

Программный приемник ГЛОНАСС

77-48211/460196

Инженерный вестник # 09, сентябрь 2012

Гаврилов А. И.

УДК.621.396.

НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Artyom83@mail.ru

Введение

Программные приемники глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС) GPS являются популярным направлением исследований в последние 15 лет [1, 2]. В то же время программные приемники ГНСС ГЛОНАСС встречаются гораздо реже. А проекты аналогичные SoftGNSS [3] для ГНСС GPS, являющиеся удобной базой для обучения и исследований, полностью отсутствуют.

В данной статье описывается разработанный программный приемник ГНСС ГЛОНАСС [4], работающий в режиме *пост-обработки* по сигналам стандартной точности, излучаемым в диапазоне L1 или L2. Данный программный приемник представляет собой набор процедур и функций, реализующих обработку предварительно записанного сигнала, предназначенных для **бесплатного открытого пакета математических вычислений** Scilab (близкий аналог коммерческого пакета MATLAB).

Данный программный приемник ГЛОНАСС решает следующую задачу: определение координат устройства, сделавшего запись сигналов спутников ГЛОНАСС в диапазоне L1 или L2. Строго говоря, определяются координаты фазового центра антенны, которая использовалась при записи сигналов. Для успешного определения координат требуется выполнение следующих условий: число видимых спутников должно быть не менее 4, длительность записи должна быть не менее 40 с.

Постановка задачи

При создании данного программного приемника была поставлена цель максимально использовать существующие решения в области программных приемников ГНСС, не ограничиваясь при этом только системой ГЛОНАСС. Одним из наиболее известных программных приемников, работающих в режиме пост-обработки, является проект SoftGNSS [3], разработанный Darius Plausinaitis и Dennis M. Akos и предназначенный для работы с ГНСС GPS. Он распространяется вместе с [5] и подробно в ней описывается. Именно данный проект и был взят в качестве основы для разработки программного приемника ГЛОНАСС.

Описание блока первичной обработки сигналов программного приемника ГЛОНАСС

Первой задачей любого навигационного приемника является поиск сигналов спутников, находящихся в его области видимости. В ГНСС ГЛОНАСС открытый сигнал стандартной точности (СТ-сигнал) диапазонов L1/L2 имеет следующий вид:

$$s_i(t) = A \cdot C(t) \cdot D(t) \cdot M(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (f_0 + i \cdot \Delta f + F_d) \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

где

i – номер несущей частоты данного спутника ;

A – амплитуда сигнала ;

$C(t)$ – дальномерный код длиной 511 символов (511 кбит/с) ;

$D(t)$ – цифровая информация, содержащая навигационное сообщение (50 бит/с) ;

$M(t)$ – меандровая последовательность (100 бит/с) ;

Δf – шаг по частотным каналам (562,5 кГц для L1 и 437,5 кГц для L2) ;

F_d – доплеровский сдвиг частоты ;

φ – начальная фаза принятого сигнала ;

Необходимость поиска обусловлена тем, что для обработки сигнала спутника требуется, чтобы в приемнике генерировалась точная копия принимаемого сигнала. Для этого требуется определить неизвестную частоту Доплера F_d , принимаемого сигнала, и фазу дальномерного кода $C(t)$ (называемую также задержкой дальномерного кода).

Типовая схема поиска сигнала в навигационном приемнике представлена на рисунке 1.

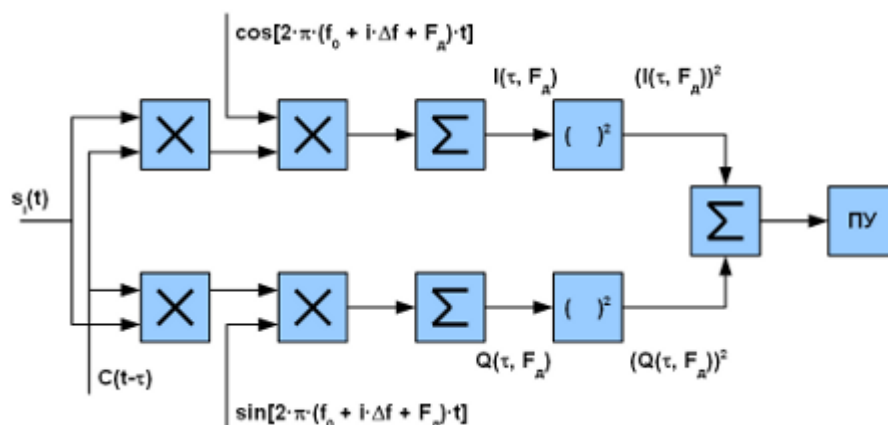


Рис. 1. Типовая схема поиска сигнала в навигационном приемнике

Диапазон поиска по частоте Доплера определяется следующими факторами: взаимной скоростью движения приемника и навигационного космического аппарата (НКА), а также нестабильностью тактового генератора приемника. Для малоподвижных потребителей типовой диапазон поиска составляет: $-10...+10$ кГц.

Диапазон поиска по дальномерному коду определяется его свойствами. В качестве дальномерного кода в ГНСС ГЛОНАСС используется М-последовательность с образующим полиномом вида $1+x^5+x^9$ длиной 511 символов, называемая также псевдослучайной последовательностью (ПСП). Длительность дальномерного кода составляет 1 мс. Соответственно диапазон поиска по задержке составляет $0...1$ мс.

С целью упрощения процедуры поиска, диапазоны поиска по задержке и по частоте делят на ячейки. При этом требуется решить задачу выбора размера ячейки поиска.

Шаг поиска по задержке выбирается исходя из допустимых потерь в отношении сигнал/шум на границе ячейки, вызванных рассогласованием фаз принимаемого дальномерного кода и генерируемого в приемнике. В типовом приемнике шаг поиска по задержке равен длительности одного символа дальномерного кода. При этом потери на границе ячейки поиска равны 3 дБ, что

видно из графика на рисунке 2. Указанный шаг поиска обеспечивает разбиение всего диапазона поиска на 511 ячеек.

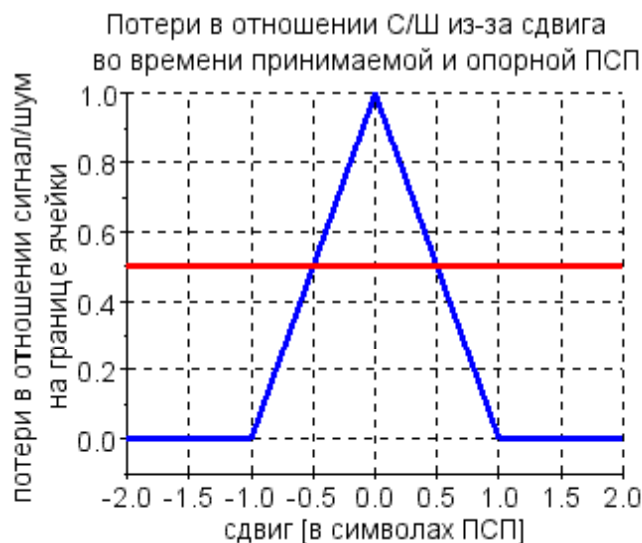


Рис. 2. Потери в отношении сигнал/шум, вызванные рассогласованием фаз принимаемого дальномерного кода и генерируемого в приемнике

Шаг поиска по частоте зависит от требуемого времени когерентного накопления принимаемого сигнала и допустимых потерь в отношении сигнал/шум на границе ячейки поиска, вызванных рассогласованием по частоте.

В хороших условиях приема время когерентного накопления может быть равно 1 мс, а шаг поиска по частоте может быть равен 1000 Гц (при этом потери на границе ячейки поиска будут равны 4 дБ, что видно из графика на рисунке 3). При заданных параметрах весь диапазон поиска разбивается на 21 ячейку. В общем случае нули функции, изображенной на рисунке 3 можно рассчитать по формуле: $k \cdot (1/T)$, где T – длительность когерентного накопления, а k – целое число. Это означает, что при увеличении длительности когерентного накопления приходится уменьшать шаг поиска по частоте Доплера для того, чтобы потери на границе ячейки поиска оставались такими же. Так, например, для когерентного накопления в течении 5 мс, шаг поиска будет равен 200 Гц (при потерях на границе ячейки поиска равных 4 дБ).

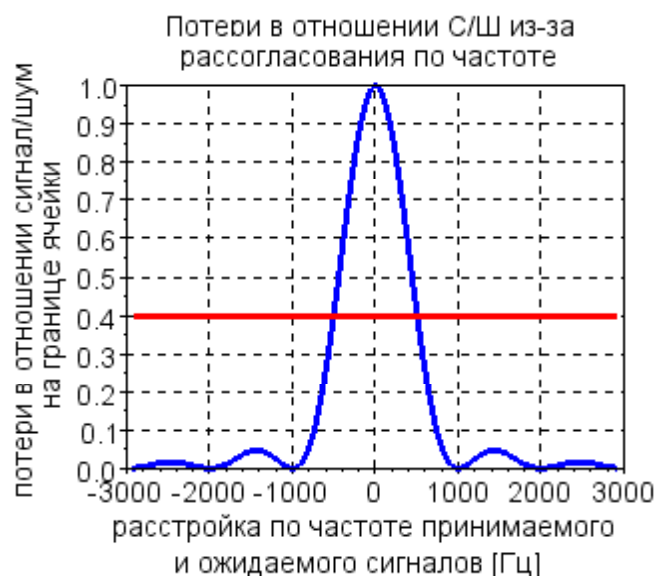


Рис. 3. Потери в отношении сигнал/шум, вызванные рассогласованием по частоте Доплера принимаемого сигнала и сигнала, генерируемого в приемнике

В процессе поиска сигнала происходит последовательный перебор всех ячеек поиска по частоте Доплера и по фазе дальномерного кода. В простейшем случае требуется перебрать $21 \cdot 511 = 10731$ ячейку. Число математических операций, которые требуется выполнить в каждой ячейке, в соответствии со структурной схемой на рисунке 1 можно оценить следующим образом.

Пусть f_s – частота дискретизации сигнала. Тогда при когерентном накоплении в течение 1 мс потребуется выполнить: $3 \cdot (f_s/1000)$ операций умножения, $2 \cdot (f_s/1000)$ операций сложения, 2 возведения в квадрат и заключительное суммирование (последние три операции можно не учитывать). Пусть, например, $f_s=30$ МГц. Тогда потребуется примерно 90 000 операций умножения и 60 000 операций сложения. Для перебора 10 000 (округлим рассчитанное выше значение) ячеек потребуется 900 000 000 операций умножения и 600 000 000 операций сложения. Что весьма много даже по меркам современных персональных компьютеров. К тому же число математических операций резко возрастает в случаях, когда требуется увеличивать время когерентного накопления (одновременно возрастает число ячеек поиска по частоте Доплера, пропорционально требуемому времени накопления, и возрастает число операций, необходимых для вычислений в каждой ячейке поиска).

Для сокращения вычислительной нагрузки в программных приемниках используют схему поиска, представленную на рисунке 4. Отличительной особенностью данной схемы является то, что за один цикл вычислений происходит расчет сразу всех ячеек по фазе дальномерного кода, в отличие от схемы на рисунке 1, в которой за один цикл вычислений происходит расчет только одной ячейки по фазе дальномерного кода. Математической основой схемы, представленной на рисунке 4, является теорема о свертке. Таким образом для перебора всех ячеек поиска требуется провести вычисления по схеме, представленной на рисунке 4, для каждой ячейки поиска по частоте Доплера, т. е. 21 раз.

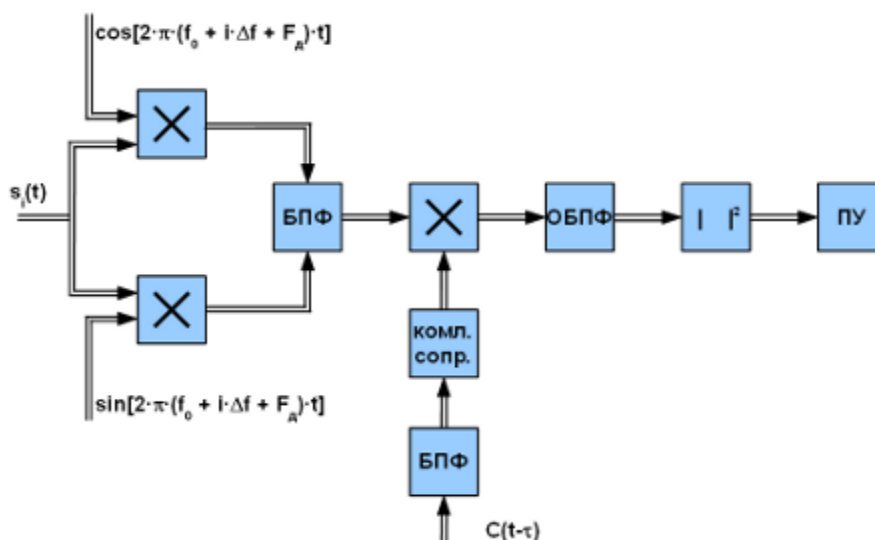


Рис. 4. Схема поиска, реализуемая в программных приемниках

Рассчитаем число операций требуемое для выполнения поиска по схеме, приведенной на рисунке 4. При тактовой частоте $f_s=30$ МГц требуется выполнить: $7 \cdot (f_s/1000)$ операций умножения (два умножения для переноса входного сигнала на нулевую частоту, четыре умножения для реализации умножения комплексных чисел, полученных в результате выполнения операции БПФ и последнее умножение на возведение в квадрат), $2 \cdot (f_s/1000)$ операций сложения (для реализации умножения комплексных чисел). Кроме того требуется выполнить две операции БПФ и одну ОБПФ. БПФ/ОБПФ требует порядка $N/2 \cdot \log_2(N)$ операций комплексного умножения (т.е. 4 умножения и

2 сложения для каждой пары комплексных чисел) [6]. Операция комплексного сопряжения в худшем случае требует f_s операций умножения. Суммарное требуемое число операций умножения равно $(f_s/1000)*8+4*(f_s/1000/2)*\log_2(f_s/1000)=30000*8+4*(15\,000)*15=30\,000*38=1\,140\,000$. А суммарное требуемое число операций сложения равно: $(f_s/1000)*2+2*(f_s/1000/2)*\log_2(f_s/1000)=30000*2+30\,000*15=30\,000*17=510\,000$. Указанное число операций требуется выполнить для каждой ячейки по частоте Доплера. Таким образом итоговое число операций сложения будет равно $510\,000*21=10\,710\,000$, а операций умножения: $1\,140\,000*21=23\,940\,000$. Выигрыш данной схемы поиска по числу операций умножения равен $900\,000\,000/23\,940\,000=37$ раз, а выигрыш по числу операций сложения: $600\,000\,000/10\,710\,000=56$ раз. Блок поиска, реализованный по данной схеме, работает весьма быстро на современных компьютерах.

Платой за ускорение поиска по схеме, представленной на рисунке 4, является сложность представленной схемы по сравнению с классической схемой поиска.

Пороговое устройство программного приемника реализовано в соответствии со спецификой работы схемы поиска и спецификой постобработки сигналов. Ключевым отличием приемника, реализующего постобработку сигналов, является тот факт, что один и тот же записанный сигнал можно обрабатывать произвольное число раз. В частности процедуру поиска можно повторять произвольное число раз для заданного участка записанного сигнала, т. е. фактически выполнять поиск во всех ячейках поиска параллельно.

Алгоритм поиска работает по следующему принципу. Во-первых, рассчитывается величина отклика, соответствующая каждой ячейке поиска. Во-вторых, осуществляется поиск максимального отклика. В-третьих, отыскивается второй максимум, отстоящий от ранее найденного максимума не менее, чем на пол символа ПСП. Далее рассчитывается отношение найденных максимумов и сравнивается с заданным порогом. Данный алгоритм поиска обладает тем преимуществом, что заданный порог не требуется пересчитывать

для работы с разными записями сигналов, которые могут отличаться друг от друга частотой дискретизации, разрядностью данных и т. д. На рисунке 6 приведена наглядная иллюстрация к данному алгоритму обнаружения.

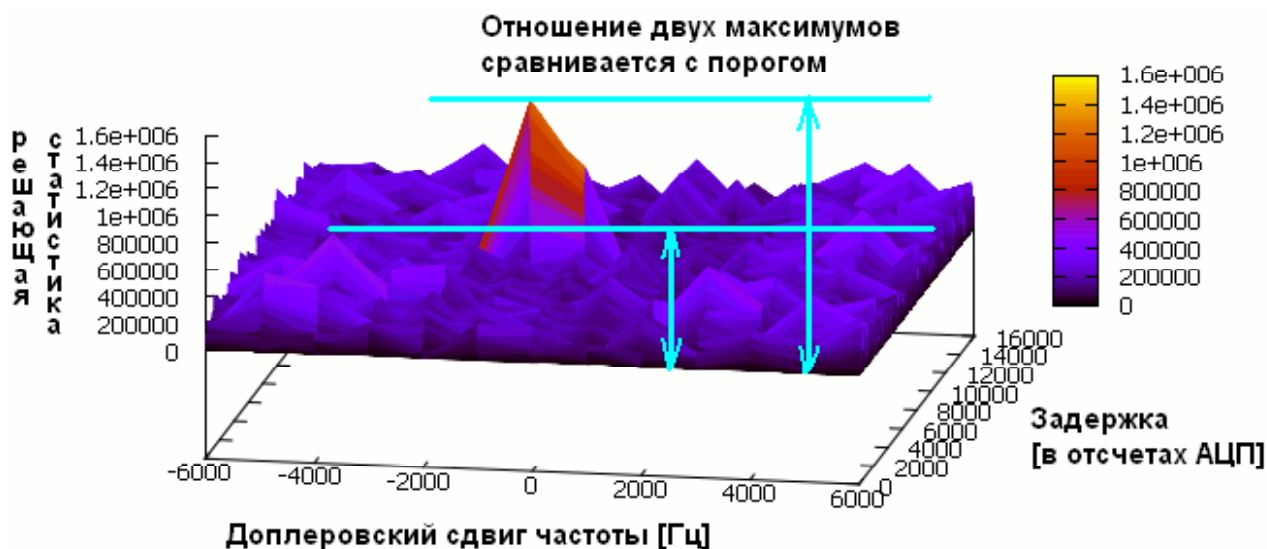


Рис. 5. Алгоритм работы блока обнаружения сигналов

По сравнению с оригинальной версией программы SoftGNSS, работающей с сигналами GPS в блок поиска были внесены следующие изменения:

1. Добавлена возможность изменения времени когерентного накопления на этапе поиска сигналов для работы с ослабленными сигналами;
2. Модифицирован алгоритм поиска сигнала для работы с FDMA-сигналами ГЛОНАСС;
3. Упрощен блок поиска: удален блок точной оценки частоты обнаруженного сигнала;

Структура блока слежения за сигналом в программном приемнике оставлена без существенных изменений по сравнению с оригинальной версией. На рисунке 6 представлена структурная схема блока слежения за сигналом.

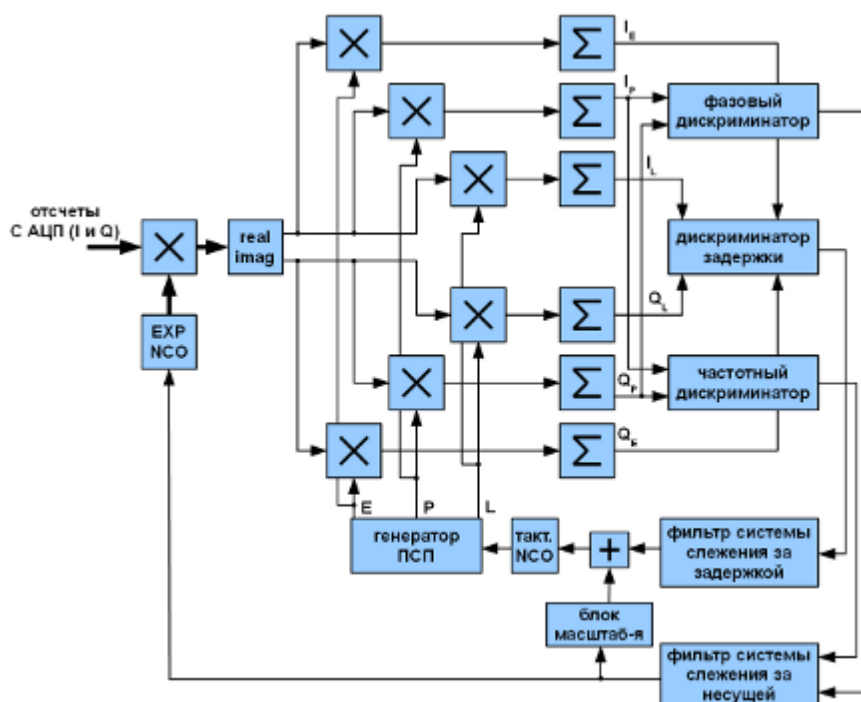


Рис. 6. Структурная схема блока слежения за сигналом

Главным отличием является использования в контуре слежения за несущей сигнала совмещенной системы фазовой и частотной автоподстройки (в оригинальном приемнике использовалась система фазовой автоподстройки), взятой из [7]. Для этого в схему слежения был дополнительно добавлен дискриминатор частоты и изменен вид фильтра системы слежения за несущей. Структурная схема измененного фильтра представлена на рисунке 7.

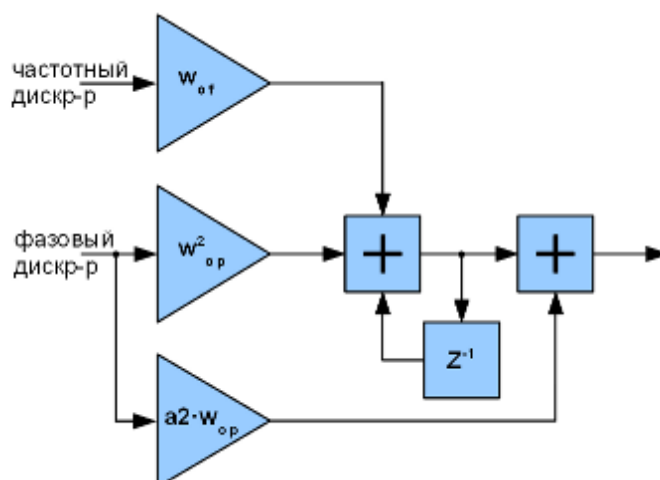


Рис. 7. Структурная схема фильтра системы слежения за несущей

Данное изменение позволило упростить блок поиска сигналов. Дополнительно для системы слежения за задержкой введена поддержка от совмещенной системы фазовой и частотной подстройки. Это позволило сузить полосу фильтра системы слежения за задержкой и уменьшить расстояние между плечам коррелятора, что привело к увеличению точности измерения псевдодальностей и в конечном счете координат.

Контур слежения также подвергся модификации. В соответствии с рисунком 6 при управлении тактовой частотой ПСП используется поддержка от контура слежения за несущей. Фильтр системы слежения за задержкой оставлен без изменений (используется фильтр второго порядка).

В схеме слежения за задержкой используется некогерентный дискриминатор:

$$U(\tau) = \frac{\sqrt{I_E^2 + Q_E^2} - \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}}{\sqrt{I_E^2 + Q_E^2} + \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}} \quad (2)$$

Характеристика дискриминатора задержки представлена на рисунке 8. Был выбран данный дискриминатор, так как его характеристика не зависит от отношения-сигнал, что упрощает построение контура слежения за задержкой.

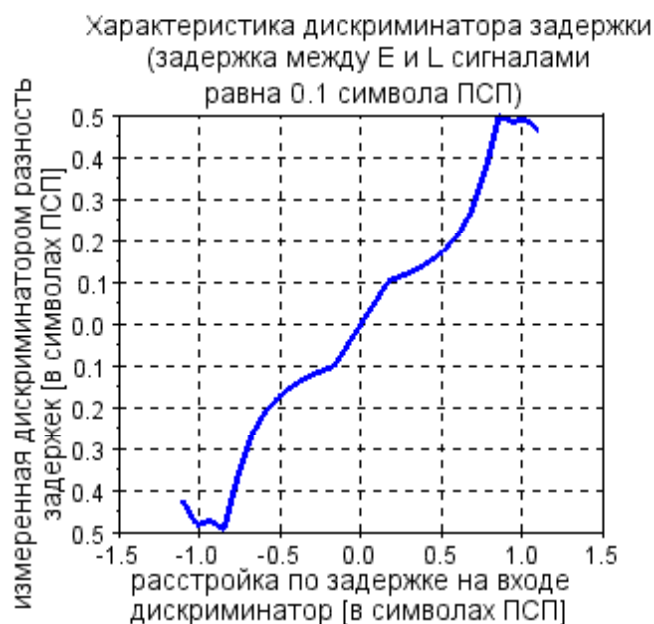


Рис. 8. Характеристика дискриминатора задержки

В схеме слежения за несущей используется частотный дискриминатор:

$$\begin{aligned}\text{dot} &= I_{v1} I_{v2} + Q_{v1} Q_{v2} \\ \text{cross} &= I_{v1} Q_{v2} - I_{v2} Q_{v1} \\ U(f) &= \frac{ATAN2(\text{dot}, \text{cross})}{t_2 - t_1}\end{aligned}\quad (3)$$

Характеристика частотного дискриминатора приведена на рисунке 9.

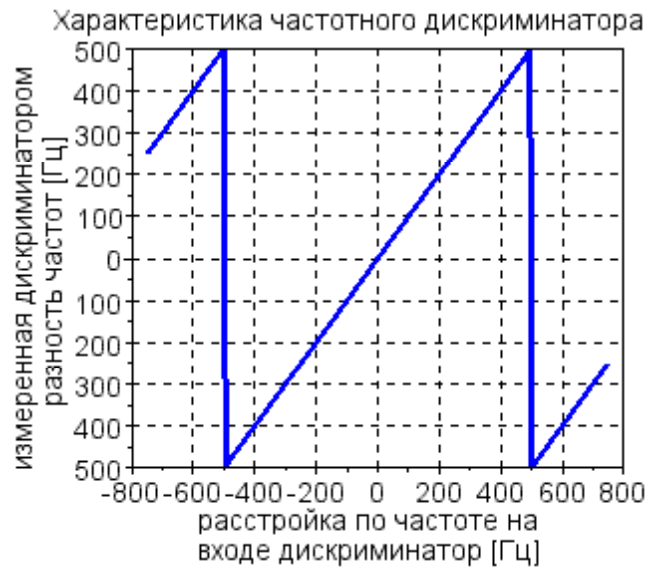


Рис. 9. Характеристика частотного дискриминатора (при времени накопления сигнала равном 1 мс)

Также в схеме слежения за несущей используется фазовый дискриминатор:

$$U(\varphi) = ATAN2(Q_v, I_v) \quad (4)$$

Характеристика фазового дискриминатора приведена на рисунке 10.

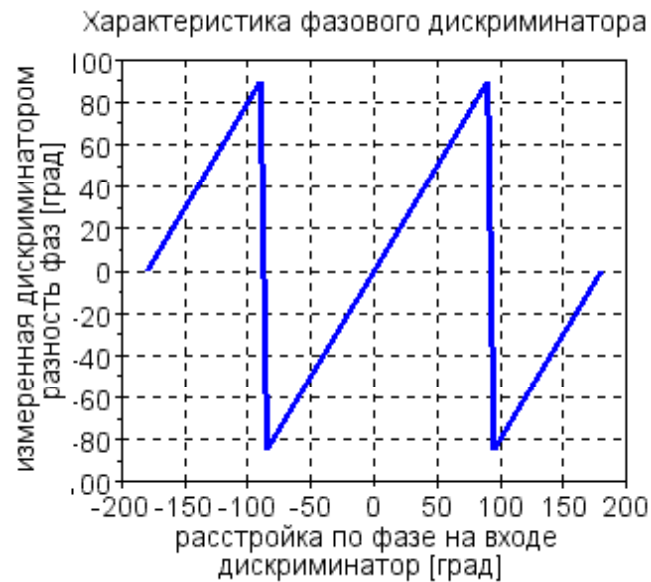


Рис. 10. Характеристика фазового дискриминатора

Результат работы схемы слежения за сигналом одного из спутников представлен на рисунке 11.

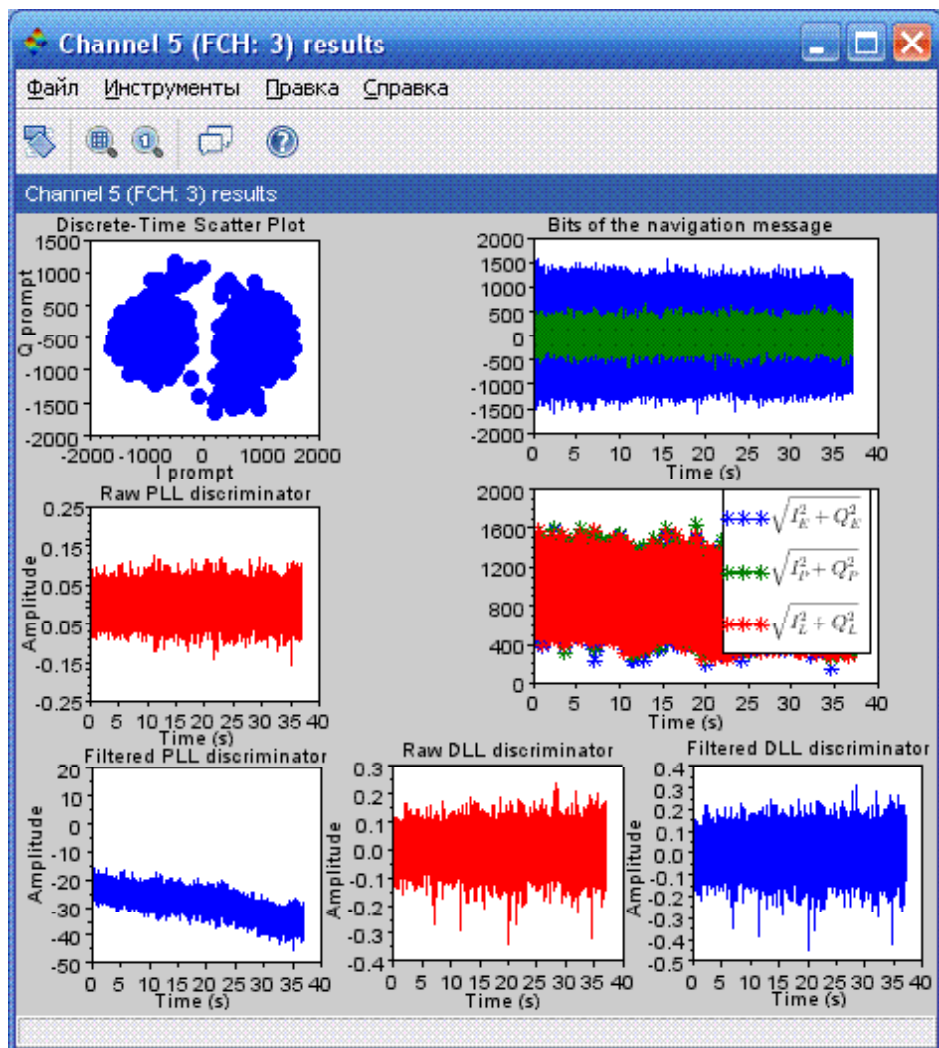


Рис. 11. Результат работы блока слежения за сигналом одного спутника

Описание блока вторичной обработки сигналов программного приемника ГЛОНАСС

По сравнению с оригинальной версией блок вторичной обработки, отвечающий за вычисление координат приемника претерпел следующие изменения:

1. В соответствии с интерфейсным контрольным документом ГЛОНАСС (ИКД) [8] был написан блок декодирования навигационной информации (реализовано декодирование эфемеридной информации);
2. В соответствии с ИКД и [9] был реализован расчет координат спутников на требуемый момент времени по эфемеридной информации;
3. В соответствии с ИКД был изменен блок выделения меток времени;
4. Был добавлен пересчет координат из системы ПЗ90.02 в систему WGS84.

Результат обработки записи сигналов ГЛОНАСС диапазона L1 представлен на рисунке 12, результат обработки сигналов диапазона L2 представлен на рисунке 13.

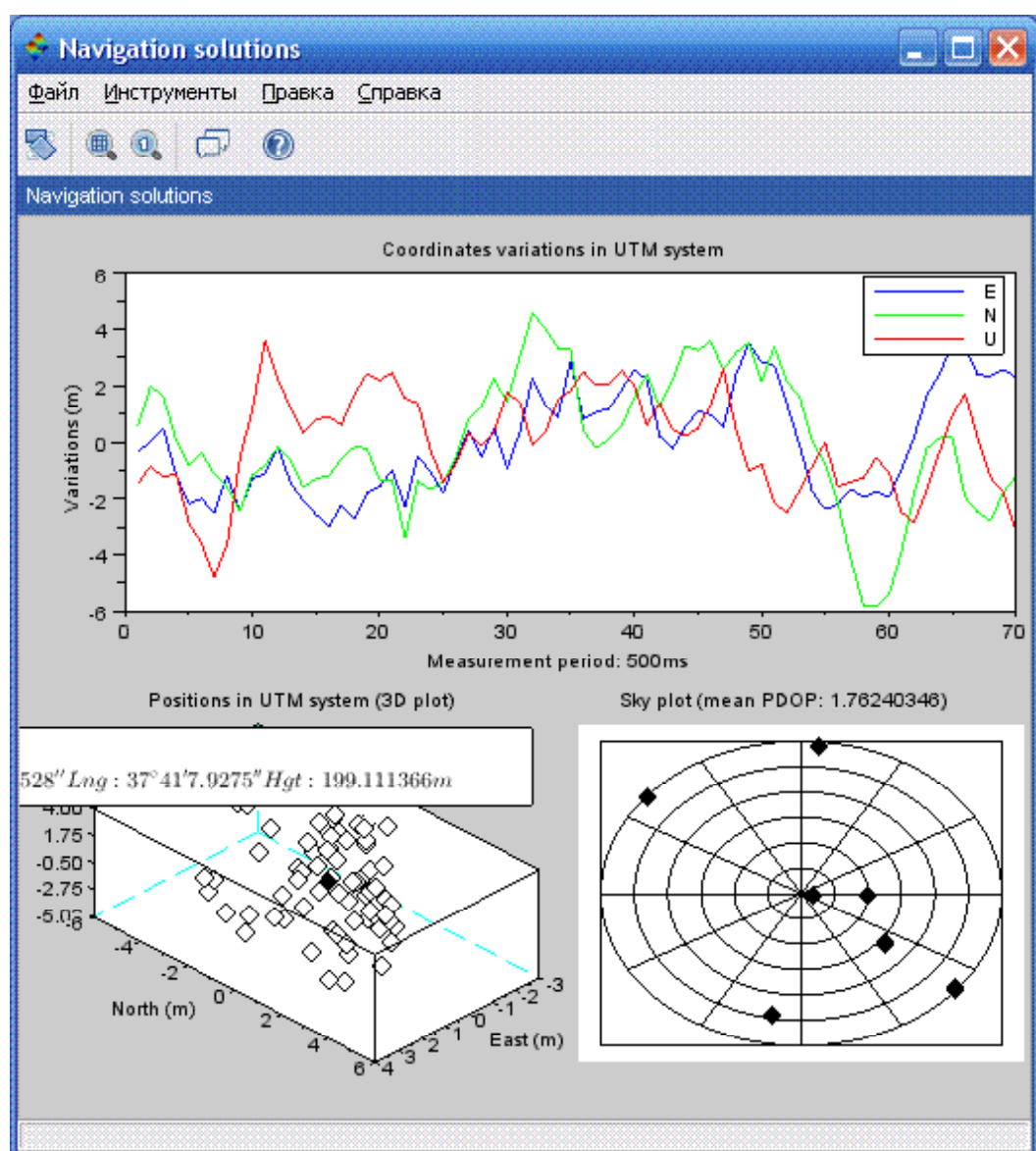


Рис. 12. Навигационное решение по сигналам диапазона L1

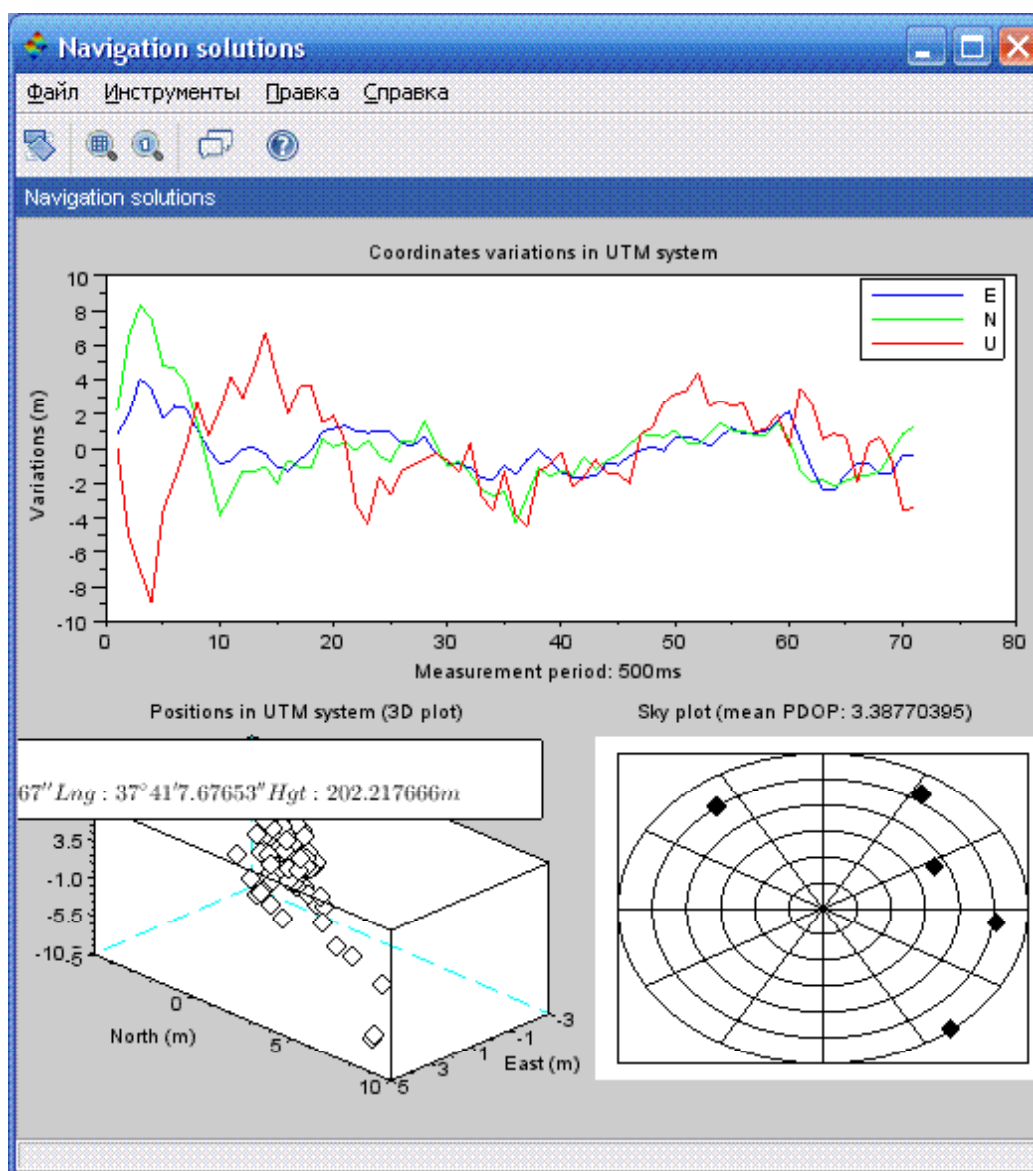


Рис. 13. Навигационное решение по сигналам диапазона L2

Заключение

В заключении отметим направления развития программного приемника:

1. Реализация работы с новыми сигналами ГЛОНАСС L3, излучаемыми спутником нового поколения ГЛОНАСС-К;
2. Реализация совмещенной обработки сигналов L1/L2 с целью повышения точности определения координат путем минимизации ошибки, вызванной влиянием ионосферы на радиосигналы;
3. Реализация векторного блока слежения за задержкой/частотой;

4. Обработка методов работы со слабыми сигналами (менее 30 дБ·Гц);
5. Исследование сигналов новых СРНС: COMPASS, GALILEO.

Список использованной литературы:

1. Ma C., Lachapelle G., Cannon M.E. Implementation of a Software GPS Receiver. Режим доступа: http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/04gnss_ion_cmaetal.pdf (дата обращения 30.03.2012).
2. Akos D. M. A software radio approach to global navigation satellite system receiver design: дис. doctor of philosophy. 1997. 139 с.
3. The SoftGPS project. Режим доступа: <http://kom.aau.dk/project/softgps/> (дата обращения 30.03.2012).
4. GNSS-SDR. Режим доступа: <http://gnss-sdr.ru/> (дата обращения 30.03.2012).
5. A Software-Defined GPS and Galileo Receiver /К. Borre, D.M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, S. H. Jensen. Boston: Birkhauser, 2007. 176 с.
6. Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джерви Цифровая обработка сигналов: практический подход. М.: Вильямс, 2008. 992 с.
7. Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. Understanding GPS Principles and Applications. Boston: Artech House, 2006. 703 с.
8. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Редакция 5.1. М., 2008. 73 с.
9. Cheng C.-H.. Calculations For Positioning With The Global Navigation Satellite System: Mater of Science Thesis. Athens, 1998. 96 с.