
УДК 629.783:527

Повышение виброустойчивости приемника сигналов ГНСС при работе в контуре системы управления

Никитин Д. П.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: nikitindmitriy@mail.ru*

Аннотация

В работе рассматривается функционирование приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в контуре системы автоматического управления техникой. Описываются вибрационные воздействия на навигационный приемник и метод уменьшения этих воздействий без привлечения дополнительных аппаратных средств или модификации аппаратной части приемника. Приводятся результаты экспериментальных исследований воздействия вибрации на корпус навигационного приемника.

Ключевые слова: ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, кварцевый эталонный генератор, общая широкополосная петля, ФАПБ, ССЗ

Введение

В последние годы приемники сигналов ГНСС нашли широкое применение во многих отраслях экономики. Сейчас навигационная аппаратура потребителя (НАП) GPS и ГЛОНАСС активно используется в геодезии, картографии, мореплавании, сельском хозяйстве, управлении летательными аппаратами, строительстве, добыче полезных ископаемых и т.д. Причем во многих приложениях навигационные приемники используются в системах автоматизированного управления и их показания служат основой для формирования управляющих сигналов. В зависимости от решаемой задачи предъявляются различные требования к точности и надежности навигационных решений, используется

разная аппаратура потребителя. Как правило, в системах полуавтоматического управления применяют простую и дешевую НАП, которая не всегда предназначена для работы в режиме относительного местоопределения [1]. Примером системы полуавтоматического управления может служить система для параллельного вождения, которую применяют для сельскохозяйственной техники, выполняющей на больших пашнях параллельные друг другу проезды с целью максимально эффективно обработать каждый участок поля.

В системах автоматического управления используют дорогую, многосистемную, двухчастотную НАП. Такие системы в строительстве и горнодобывающей промышленности используются для управления техникой без вмешательства оператора, и обеспечивают сантиметровые точности местоопределения. Использование таких систем дает огромную экономию средств и увеличивает производительность. При этом работа идет круглые сутки, и на решение навигационного приемника накладываются требования обеспечения постоянной сантиметровой точности. Причем при добыче полезных ископаемых используют не единичное техническое средство с автоматическим управлением, а целую систему, состоящую из нескольких грузовых автомобилей и экскаваторов, которые непрерывно перевозят и погружают полезные ископаемые. В таких приложениях помимо точности очень критична надежность получаемого навигационного решения, так как остановка производства или неправильный сигнал управления могут привести к огромным убыткам.

В последнее время спутниковую навигационную аппаратуру применяют на бурильных установках при добыче нефти, на пассажирском транспорте, на океанических радиобуях для предупреждения наводнений, цунами и т.д. Однако при использовании навигационного приемника на движущихся объектах, аппаратная часть приемника подвергается сильным динамическим возмущениям:

- вибрациям от работы силового агрегата (двигателя) подвижного объекта;
- ударам и толчкам из-за специфики движения объекта (резкое торможение или ускорение на автомобиле или летательном аппарате, удары и толчки при работе бурильной установки или удары волны о радиобуй и т.д.);
- тряски при определенных видах движения (перемещение по пересеченной местности).

Такие воздействия негативно сказываются на работе навигационного приемника и приводят к срыву слежения за навигационными космическими аппаратами (НКА). В аппаратной части современной НАП установлен кварцевый эталонный генератор с долговременной относительной нестабильностью частоты относительно номинального значения порядка $10e-6 \dots 10e-7$ [2], который генерирует тактовые колебания. Как правило, радиосигналы от НКА после прохождения антенны и радиотракта (фильтрующие блоки,

конверторы частоты и т.д.) приемника обрабатываются отдельно в цифровых спутниковых каналах. В цифровом канале параметры входящего сигнала отслеживаются с помощью специальных систем слежения. При этом радиосигнал состоит из несущего колебания с некоторой неизвестной фазой, модулированного дальномерной псевдослучайной последовательностью (ПСП) и информационными символами [1, 3, 4]. Фаза несущей частоты отслеживается системой фазовой автоподстройки (ФАП, англ. Phase locked Loop - PLL), а неизвестная задержка модулирующей ПСП системой слежения за задержкой (ССЗ, англ. Delay Locked Loop - DLL). Дискриминаторы и петлевые фильтры следящих систем реализованы в программной части навигационного приемника, они вырабатывают целеуказания, которые передаются в цифровую аппаратную часть приемника (на управляемый генератор) для корректировки параметров опорных сигналов и замыкания петель слежения. В цифровой аппаратной части приемника принимаемый сигнал накапливается, умножается на опорные сигналы несущей частоты и дальномерного кода. Таким образом, происходит корреляционный прием сигнала, а устройства его выполняющие называются *корреляторами*. То есть системы слежения подстраивают параметры опорных сигналов (фазу и задержку) под параметры принимаемого сигнала. В случае совпадения фазы и задержки принятого и опорного сигнала, их взаимный коэффициент корреляции максимален и полагается, что приемник находится в состоянии стабильного слежения за сигналом некоторого НКА. При изменении параметров принимаемого сигнала на дискриминаторах систем ФАП и ССЗ вырабатывается сигнал ошибки, который указывает, как необходимо подстроить параметры опорных сигналов, чтобы они снова совпадали с параметрами принимаемых сигналов.

При воздействии сильной вибрации, тряски, ударов частота эталонного кварцевого генератора может отклоняться от своего номинала и частота при формировании опорного сигнала на корреляторах начинает ошибочно изменяться, что приводит к появлению динамической ошибки, то есть увеличивается сигнал на выходе дискриминатора в системе ФАП. Если отстройка частоты слишком велика, в системе ФАП возникают перескоки или срывы слежения за фазой НКА. В данном случае при воздействии вибрации на кварцевый генератор, начинает плыть опорная частота во всех спутниковых каналах, то есть возникает некоторое общее воздействие и может произойти срыв слежения сначала за «слабыми» НКА, а при увеличении воздействия и за всеми остальными НКА.

С появившейся динамической ошибкой, как известно [1, 5], можно бороться расширением полосы петлевого фильтра системы ФАП, однако это приведет к сильному

увеличению шумовых ошибок измерений и также может стать причиной срыва слежения. Уменьшить эффект вибрации возможно с помощью применения аппаратных средств:

- Механическая амортизация аппаратной части приемника, а именно кварцевого генератора, однако данный метод ведет к усложнению и удорожанию НАП;
- Установка более дорогого, но вибростойкого кварцевого генератора в навигационный приемник, что опять же приведет к удорожанию НАП;
- Установка навигационного приемника на подвижном средстве таким образом, чтобы вибрационные воздействия происходили не по оси чувствительности кварцевого генератора. Данная методика накладывает некоторые ограничения на динамику подвижного средства и не всегда может полностью решить проблему вибрации.

В [7] предложен метод компенсации такого рода общих воздействий с помощью введения в программную часть приемника дополнительной общей широкополосной следящей петли, позволяющей компенсировать общие для всех спутниковых каналов воздействия.

Принцип работы общей широкополосной кварцевой петли

Принцип работы общей широкополосной петли [7], заключается в выработке дополнительного общего целеуказания для управляемых генераторов во всех спутниковых каналах. Эти целеуказания позволяют снимать дополнительное общее динамическое (в данном случае вибрационное) воздействие с систем ФАП не расширяя при этом их полосу. Как правило, в каждом спутниковом канале находятся три коррелятора, вычисляющие различные корреляционные сигналы. Согласно [1], синфазный корреляционный сигнал I имеет максимальное значение в случае стабильного слежения и формируется в результате свертки принимаемого сигнала с синфазной опорной несущей и опорным кодом, который представляет собой копию принимаемой ПСП. При этом если обозначить разность фазы опорной несущей и фазы принимаемого сигнала через φ , а разность задержки опорной и принимаемой ПСП через τ , то выражение для сигнала I можно записать следующим образом:

$$I = k \cdot A \cdot \mu \cdot R(\tau) \cdot \cos(\varphi) + N_i, \quad (1)$$

Где, k - коэффициент пропорциональности;

A - амплитуда входного сигнала;

μ - знак информационного символа;

$R(\tau)$ - значение нормированной взаимокорреляционной функции опорной и принятой ПСП;

$\cos(\varphi)$ - результат свертки опорной несущей и несущей принимаемого сигнала;

N_i - аддитивная помеха на выходе коррелятора.

При малости значений φ и τ в режиме стабильного слежения, значение $R(\tau)\cos(\varphi)$ - стремится к единице.

Квадратурный корреляционный сигнал Q вычисляется при сдвиге фазы опорной частоты на $\pi/2$ и является пропорциональным ошибке слежения за фазой несущей частоты принимаемого сигнала. Выражение для квадратурного сигнала:

$$Q = kA\mu R(\tau)\sin(\varphi) + N_q, \quad (2)$$

Где, N_q - помеха на выходе коррелятора.

Третий корреляционный сигнал dI пропорционален величине ошибки в системе ССЗ и формируется следующим образом:

$$dI = kA\mu\Delta R(\tau)\cos(\varphi) + N_{dI}, \quad (3)$$

Где, $\Delta R(\tau)$ - взаимокорреляционная функция принимаемой ПСП и опорной ПСП, представляющей собою последовательность строб-импульсов;

N_{dI} - помеха на выходе коррелятора.

Корреляционные компоненты, записанные в выражениях (1-3), рассчитываются с некоторой частотой (например, 1 кГц) накапливаются и применяются при формировании сигналов дискриминатора (сигнала рассогласования, ошибки) в петлях слежения. Как правило, сигнал дискриминатора в системе ФАП каждого j спутникового канала определяется соотношением [1]:

$$Z_d^j = \arctan\left(\frac{Q_\Sigma^j}{I_\Sigma^j}\right), \quad (4)$$

Где, Q_Σ^j и I_Σ^j - накопленные за некоторый промежуток времени корреляционные сигналы I и Q .

Сигнал ошибки (4) поступает на петлевой фильтр, который вырабатывает сигнал коррекции и посылает его на управляемый генератор. Помимо этого, в литературе [7] предложено добавить в каналы слежения одну общую широкополосную петлю,

вырабатывающую с тактом формирования значений I и Q целеуказание, причем сигнал дискриминатора такой петли общий для всех каналов и записывается следующим образом:

$$Z_{qll} = \arctan\left(\frac{\sum_{j=1}^n I_j \cdot Q_j}{\sum_{j=1}^n I_j^2}\right), \quad (5)$$

Где, n – количество НКА, находящихся в стабильном слежении в данный момент времени. Далее значение Z_{qll} , являющее собой дополнительное общее фазовое управление, с частотой формирования сигналов I и Q (1 кГц) посылается в цифровые управляемые генераторы всех спутниковых каналов для подстройки фазы несущего колебания. Также в управляемые генераторы с уже более низкой частотой (например, 200 Гц) поступает управление от системы ФАП. Функциональная схема работы такой системы изображена на рисунке 1. Здесь наряду с программной логикой работы общей широкополосной петли и петлевых фильтров системы ФАП, показаны управляемые генераторы, расположенные в цифровой аппаратной части приемника, сигналы с которых замыкают петли слежения, и корреляторы. На рисунке 1, Z_f^j - сигнал частотного управления с выхода петлевого фильтра индивидуального канала ФАП.

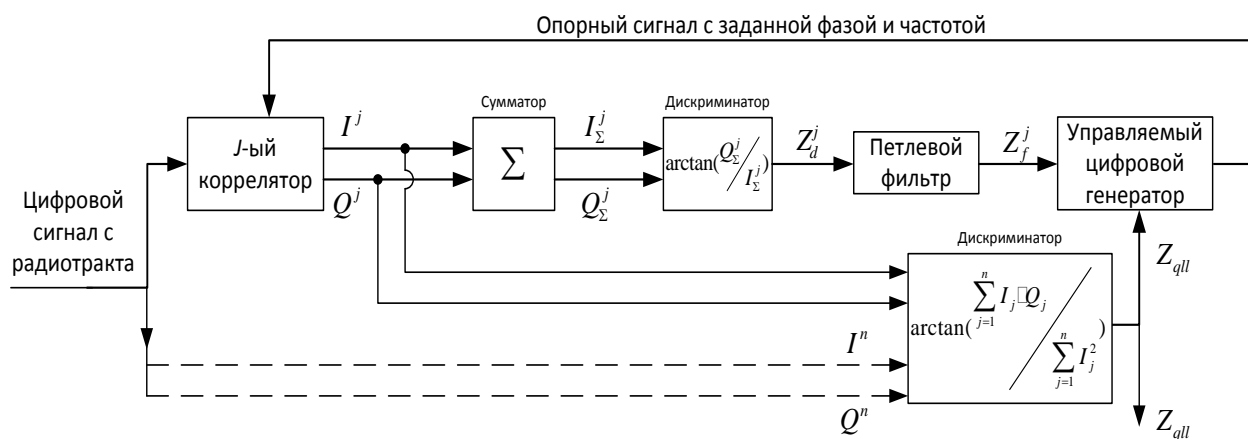


Рис. 1. Функциональная схема работы следящей системы ФАП вместе с общей широкополосной петлей.

Таким образом, общее воздействие обрабатывается с частотой формирования корреляционных компонент при использовании компенсации от общей широкополосной петли и в системе ФАП не возникает дополнительных динамических возмущений из-за

вибрации. При этом для расчета сигнала коррекции в общей петле (Z_{qll}) используется энергетика всех видимых НКА.

Экспериментальное исследование работы общей широкополосной петли

Было проведено натурное экспериментальное исследование работы навигационного приемника с общей широкополосной петлей в сравнении со стандартным приемником без общей широкополосной петли. Для тестирования были использованы навигационные приемники компании Топкон Позиционинг Системс, обладающие функциональной возможностью включения общей широкополосной петли. Тестирование проводилось на вибрационном стенде в Московском научно-исследовательском институте телевидения (МНИИТ). При этом навигационные приемники были закреплены таким образом, чтобы вибрационная нагрузка (тряска) производилась по оси чувствительности кварцевого генератора. Вибростенд и закрепленные на нем приемники представлены на рисунке 2. Также на вибростенде был закреплен инерциальный модуль, измеряющий ускорения, действующие на навигационную аппаратуру. Было проведено несколько экспериментов на вибростенде с тряской приемников по гармоническому закону с частотами от 5 до 40 Гц. При больших частотах вибрации, воздействие на систему ФАП практически не осуществляется, потому что, как правило, в современных навигационных приемниках, петлевой фильтр в ФАП имеет полосу пропускания меньше 30 Гц и вибрации на большей частоте не пропускает сама система ФАП. Спутниковая навигационная антенна при этом была вынесена на улицу и соединена с исследуемыми приемниками посредством высокочастотного кабеля. На каждой частоте вибрации с помощью инерциального модуля компании Топкон Позиционинг Системс были замерены действующие на корпус приемника ускорения по оси вибрации. При этом ось вибрации была направлена перпендикулярно к плоскости стола вибрационного стенда.



Рис. 2. Вибростенд с закрепленными приемниками

На рисунке 3 показаны ускорения по оси вибрации, воздействующие на испытываемые приемники для одного из проведенных экспериментов. Значения ускорений сняты с инерциального блока. Ускорение представлено единицах G ($\sim 9.8 \text{ м/с}^2$). По оси времени отложено время относительно начала эксперимента в секундах. Из-за технологических особенностей стенда, амплитуда колебаний с увеличением частоты снижается, поэтому ускорения уменьшаются с увеличением частоты вибрации больше 20 Гц.

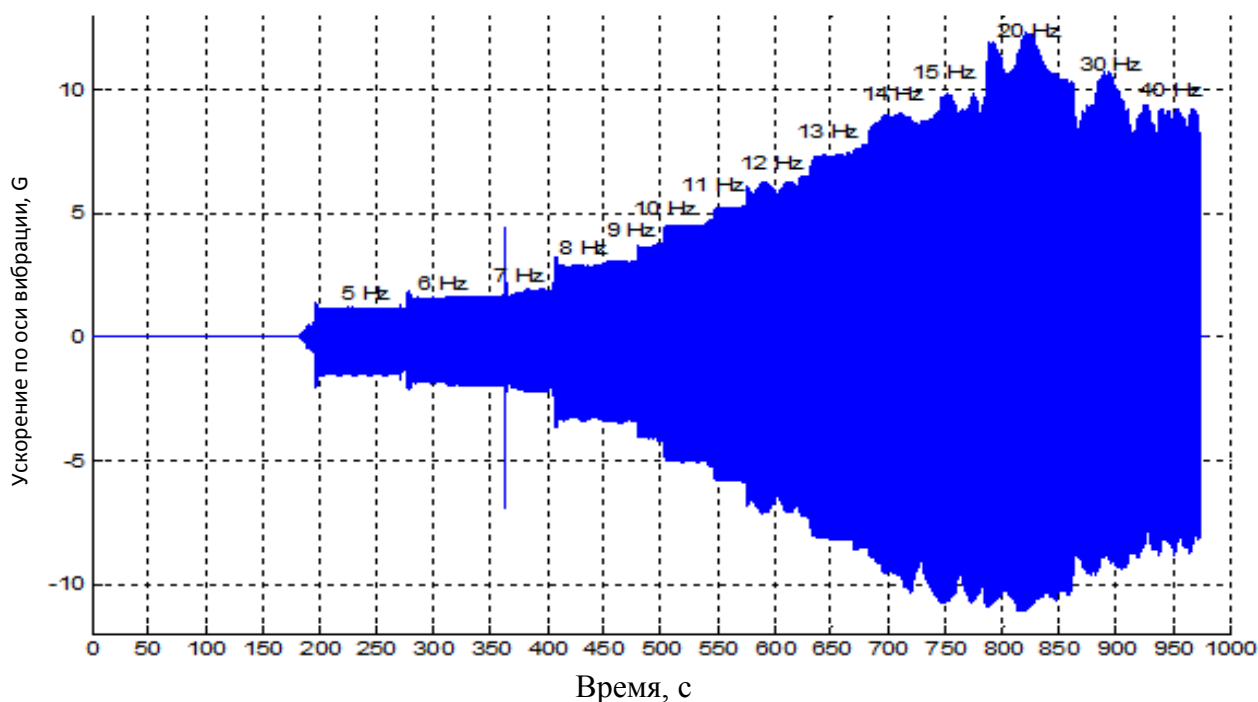


Рис. 3. Ускорения, действующие на испытываемые приемники

Критерием качества работы общей широкополосной петли было выбрано количество спутников, находящихся в слежении при воздействии различных вибрационных нагрузок. На рисунках 4 и 5 представлено количество GPS спутников для одного из экспериментов, находящихся в слежении у исследуемых приемников компании Топкон Позизионинг Системс с включенной и выключенной общей широкополосной петлей, соответственно.

Из результатов эксперимента видно, что полный срыв слежения в приемнике без общей широкополосной петли произошел при частоте вибрации 8 Гц, когда перегрузки достигли значения 3.5 G. Далее при частоте вибрации свыше 12 Гц за некоторыми спутниками начало восстанавливаться нестабильное слежение. При частоте 40 Гц устанавливается нормальное слежение. Для сравнения на рисунке 6 представлено количество спутников в слежении на базовом приемнике, который был подключен к общей антенне, но находился за пределами вибрационного стенда.

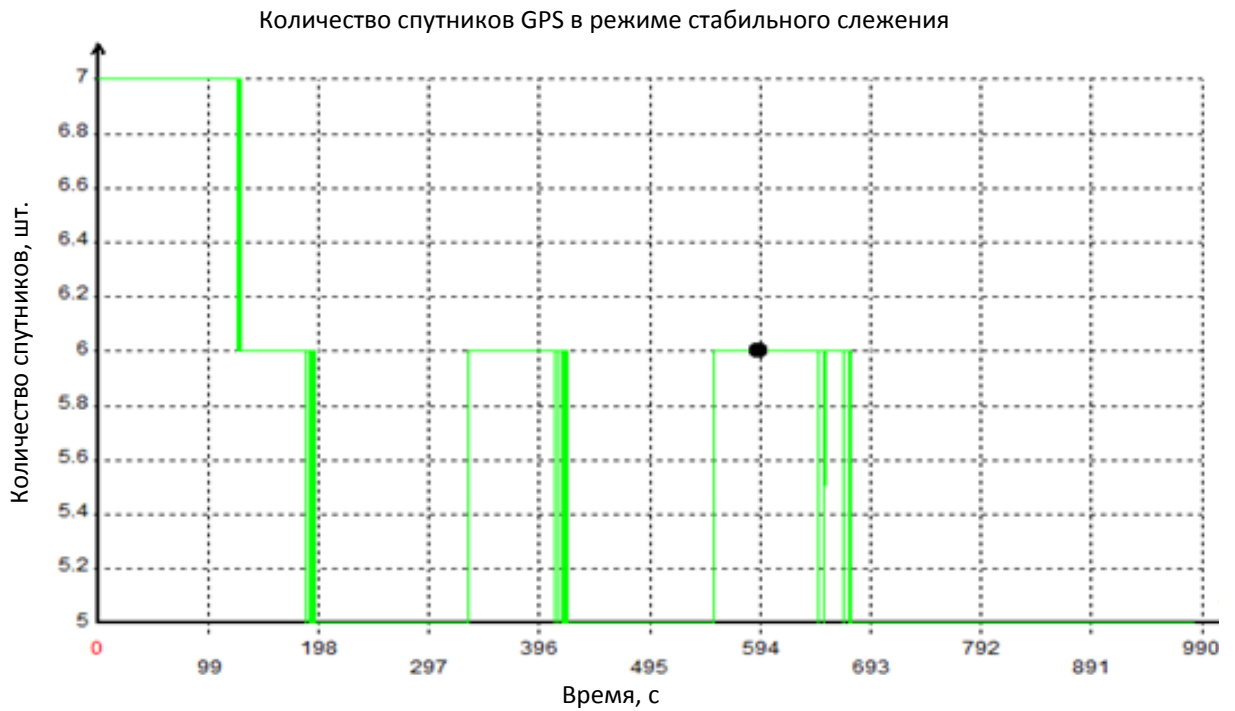


Рис. 4. Количество спутников в слежении при работе общей широкополосной петли

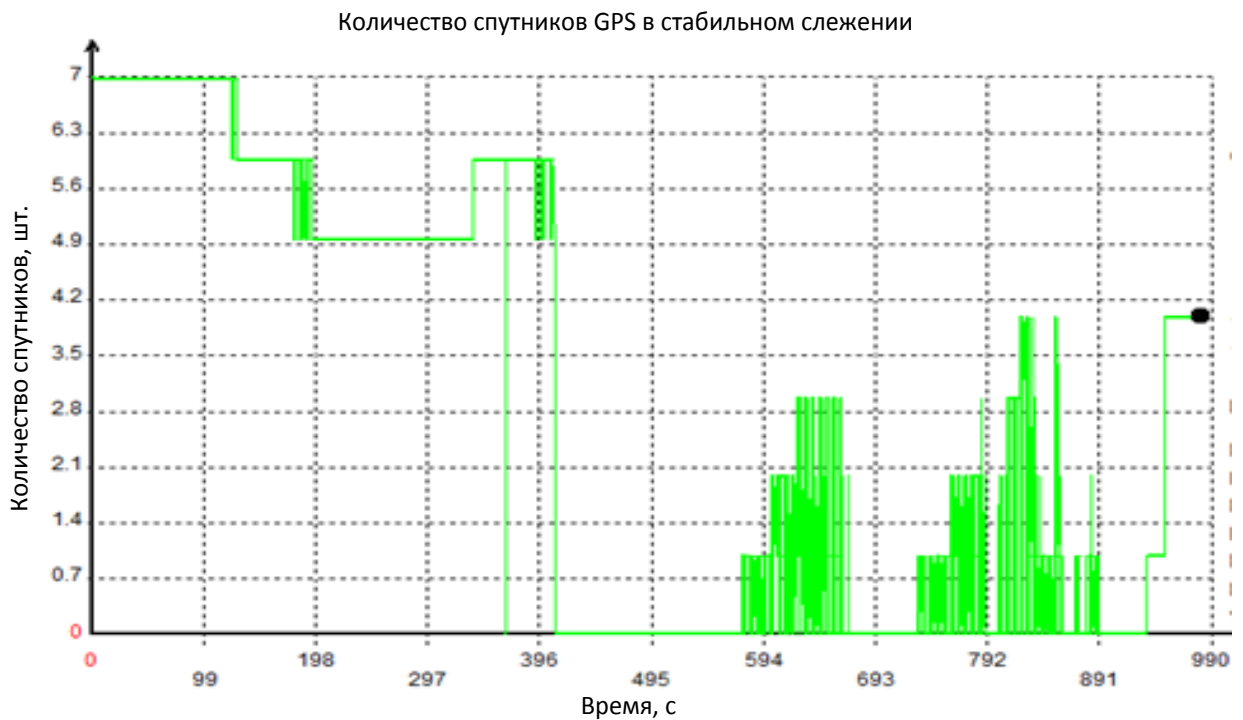


Рис. 5. Количество спутников в слежении при работе без общей широкополосной петли

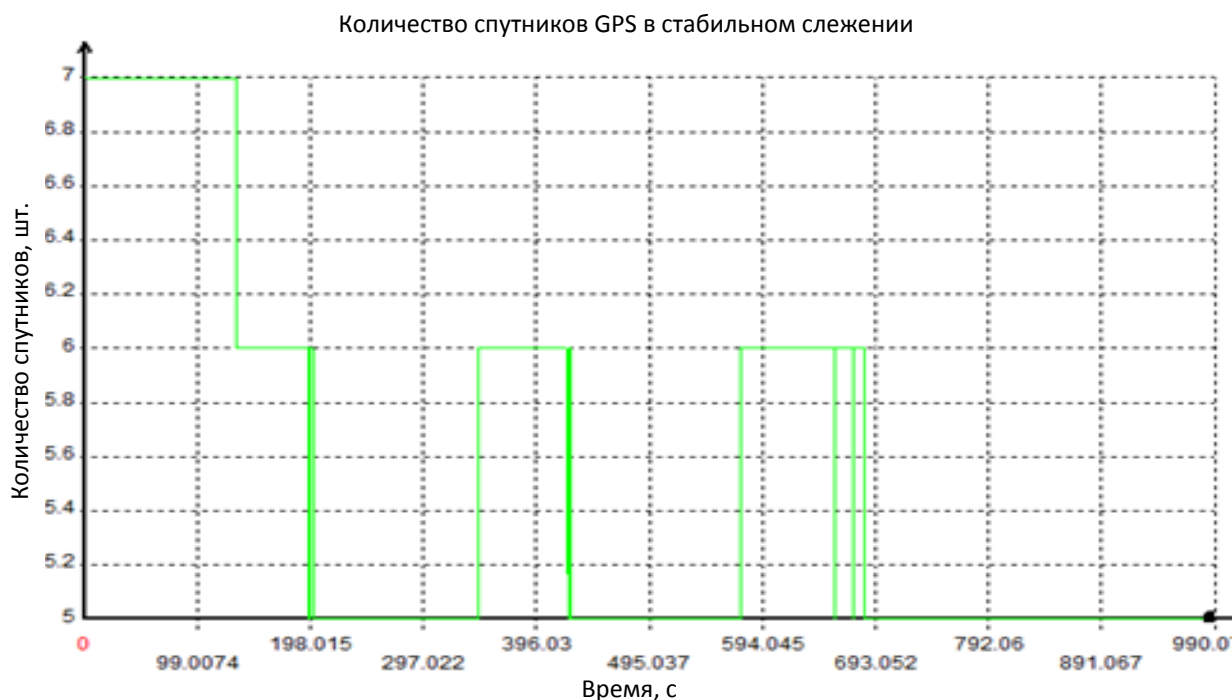


Рис. 6. Количество спутников, находящихся в слежении на приемнике, неподверженном вибрационным нагрузкам

Как видно из рисунков 4 и 6, количество НКА, находящихся в стабильном слежении на опорном приемнике и приемнике с включенной общей широкополосной петлей практически не различается. Эти приемники были подключены к одной антенне и незначительные отличия в количестве сопровождаемых НКА могут объясняться различными внутренними шумами приемников и их влиянием на «слабые» НКА. То есть приемник с общей широкополосной петлей сохранил возможность следить за НКА в стабильном режиме при воздействии такого вида нагрузок.

Заключение

Как показали результаты экспериментов на вибрационном стенде, использование предложенного в [3] алгоритма общей широкополосной петли, позволяет продолжать стабильное слежение и выполнение целевой задачи потребителя при воздействии вибрационной нагрузки на корпус навигационного приемника. Таким образом, данный метод компенсации вибрационного воздействия может с успехом использоваться в задачах управления, где происходит постоянное перемещение корпуса навигационного приемника потребителя, воздействие на него вибрации силового агрегата, резких ускорений, торможений, тряски и т.д. Однако данный метод не позволяет бороться с воздействием сильных вибраций на навигационную антенну, так как из-за различной геометрии созвездия

НКА, при тряске антенны дополнительные динамические ошибки в системах слежения уже не будут общими для всех НКА.

Библиографический список

1. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем./ Под ред. М.И. Жодзишского – Москва: МАИ-ПРИНТ, 2010.
2. QuartzCom VC-TCXO DATASHEET
<http://www.quartzcom.com/upload/cms/user/ShortformVC-TCXON.pdf> 29.12.2012
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования./Под редакцией Перова А.И., Харисова В.Н.. Издание 4-е, переработанное и дополненное – Москва: Радиотехника, 2010.
4. Global Positioning System: Theory and Applications/Edited by Parkinson B.W. and Spilker J.J Progress in astronautics and aeronautics Vol.163.Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics,Inc.370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518,1996.
5. Радиосистемы управления. / Под редакцией В.А. Вейцеля. – М.: Дрофа, 2005.
6. Радиоприемные устройства / под редакцией проф. А.П. Жуковского. – Москва: «Высшая школа», 1989.
7. Veitsel A.V., Zhodzishsky M.I., Beloglazov V.V., Veitsel V.A. Method for building a vibration-resistant navigational satellite signal receiver and a device for receiving and processing navigation signals. Russian Patent. Patent pending. Application number PCT/RU2009/000677 08.12.2009.