3
# 9 0x14c0402
#
# 00000000b 0x0a2939a3
# 00001000b 0x01e0f401
#
# Mode: 2bit, sign/magnitude
# format [q2 i2 q1 i1]
# i q
-6 -2
-2 6
2 2
2 -2
-2 6
-2 2
2 2
2 -2
```

Строка с символом # означает комментарий. Остальные строки содержат значения синфазной и квадратурной составляющей отсчета сигнала.

Процедура считывания этого файла должна пропустить все строки, начинающиеся с символа #, и сформировать комплекснозначный массив отсчетов сигнала, где элементы первого столбца определяют действительную часть, а элементы второго столбца комплексную часть. Математическая модель сигнала на входе АЦП:

$$s(t + \Delta_t) = d([f_d(t + \Delta_t)]) \cdot c([f_c(t + \Delta_t)]) \cdot e^{j2\pi(f_0 + \Delta_f)(t + \Delta_t)} + \delta \quad (1)$$

$d(m)$	Последовательность ± 1 бит информационного сообщения.
$c(k)$	Последовательность ± 1 значений расширяющего С/А кода.
f_d	50 Гц. Скорость передачи символов (битов) информационного сообщения.
f_c	1.023Е6 Гц. Скорость передачи отсчетов расширяющего С/А кода.
f_0	4.092Е6 Гц. Промежуточная частота, выделяемая после смесителя.
Δ_f	Неизвестное значение доплеровского смещения.
Δ_t	Неизвестная задержка распространения сигнала.
t	Время на передатчике.
$t + \Delta_t$	Время на приемнике.
$[]$	Операция взятия целой части (отбрасывание дробной части).
δ	Белый гауссов шум.

Цифровой сигнал после АЦП:

$$x_{\text{ADC}}(n) = s\left(\frac{n}{f_s} + \Delta_t\right) = d\left(\left[\left[f_d\left(\frac{n}{f_s} + \Delta_t\right)\right]\right]\right) \cdot c\left(\left[\left[f_c\left(\frac{n}{f_s} + \Delta_t\right)\right]\right]\right) \cdot e^{j2\pi(f_0 + \Delta_f)\left(\frac{n}{f_s} + \Delta_t\right)} + \sigma_\varepsilon \varepsilon(n) \quad (2)$$

n Номер отсчета принятого сигнала.

f_s 16.368E6 Гц. Скорость дискретизации АЦП.

$\varepsilon(n)$ Белый гауссов шум с нулевым средним и единичной дисперсией.

σ_ε Среднеквадратическое отклонение шума на выходе АЦП.

Для обнаружения сигнала GPS выбирают участок сигнала равный по длительности периоду C/A кода (1мс, 1023 значения). При этом с высокой вероятностью этот участок не будет содержать перехода от одного бита к другому и множитель $d(m)$ можно не учитывать. Участок полезного сигнала на интервале 1мс:

$$x(n) = c\left(\left[\left[f_c \frac{n + \Delta}{f_s}\right]\right]\right) \cdot e^{j2\pi(f_0 + \Delta_f)\left(\frac{n + \Delta}{f_s}\right)} \quad (3)$$

Δ Неизвестная задержка, измеряемая в отсчетах сигнала.

Последовательность $c(k)$ формируется с помощью схемы на основе двух сдвиговых регистров:

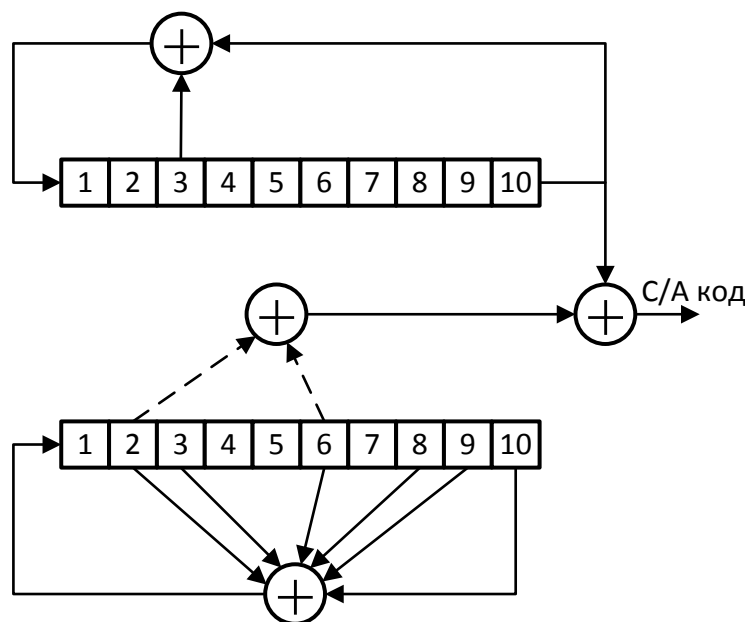


Рис. 2. Схема формирования C/A кода [4].

При инициализации оба регистра заполняются единицами. Направление сдвига – слева направо. Полученные значения битов преобразуются в значения кода: 1 в +1, 0 в -1 (можно использовать преобразование $2 \cdot b - 1$). Достаточно получить лишь первые 1023 значения кода. Номера верхних

отводов, указанные на Рис. 2 пунктиром, определяются для каждого спутника индивидуально по Таблица 1.

Таблица 1. Номера отводов сдвигового регистра для формирования С/А кода спутника [4].

Номер спутника	Номер ПСП	Номера отводов регистра	Задержка кода, отсчеты.	Первые десять бит в восьмеричном коде
1	1	$2 \oplus 6$	5	1440
2	2	$3 \oplus 7$	6	1620
3	3	$4 \oplus 8$	7	1710
4	4	$5 \oplus 9$	8	1744
5	5	$1 \oplus 9$	17	1133
6	6	$2 \oplus 10$	18	1455
7	7	$1 \oplus 8$	139	1131
8	8	$2 \oplus 9$	140	1454
9	9	$3 \oplus 10$	141	1626
10	10	$2 \oplus 3$	251	1504
11	11	$3 \oplus 4$	252	1642
12	12	$5 \oplus 6$	254	1750
13	13	$6 \oplus 7$	255	1764
14	14	$7 \oplus 8$	256	1772
15	15	$8 \oplus 9$	257	1775
16	16	$9 \oplus 10$	258	1776
17	17	$1 \oplus 4$	469	1156
18	18	$2 \oplus 5$	470	1467
19	19	$3 \oplus 6$	471	1633
20	20	$4 \oplus 7$	472	1715
21	21	$5 \oplus 8$	473	1746
22	22	$6 \oplus 9$	474	1763
23	23	$1 \oplus 3$	509	1063
24	24	$4 \oplus 6$	512	1706
25	25	$5 \oplus 7$	513	1743
26	26	$6 \oplus 8$	514	1761
27	27	$7 \oplus 9$	515	1770
28	28	$8 \oplus 10$	516	1774
29	29	$1 \oplus 6$	859	1127
30	30	$2 \oplus 7$	860	1453

31	31	$3 \oplus 8$	861	1625
32	32	$4 \oplus 9$	862	1712
**	33	$5 \oplus 10$	863	1745
**	34*	$4 \oplus 10$	950	1713
**	35	$1 \oplus 7$	947	1134
**	36	$2 \oplus 8$	948	1456
**	37*	$4 \oplus 10$	950	1713

Обнаружение полезного сигнала $x(n)$ на фоне белого гауссова шума производится с помощью метода максимального правдоподобия [2]. Для этого вычисляется отношение плотности распределения принятого вектора при условии, что он содержит сумму полезного сигнала и шума к плотности распределения того же вектора в предположении что он содержит лишь белый гауссов шум. Если значение этого отношения превышает некоторое пороговое значение, то принимается решение о наличии сигнала. В противном случае считается, что полезного сигнала в принятом векторе нет. Плотность распределения принятого вектора при условии, что он содержит смесь полезного сигнала и белого гауссова шума [2]:

$$p_x(\mathbf{y}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\varepsilon^2)^{\frac{N}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma_\varepsilon^2}(\mathbf{y}-a\mathbf{x})^T(\mathbf{y}-a\mathbf{x})} \quad (4)$$

Здесь

- \mathbf{y} Принятый вектор-столбец длины N отсчетов.
- \mathbf{x} Вектор-столбец полезного сигнала.
- a Неизвестная амплитуда полезного сигнала.
- \mathbf{x}^T Транспонирование вектора \mathbf{x} .

Плотность распределения принятого вектора при условии, что он содержит лишь белый гауссов шум:

$$p_\varepsilon(\mathbf{y}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\varepsilon^2)^{\frac{N}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma_\varepsilon^2}\mathbf{y}^T\mathbf{y}} \quad (5)$$

Здесь предполагается, что векторы \mathbf{x} и \mathbf{y} содержат действительные значения. В случае комплексных векторов и в предположении независимости действительной и мнимой частей выражения (4) и (5) следует заменить на их аналоги:

$$p_x^*(\mathbf{y}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_\varepsilon^2)^{\frac{N}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma_\varepsilon^2}\text{Re}[(\mathbf{y}-a\mathbf{x})^H(\mathbf{y}-a\mathbf{x})]} \quad (6)$$

$$p_{\varepsilon}^*(\mathbf{y}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_{\varepsilon}^2)^{\frac{N}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma_{\varepsilon}^2} \text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{y}]} \quad (7)$$

Здесь

$\text{Re}[\]$ Взятие действительной части комплексного числа.

\mathbf{x}^H Гильбертово сопряжение вектора \mathbf{x} (транспонирование и комплексное сопряжение).

Отношение правдоподобия:

$$\text{LR}(\mathbf{y}) = \frac{p_{\mathbf{x}}^*(\mathbf{y})}{p_{\varepsilon}^*(\mathbf{y})} = e^{-\frac{1}{2\sigma_{\varepsilon}^2} \text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{y} - (\mathbf{y} - a\mathbf{x})^H (\mathbf{y} - a\mathbf{x})]} \quad (8)$$

Логарифмическое отношение правдоподобия:

$$\begin{aligned} \text{LLR}(\mathbf{y}) &= \ln(\text{LR}(\mathbf{y})) = -\frac{1}{2\sigma_{\varepsilon}^2} \text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{y} - (\mathbf{y} - a\mathbf{x})^H (\mathbf{y} - a\mathbf{x})] \\ &= \frac{1}{2\sigma_{\varepsilon}^2} (2\text{Re}[\mathbf{y}^H a\mathbf{x}] - a^2 \mathbf{x}^H \mathbf{x}) \end{aligned} \quad (9)$$

Условие, при котором принимается решение о наличии полезного сигнала в принимаемой смеси:

$$\text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{x}] > \frac{a}{2} \mathbf{x}^H \mathbf{x} \quad (10)$$

На практике ввиду отсутствия точной информации об амплитуде полезного сигнала вместо выражения $\frac{a}{2} \mathbf{x}^H \mathbf{x}$ используют фиксированный либо адаптивный порог Π . Для обнаружения сигнала GPS необходимо вычислить выражение $\text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{x}]$ для всех возможных комбинаций задержки Δ и доплеровского смещения Δ_f . При частоте дискретизации $f_s = 16.368 \text{E}6$ участок сигнала равный периоду C/A кода (1мс) занимает 16368 отсчетов. Это означает 16368 возможных вариантов задержки между принятым сигналом \mathbf{y} и полезным сигналом \mathbf{x} . Максимально возможное доплеровское смещение определяется выражением:

$$\Delta_{f\max} = \pm \frac{v_{\max}}{c_0} f_{\text{RF}} \quad (11)$$

Здесь

$\Delta_{f\max}$ Гц. Максимальное доплеровское смещение.

v_{\max} 1000 м/с. Максимальная скорость сближения/удаления между спутником и приемником GPS [4].

c_0 3E8 м/с. Скорость света в вакууме.

f_{RF} 1575.42E6 Гц. Несущая частота на которой излучает сигнал спутник GPS. Формула (11) определяет максимальный доплеровский сдвиг: ± 5251 Гц. Рассматривая оба варианта направления движения и шаг сетки 500 Гц получим примерно 20 различных вариантов доплеровского смещения. Общее количество комбинаций задержек и доплеровского сдвига равно 327360. Для каждой комбинации необходимо вычислить значение $\text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{x}]$ и сравнить его с порогом. Для снижения вычислительных затрат используется алгоритм на основе БПФ. Алгоритм использует следующее тождество:

$$\mathbf{r} = \mathbf{F}^{-1} [\text{diag} (\mathbf{F} \text{conj}(\mathbf{y}))^H \mathbf{F} \mathbf{x}] \quad (12)$$

Здесь

\mathbf{r} Вектор содержащий значения произведений $\mathbf{y}^H \mathbf{x}$ для всех вариантов задержки между принятым сигналом \mathbf{y} и полезным сигналом \mathbf{x} .

$\mathbf{F} \mathbf{x}$ Прямое преобразование Фурье для вектора \mathbf{x} .

$\mathbf{F}^{-1} \mathbf{x}$ Обратное преобразование Фурье для вектора \mathbf{x} .

$\text{diag}(\mathbf{x})$ Формирование диагональной матрицы с элементами вектора \mathbf{x} на главной диагонали.

$\text{conj}(\mathbf{x})$ Комплексное сопряжение элементов вектора \mathbf{x} .

Общая схема алгоритма.

1. Получить текстовый файл с измеренным сигналом.
2. Загрузить 16368 комплексных значений в вектор столбец \mathbf{y} .
3. Цикл по всем спутникам (см. Таблица 1).
 - a. Сформировать массив с отсчетами ПСП спутника используя схему на Рис. 2.
 - b. Цикл по всем значениям доплеровского смещения Δ_f .
 - i. Используя массив ПСП текущего спутника и текущее доплеровское смещение Δ_f сформировать вектор столбец полезного сигнала \mathbf{x} используя выражение (3). При этом задержку Δ в уравнении (3) принять равной нулю.
 - ii. Используя выражение (12) найти вектор \mathbf{r} и сохранить его.
 - c. Выбрать максимальный из всех элементов вектора $\text{Re}[\mathbf{r}]$ среди

всех значений доплеровского смещения (поиск максимума в двумерном массиве).

- d. Сравнить полученное максимальное значение с заранее выбранным порогом.
 - e. Если полученное значение превышает порог, то
 - i. Вывести информацию о найденном спутнике, включая доплеровский сдвиг и индекс в массиве \mathbf{r} соответствующие максимальному найденному $\text{Re}[\mathbf{r}]$.
4. Сравнить полученный список обнаруженных спутников с информацией сервера WAAS [5].

Контрольный пример.

Пример вывода программы:

#PRN: 3, r: 7.88e+07, C/A phase: 5686, Doppler.:4090.0 KHz

#PRN: 19, r: 6.95e+07, C/A phase: 4665, Doppler.:4092.0 KHz

Пример изображения расположения спутников с сервера WAAS на момент получения файла с сигналом:

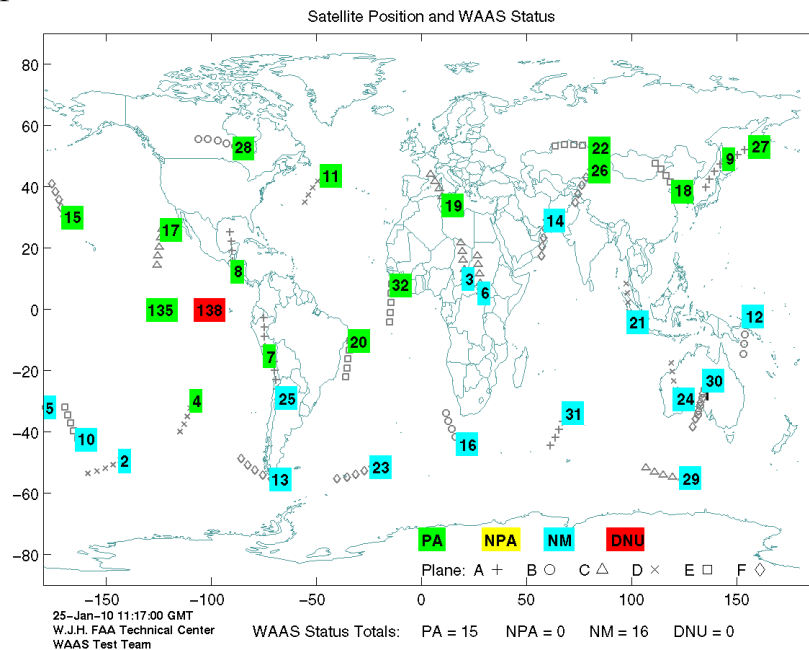


Рис. 3.Изображение с сервера WAAS[5].

Пример визуализации максимальных значений $\text{Re}[\mathbf{y}^H \mathbf{x}]$ для каждого спутника:

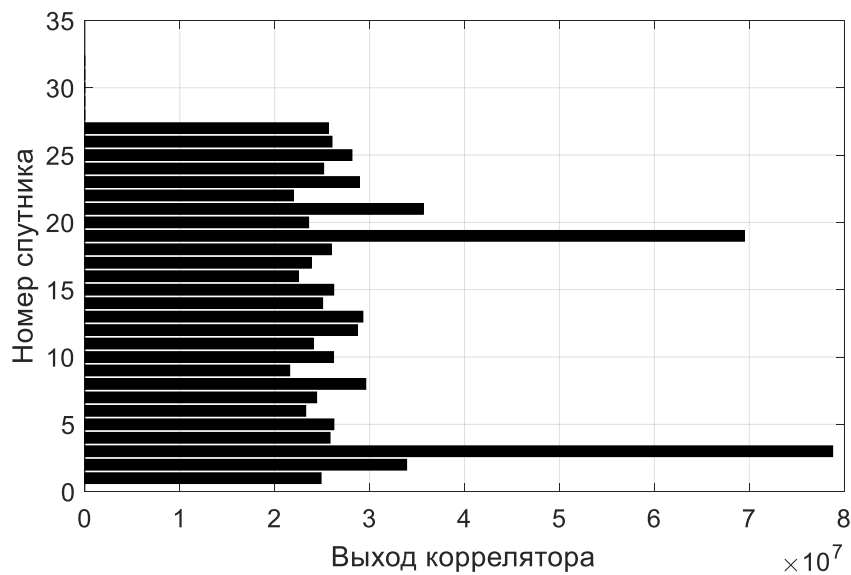


Рис. 4. Максимальные значения $\text{Re}[y^H x]$ для каждого спутника.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель
2. Задание.
3. Описание алгоритма.
4. Текст программной реализации (только алгоритм обнаружения).
5. Изображение расположения спутников с сервера WAAS на момент получения файла с сигналом.
6. Список обнаруженных спутников с параметрами сигнала.
7. Выводы по проделанной работе.