

УДК 621.396

## БЫСТРЫЙ ПОИСК GPS-СИГНАЛА

Гомолко В. А., студент гр.950702

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Вашкевич М.И. – канд. тех. наук,  
доцент

**Аннотация.** В работе рассмотрен модуль быстрого поиска GPS-сигнала с применением когерентного интегрирования в качестве способа снижения ложного срабатывания системы быстрого поиска спутникового сигнала. Представлено описание корреляционных свойств сигнала, структура спутникового сигнала, принцип генерации псевдослучайной последовательности. Приведены графики для начальных значений сигнал/шум с использованием когерентного интегрирования.

**Ключевые слова.** Обнаружение, двоичная фазовая манипуляция, глобальная навигационная спутниковая система, псевдослучайный шум, коды Голда, когерентное интегрирование.

### Введение.

Спутниковая навигация предназначена для определения местоположения объектов, скорости, времени, а также направление движения приемника. При этом современная глобальная навигационная спутниковая система (далее – ГНСС) позволяет определять местоположение в реальном времени.

На 2022 год три спутниковые системы обеспечивают полное покрытие и бесперебойную работу для всего земного шара – GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), BeiDou (Китай). ГНСС не требуют от пользователя передачи каких бы то ни было данных.

Статья рассматривает повышения точности срабатывания модуля быстрого поиска спутникового сигнала посредством увеличения продолжительности когерентного интегрирования. При этом статья описывает принцип генерации спутникового сигнала, его корреляционные свойства и принцип работы блока быстрого поиска спутникового сигнала.

### Типы сигналов GPS.

Грубый/Приобретенный код (англ. *Course/Acquisition code*) – каждый спутник использует свой уникальный код для реализации технологии множественного доступа с кодовым разделением (англ. *code division multiple access*). Коды C/A принадлежат к семейству кодов золотого псевдослучайного шума (англ. *Pseudorandom Noise gold code*). Алгоритм создания золотого псевдослучайного шума (далее – ПСШ) был разработан в 1967 году и используется до сих пор. Длительность кода составляет 1 мс.

Сигнал  $P(Y)$  – зашифрованный сигнал, созданный для вооруженных сил США. Передается на частотах  $L1$  (1575,42 МГц) и  $L2$  (1227,60 МГц). Длительность кода составляет 7 дней.

### Принцип генерации сигнала.

Спутниковый GPS-сигнал формируется по следующему принципу: сигнал с несущей модулируется суммой C/A-кода по модулю 2 вместе с навигационными данными. В зависимости от значения кодовой последовательности изменяется фаза сигнала: передается без изменений по фазе, либо изменяется на  $180^\circ$  – двоичная фазовая манипуляция (англ. *binary phase-shift keying*). Математическая модель описывается следующим образом:

$$s(t) = A_c \cdot C(t) \cdot D(t) \cdot \cos(2\pi \cdot (f_{L1} + f_D) \cdot t) \quad (1)$$

где,

$A_c$ : амплитуда C/A кода

$C(t)$ : C/A код

$D(t)$ : навигационные данные

$f_{L1}$ : частота несущей  $L1$

$f_d$ : Доплеровская частота

Генератор C/A кода представляет собой два полинома  $G_1$  и  $G_2$ , работающих на частоте 1,023 МГц. Упрощенное описание реализации полиномов требует два 10-битный регистра и логические элементы XOR. В процессе реализации полинома  $G_1$  берется первый и третий регистр,

регистры далее суммируются и результат записывается в первый регистр со сдвигом, вместе с тем содержимое десятого регистра отправляется во второй полином. Все спутники имеют свой идентификационный номер  $i$ , влияющий на номера битов, участвующих в манипуляции полинома  $G_{2i}$  и выход полинома  $G_2$  суммируются вместе с выходом полинома  $G_1$ , и результатом является ПСШ для  $i$  спутника. Для GPS спутников существует 37 ПСШ. Уравнения полиномов описываются следующим образом:

$$G_1 = 1 + x^3 + x^{10} \quad (2)$$

$$G_{2i} = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \quad (3)$$

$$\text{ПСШ}_i = G_1 \oplus G_{2i} \quad (4)$$

В результате работы генератора псевдослучайной последовательности был получен следующий двоичный код для спутника под номером 1 (Рисунок 1).

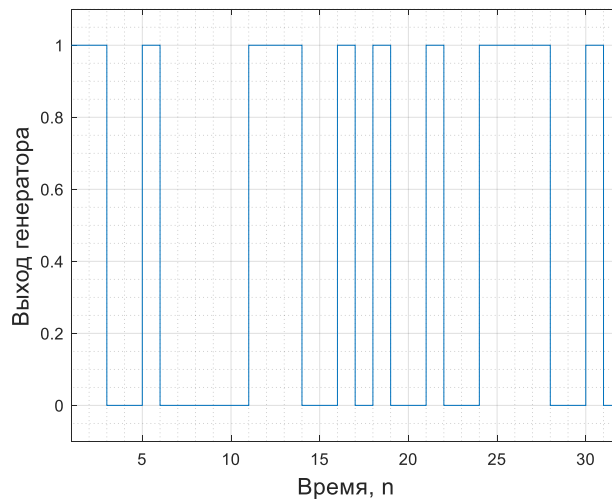


Рисунок 1 – Часть выходной псевдослучайной последовательности генератора для спутника № 1

Коды разработаны таким образом, чтобы иметь низкую взаимную корреляцию, а также низкое значение за пределами пика автокорреляции. Свойство низкой взаимной корреляции особенно важно в системах CDMA, поскольку позволяет приемнику правильно восстановить информацию во входящем сигнале с определенным ПСШ [1]. Автокорреляционная функция  $y_{xx}$  показывает зависимость сигнала и сдвинутой копии. Кросс-корреляция  $y_{xy}$  в свою очередь оценивает уровень корреляции двух разных сигналов. Далее представлены формулы для расчета соответствующих корреляций:

$$y_{xx}(m) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(x(n)-\bar{x}) \cdot (x(n-m)-\bar{x})}{\sigma_x^2}, \quad y_{xy}(m) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(x(n)-\bar{x}) \cdot (y(n-m)-\bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (5)$$

где,  $\bar{x}, \bar{y}$  математическое ожидание сигналов  $x(n)$  и  $y(n)$ ;  $\sigma_x, \sigma_y$  – их СКО.

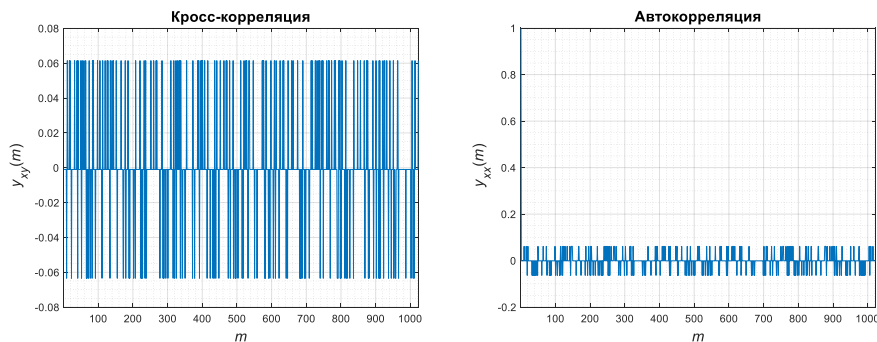


Рисунок 2 – Нормализованная кросс и автокорреляция

Из рисунков видно, что пиковое значение имеет место при нулевом временном сдвиге и наблюдается низкая кросс-корреляция двух спутников.

#### Поиск сигнала.

Для проверки на присутствие полезного сигнала во входных данных используется процесс обнаружения (англ. *acquisition*). Поиск происходит в двумерном пространстве: фазе кода и частоте в диапазоне  $\pm 10$  кГц для покрытия всего ожидаемого доплеровского диапазона [2]. Каждая ячейка пространства поиска показывает значение корреляции по Доплеру и кодовой задержке.

В данной работе используется метод, основанный на круговой свертке в частотной области при помощи БПФ. Метод позволяет сократить количество комбинаций: все возможные значения фазовой задержки определяются при выполнении круговой свертки и остается перебрать комбинации, соответствующие смещению по Доплеру, что с учетом используемого шага в 250 Гц составит

81 вариант, благодаря чему получается значительно быстрее получить результат и именно поэтому поиск называется быстрым. Операция круговой свертки описывается выражением:

$$s_1(m) * s_2(m) \stackrel{\text{БПФ}}{\longleftrightarrow} S_1(k) \cdot S_2(k) \quad (6)$$

Полное математическое описание процесса поиска между полученным сигналом  $s(n)$  и локально-сгенерированным  $s_{\text{ЛС}}(n)$  представлено далее [3]:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} s(m) \cdot s_{\text{ЛС}}(m-n) \quad (7)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \cdot W_N^{n \cdot k} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} s(m) \cdot s_{\text{ЛС}}(m-n) \cdot W_N^{n \cdot k} \quad (8)$$

где,  $W_N = e^{\frac{-j \cdot 2 \cdot \pi}{N}}$

$$Y(k) = \sum_{m=0}^{N-1} s(n) \cdot W_N^{n \cdot k} \sum_{n=0}^{N-1} s_{\text{ЛС}}(m-n) W_N^{-(m-n) \cdot k} = S(k) \cdot S_{\text{ЛС}}^*(k) \quad (9)$$

где,  $S_{\text{ЛС}}^*(k)$  – комплексное сопряжение сигнала  $S_{\text{ЛС}}(k)$ .

$$y(n) = S(k) \cdot S_{\text{ЛС}}^*(k) \quad (10)$$

$$P = |y(n)|^2 \quad (11)$$

После завершения процесса обнаружения необходимо выяснить, присутствует ли спутник. Определяется присутствие при превышении порогового значения. Если  $P$  превышает порог, то далее информация о наличии полезного сигнала передается в блок слежения, параллельно которому происходит декодирование навигационных данных и определение местоположения приемника.

#### Когерентное интегрирование.

Стандартные значения сигнал/шум в приемнике от -26 дБ до -18 дБ при ширине полосы пропускания в 2 МГц [4]. Предположим, синтезирован сигнал с доплеровским смещением – 2,1 кГц, смещением по коду – 500 символов, отношением сигнал/шум – -26 дБ. В следствие работы блока поиска с заданными параметрами получен следующий результат:

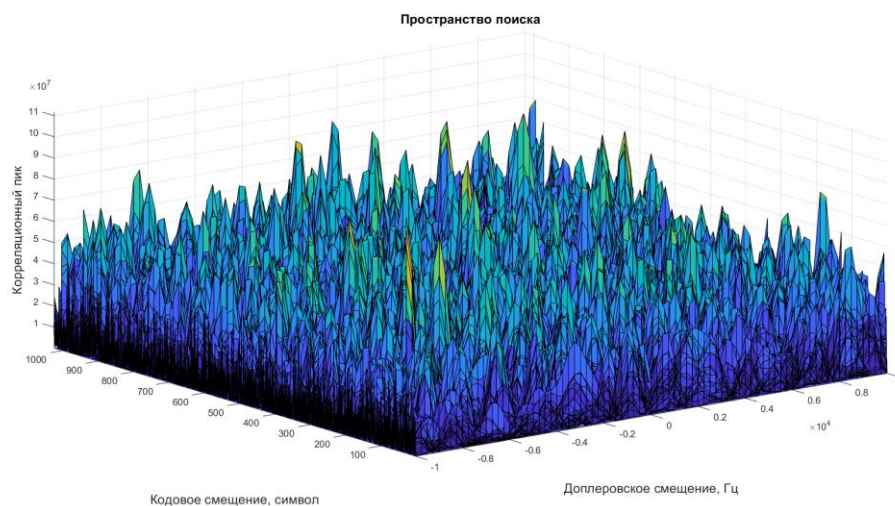


Рисунок 3 – Пространство поиска спутникового сигнала № 1 при отношении сигнал/шум -26 дБ без применения когерентного интегрирования

При данных значениях сигнал/шум система с высокой вероятностью выполнит ложное срабатывание (англ. *false alarm*), поскольку корреляция сигнала с подобным уровнем амплитуды шума превысит стандартный порог, поэтому необходимо улучшать отношение сигнал/шум.

Одним из решений данной проблемы является использование когерентного интегрирования (англ. *coherent integration*): мы аккумулируем множество последовательностей сигнала с шумом, причем начальная фаза сигнала во всех последовательностях должна совпадать; в результате интегрирования отношение сигнал/шум улучшается [5]. Таким образом увеличение продолжительности интегрирования приведет к улучшению упомянутого ранее отношения. Недостатком данного метода является необходимость совпадения начальной фазы. На один бит информации приходится 20 периодов псевдослучайного шума, что эквивалентно 20 мс, интегрировать больший период не имеет смысла ввиду разницы фаз, что приведет к взаимному компенсированию и отсутствию улучшения. Рассмотрим процесс для нескольких стартовых значений сигнал/шум: -26 дБ и -18 дБ (рисунок 6).

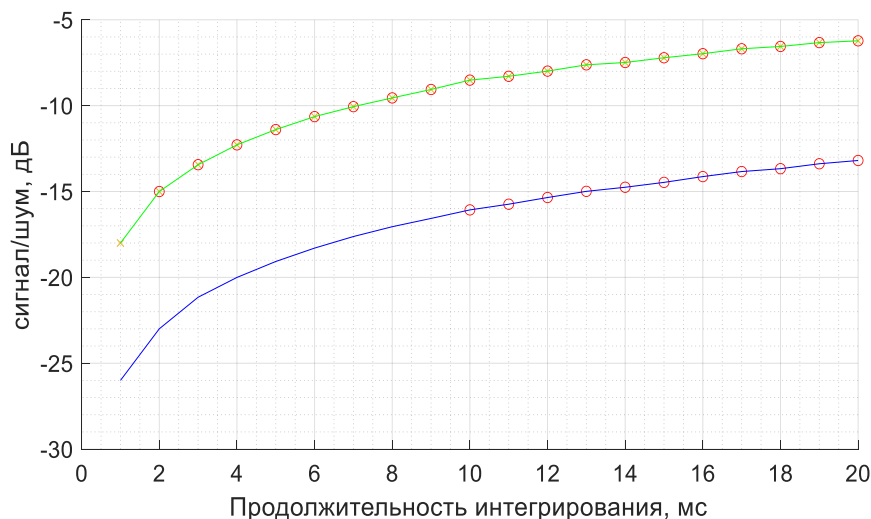
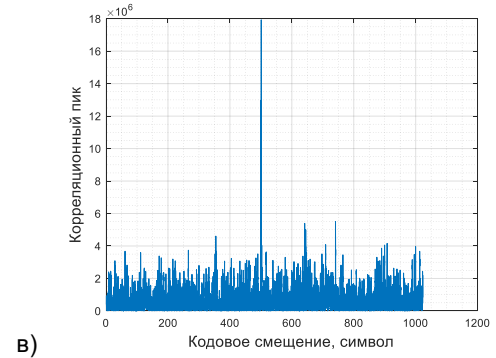
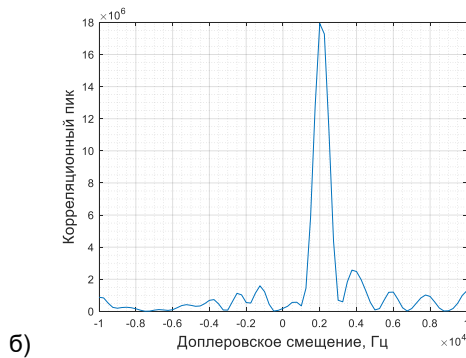
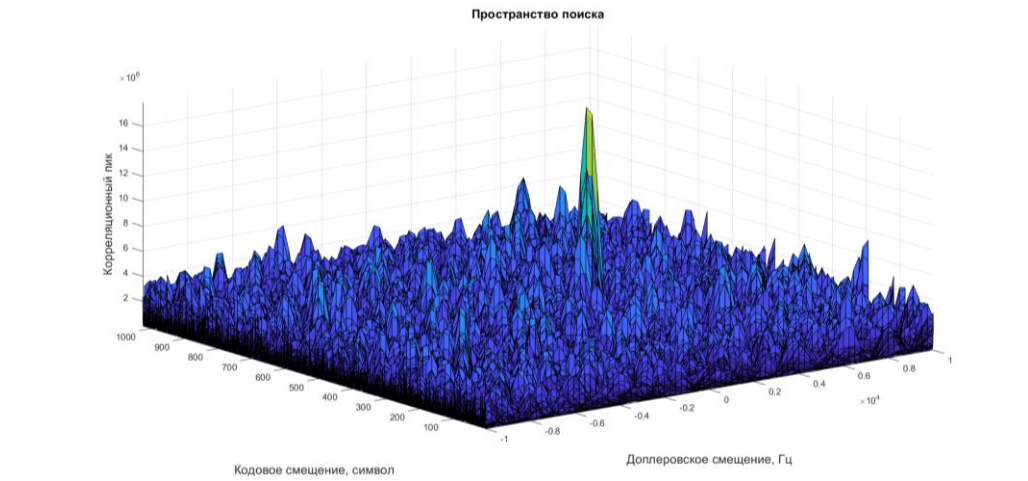


Рисунок 4 – График зависимости продолжительности когерентного интегрирования и уровня сигнал/шум для значений -26 дБ и -18 дБ

Как видно из графика со временем увеличения продолжительности интегрирования процесс улучшения замедляется. С улучшением отношения сигнал/шум возрастает точность обнаружения спутника №1 и его параметров, точные срабатывания системы обозначены кругом. В результате тестирования минимальное отношение сигнал/шум, при котором спутник определяется корректно является -15 дБ; далее вместе с ним рассматривается и -12 дБ:

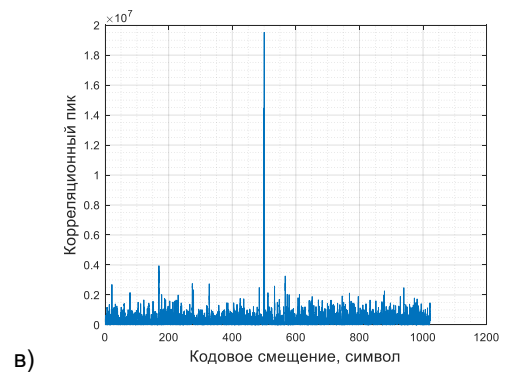
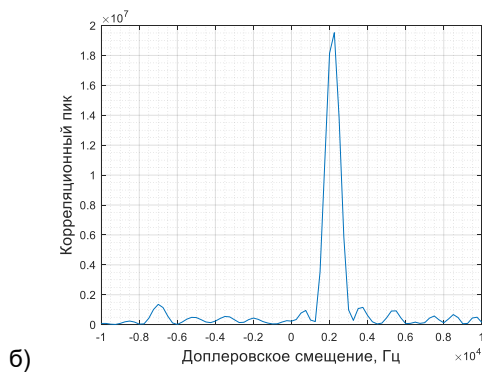
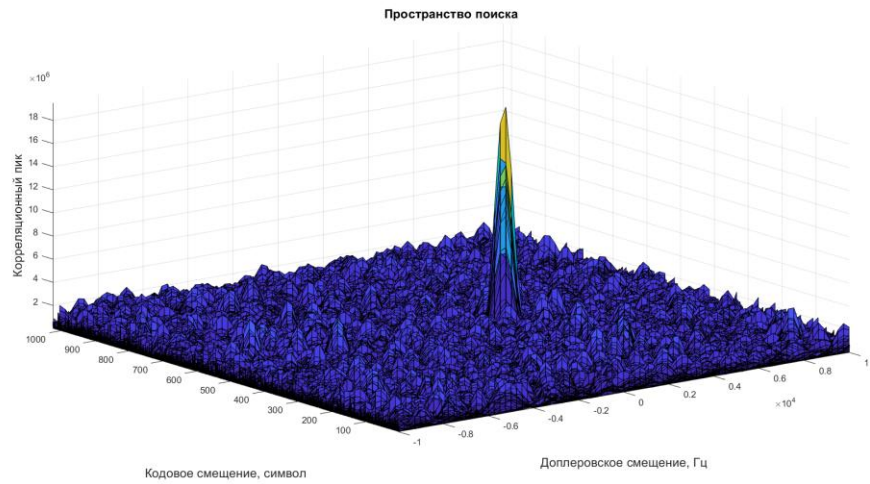
a)



б)

в)

Рисунок 5 – а) Пространство поиска спутникового сигнала № 1 при отношении сигнал/шум -18 дБ с периодом когерентного интегрирования 2 мс б) Доплеровское смещение в) Кодовое смещение а)



б)

в)

Рисунок 6 – а) Пространство поиска спутникового сигнала № 1 при отношении сигнал/шум -18 дБ с периодом когерентного интегрирования 4 мс. б) Доплеровское смещение. в) Кодовое смещение.

Как видно из рисунков алгоритм получения спутникового сигнала GPS оценил примерные значения параметров: доплеровское и кодовое смещения. Более точные значения определяются в процессе слежения (англ. *tracking*). Основная задача слежения заключается в удержании синхронности сигнала с целью извлечения навигационных данных.

**Вывод.**

В работе рассмотрен способ снижения ложного срабатывания системы быстрого поиска спутникового сигнала путем улучшения отношения сигнал/шум. Результат показывает то, что отношение сигнал/шум возможно улучшить, и это повышает точность срабатывания системы получения сигнала. Важность рассмотренного метода заключается в первую очередь в скорости работы алгоритма и уменьшении ложных срабатываний. Моделирование проводилось в MATLAB.

**Список использованных источников:**

1. Doberstein D. *Fundamentals of GPS receivers : a hardware approach* – New York : Springer, ©2012. С. 245.
2. Tsui J. B. Y. *Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach*. – John Wiley & Sons, 2005.
3. Hussain, A.; Ahmed, A.; Magsi, H.; Soomro, J.B.; Bukhari, S.S.H.; Ro, J.-S. Adaptive Data Length Method for GPS Signal Acquisition in Weak to Strong Fading Conditions. *Electronics* 2021, 10, 1735. <https://doi.org/10.3390/electronics10141735>.
4. Joseph, A. and Petovello, M. (2010). *Measuring GNSS Signal Strength. Inside GNSS*. November.
5. Лайонс Р. *Цифровая обработка сигналов. Второе издание. Пер. с англ./ Р. Лайонс // М. : ООО «Бином-Пресс», 2006. С. 412.*

DC 621.396

## FAST GPS-SIGNAL ACQUISITION

Gomolko V. A.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Vashkevich M.I. – PhD*

**Annotation.** This paper considers a way to reduce false alarm for the GPS-signal acquisition. In article the description of the correlation properties of the signal, the structure of the satellite signal, the principle of generating a pseudorandom sequence is considered. Figures are given for the initial signal/noise values on the receiver using coherent integration.

**Keywords.** Acquisition, binary phase shift keying, global navigation satellite system, pseudorandom Noise, golden codes, coherent integration.