

УДК 621.391:621.396

ББК 39.57-5

DOI 10.51955/2312-1327_2023_2_28

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МУЛЬТИСИСТЕМНОГО GNSS ПРИЕМНИКА*

*Роман Олегович Арефьев,
orcid.org/0000-0001-8040-6470,
кандидат технических наук, доцент
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
aqua160905@mail.ru*

*Олег Николаевич Скрыпник,
orcid.org/0000-0002-2006-0428,
доктор технических наук, профессор
Белорусская государственная академия авиации,
ул. Уборевича, 77
Минск, 220096, Республика Беларусь
skripnikon@yandex.ru*

*Муслим Амирович Межетов,
orcid.org/0000-0002-9509-6169,
кандидат физико-математических наук
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал)?
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
milsumka@mail.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты исследования помехоустойчивости мультисистемного GNSS приемника ATGM336H к влиянию узкополосной помехи на частоте L1, поставленной для одной из систем (ГЛОНАСС или GPS). Выполнен обзор существующих работ по исследованию помехоустойчивости приемников спутниковой навигации. Представлена методика проведения экспериментов. В качестве источника сигнала от навигационных спутников использовался имитатор СН-3803М. Проведен анализ результатов, полученных в ходе экспериментов при воздействии узкополосной помехи различной мощности по каналам GPS и ГЛОНАСС.

Ключевые слова: GPS, ГЛОНАСС, геометрический фактор, помехоустойчивость.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T23-029).

THE RESEARCH OF THE IMMUNITY OF THE MULTISYSTEM GNSS RECEIVER*

*Roman O. Arefyev,
orcid.org/0000-0001-8040-6470,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov str.
Irkutsk, 664047, Russia
aqua160905@mail.ru*

*Oleg N. Skrypnik,
orcid.org/0000-0002-2006-0428,
Doctor of Technical Sciences, Full professor
Belarusian State Academy of Aviation,
77, Uborevich str.
Minsk, 220096, Republic of Belarus
skripnikon@yandex.ru*

*Muslim A. Mezhetov,
orcid.org/0000-0002-9509-6169,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Moscow State Technical University
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov str.
Irkutsk, 664047, Russia
milsumka@mail.ru*

Abstract. The article presents the results of a study of the noise immunity of the ATGM336H multi-system GNSS receiver to the influence of narrow-band interference at the L1 frequency set for one of the systems (GLONASS or GPS). The review of existing works on the study of noise immunity of satellite navigation receivers is carried out. The method of conducting experiments is presented. The simulator CH-3803M was used as a signal source from navigation satellites. The analysis of the results obtained during the experiments for the formulation of narrow-band interference of various capacities via GPS and GLONASS channels is carried out.

Keywords: GPS, GLONASS, dilution of precision, immunity.

Введение

Одной из особенностей развития авиационной транспортной системы в настоящее время является все более широкое применение беспилотной авиации. Это обусловлено тем, что данный вид транспортно-логистического обслуживания предоставляет различным категориям пользователей уникальные возможности по доставке почтовых отправлений, медикаментов и грузов, мониторингу объектов инфраструктуры и природы, выполнению сельскохозяйственных работ и пр., включая и такое инновационное направление, как городская аэромобильность. Быстрое развитие рынков применения, парка и технологий, связанных с беспилотной авиацией, создает серьезные и специфические проблемы для обеспечения безопасных операций в воздушном пространстве [Алгоритмы управления..., 2021]. При этом беспилотные авиационные системы (БАС) должны развиваться в соответствии с концепцией

PBN (Performance Based Navigation) ИКАО, что определяет требования к бортовым датчикам беспилотных воздушных судов (БВС) и обеспечиваемой на их основе точности выдерживания заданных траекторий полета.

Большинство БВС для определения своего местоположения используют спутниковые радионавигационные системы – GNSS (Global Navigation Satellite System), в состав которых входят ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BeiDou (Китай) и Galileo (Европейский союз). GNSS способны обеспечить высокую точность позиционирования подвижных объектов, однако им присущ ряд недостатков, основными из которых являются низкая помехоустойчивость приемников из-за крайне низкого уровня сигналов, принимаемых от навигационных спутников, высокая вероятность затенений сигналов и сбоев слежения за ними при осуществлении маловысотного полета БВС. Указанные факторы могут существенно снизить точность позиционирования БВС.

В настоящее время достаточно широкое применение находят мультисистемные GNSS приёмники, обеспечивающие работу одновременно по двум или более системам, что является эффективным способом повышения точности позиционирования, особенно при наличии затенений сигналов навигационных спутников и сбоев слежения за сигналами. При этом можно ожидать и повышение помехоустойчивости мультисистемных приемников по сравнению с односистемными [Толстиков и др., 2018; Assessing the spoofing..., 2008; Jamming mitigation..., 2017; Glomsvoll, 2014]. Однако результаты исследований этого вопроса показывают, что помехоустойчивость зависит от схемной реализации мультисистемных приемников, а именно наличия общих радиочастотных элементов в приемном тракте для приема и обработки сигналов от разных спутниковых систем. Примером может служить навигационный модуль NV08C-MCM, устанавливаемый в авиационный приемник СН-4312, работающий с системами ГЛОНАСС и GPS, блок-схема которого представлена на рисунке 1.

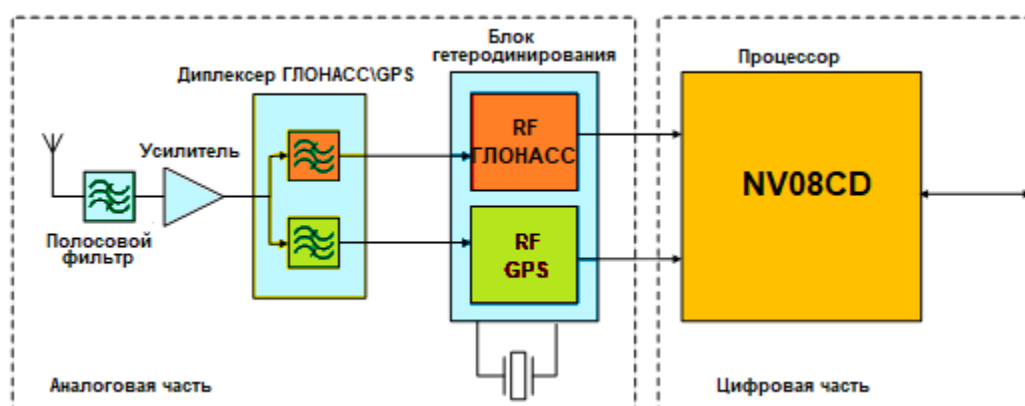


Рисунок 1 – Блок-схема приемника СН-4312

Особенностью модуля является двухканальность его аналоговой части и общий процессор первичной обработки, осуществляющий одновременную обработку сигналов от двух систем.

Проведенные эксперименты показали, что помеха, поставленная по любой из частот приёма, вызывает полное блокирование работы навигационного приёмника в мультисистемном режиме, независимо от того, на какую из систем (ГЛОНАСС или GPS) оказывается помеховое воздействие. Очевидно, что при такой схеме построения радиочастотного тракта эффект от мультисистемности приёмника может стать отрицательным, так как помеха, поступающая по любому из каналов приёма, приводит к блокированию решения задачи позиционирования. При этом, если бы использовались два отдельных приёмника, то один из них сохранил бы свою работоспособность.

В качестве второго примера рассмотрим модуль GNSS приёмника на микросхеме AT6558. Его аналоговая часть представляет собой общий преобразователь частоты, нагрузкой которого являются три фильтра, настроенные по промежуточным частотам на три спутниковые радионавигационные системы – ГЛОНАСС, GPS и BeiDou. В состав микросхемы также входят три аналого-цифровых преобразователя, осуществляющие перевод аналоговых сигналов в цифровые на соответствующих промежуточных частотах. Такая структура GNSS приёмника более помехоустойчива к узкополосным помехам, но влияние помехи, воздействующей по одному из каналов, на другие полностью не исключено. Это проявляется для помех, уровень которых значительно превышает уровень входного сигнала. В этом случае взаимное влияние каналов не так фатально, как в предыдущей схеме (NV08C-MCM), но полностью не исключено, поскольку в радиочастотном тракте используется общий смеситель, осуществляющий преобразование сигналов одновременно для всех систем.

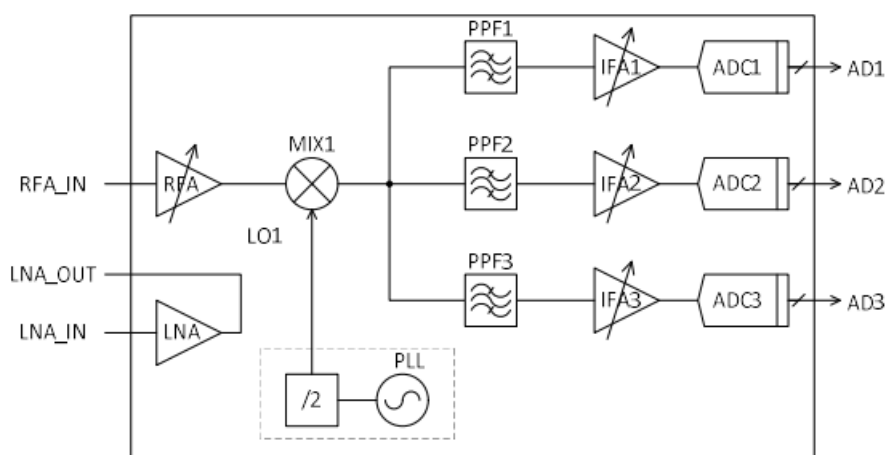


Рисунок 2 – Блок-схема радиочастотного тракта AT6558

Планами развития сигнальной структуры GNSS предполагается возможность работы приемников гражданских потребителей в двухчастотном режиме. Работа в двухчастотном режиме (в диапазонах L1/L2C, L5) накладывает некоторые особенности на работу мультисистемных приемников. Исследования показали [Glomsvoll et al., 2017], что приемники, работающие на одной частоте, являются более устойчивыми к помехам, чем многочастотные приемники. При

этом работа по ГЛОНАСС продемонстрировала лучшую помехоустойчивость, чем по GPS. По мнению авторов данного исследования, лучшим решением для обеспечения высокой точности позиционирования и высокой помехоустойчивости являются мультисистемные приемники, работающие в одночастотном режиме, например, в диапазоне L1.

Для исследования помехоустойчивости GNSS приемников используются методы математического моделирования, натурных и полунатурных экспериментов. Так в работе [Методика оценки..., 2016] представлена методика оценки помехоустойчивости перспективного GNSS приемника BBC на основе математического моделирования, где основными критериями являются вероятность срыва слежения за навигационным сигналом и среднее время до срыва слежения. В работах [Валеев и др., 2011; Туринцев и др., 2022; Евдокимов и др., 2016] представлена методика оценки помехоустойчивости GNSS приемника на основе полунатурного моделирования, где сигналы от навигационных спутников формируются имитатором сигналов. В работе [Евдокимов и др., 2016] представлена высокоточная контрольно-измерительная система, с помощью которой методами полунатурного моделирования проведены тестирования помехоустойчивости мультисистемных GNSS приемников при воздействии различных типов помех. Однако в данной работе не показано влияние узкополосных помех на решение навигационной задачи той навигационной системой, где помеха отсутствует.

В работе [Experimental Evaluation..., 2020] представлена методика эксперимента и результаты по оценке помехоустойчивости мультисистемного приемника, установленного на динамичном объекте. При этом не показана структура приемного тракта и не исследовано возможное влияние помехи на другую систему.

В статье [Borio et al., 2013] представлены исследования помехоустойчивости приемников GPS и GALILEO при воздействии узкополосных помех. Благодаря модуляции CBOC (Composite Binary Offset Carrier) сигнала GALILEO возникает возможность слежения за сигналом при воздействии помех большой мощности за счет использования петли фазовой подстройки частоты.

Ввиду того, что большинство коммерческих приемников имеют закрытую структуру, особый интерес представляет использование программно-определяемых (SDR) приемников, имеющих относительно невысокую стоимость. Благодаря настраиваемой архитектуре программно-определяемые приемники позволяют принимать и обрабатывать сигналы GNSS в реальном времени [Арефьев и др., 2022], а также дают возможность исследовать характеристики приема, обработки сигналов и позиционирования объекта. Так, например, в работе [Вознюк и др., 2016] представлены результаты исследования помехоустойчивости SDR-приемника.

Исходя из этого, в дальнейшем рассмотрим задачу исследования характеристик точности и помехоустойчивости мультисистемных GNSS приемников.

Методика проведения эксперимента

В качестве тестируемого образца использовался GNSS приемник ATGM336H, который позволяет определять координаты и скорость потребителя по системам ГЛОНАСС, BeiDou и GPS как отдельно, так и в совмещенном режиме. При работе по GPS приемник способен дополнительно принимать сигналы от функционального дополнения QZSS. В приемнике ATGM336H установлена микросхема AT6558. Основной целью экспериментов является оценка помехоустойчивости приемника GNSS при работе в совмещенном режиме ГЛОНАСС/GPS, когда узкополосная помеха устанавливается в диапазоне частот одной из систем.

Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 3 и аналогична работам [Валеев и др., 2011; Евдокимов и др., 2016]. Для создания одинаковых навигационных условий с возможностью многократного повторения экспериментов использовался имитатор сигналов СН-3803М. Имитатор СН-3803М генерировал сигналы навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS в диапазоне L1 согласно заданному сценарию, в котором приемник располагался в точке экватора с нулевыми координатами долготы и высоты. Имитатор позволяет регулировать уровень сигнала в диапазоне от -180 до -140 дБВт.

В качестве формирователя помех использовался векторный генератор PXI-5610, который позволяет создавать узкополосный помеховый сигнал с заданным уровнем на частотах спутниковых систем. Уровень сигнала на выходе генератора регулируется в диапазоне от 15 до -27 дБмВт.

Сигналы навигационных спутников и помехи поступают на антенну приемника ATGM336H. Антенна приёмника расположена рядом с антеннами генератора помехи и имитатора сигналов. Приемник отправляет выходные данные в ПЭВМ в формате NMEA с дискретностью 5 Гц.

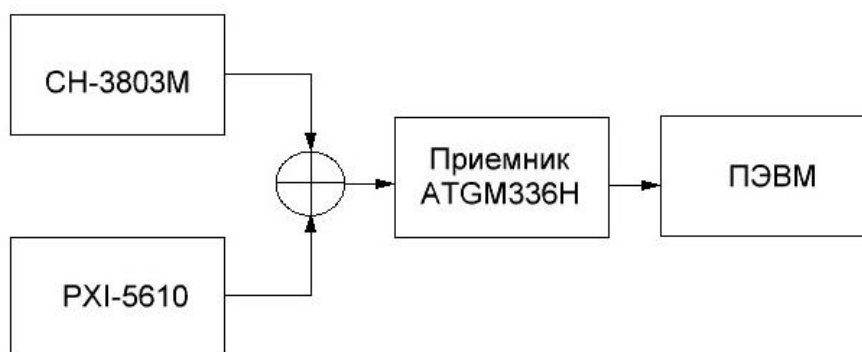


Рисунок 3 – Схема проведения экспериментов

Проверка помехоустойчивости приёмника ATGM336H проводилась для двух случаев:

1. Узкополосная помеха устанавливалась на частоте системы GPS 1,57542 ГГц, уровень помехи изменялся в диапазоне от 15 до -24 дБмВт. При этом средний уровень сигнала на выходе имитатора СН- 3803М составлял -120 дБмВт.
2. Узкополосная помеха устанавливалась на частоте нулевой литеры системы ГЛОНАСС 1,602 ГГц, уровень помехи изменялся в диапазоне от 15 до -

24 дБмВт. При этом средний уровень сигнала на выходе имитатора СН- 3803М устанавливался в диапазоне от -120 дБмВт до -127 дБмВт.

Методика обработки выходных данных приемника и расчета точностных характеристик изложена в работах [Скрыпник и др., 2019; Скрыпник и др., 2020].

Результаты экспериментов при узкополосной помехе на частоте GPS

На рисунке 4 представлены основные результаты исследований: зависимости СКО измерения координат (рис. 4 а), геометрических факторов (ГФ) (рис. 4 б) и количества НС в решении навигационной задачи (рис. 4 в) от соотношения сигнал/помеха.

Соотношение сигнал/помеха определяется по формуле:

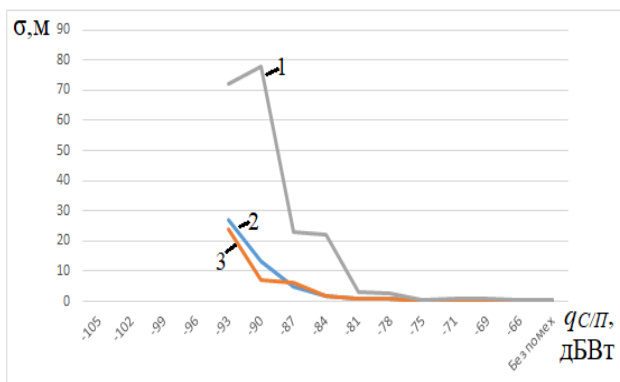
$$q_{с/п} = 10 \lg \left(\frac{P_c}{P_{п}} \right)$$

где P_c – мощность полезного сигнала (Вт); $P_{п}$ – мощность помехи (Вт).

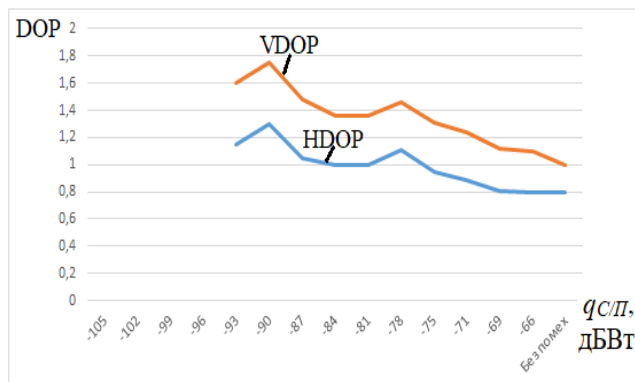
Из полученных результатов следует, что при отношении сигнал/помеха $q_{с/п} = -105$ дБВт приемник сразу теряет из решения навигационной задачи НС как системы GPS, так и системы ГЛОНАСС. При уменьшении уровня помехи с 12 до 6 дБмВт (увеличении соотношения сигнал/помеха с -102 до -96 дБВт) приемник продолжает некоторое время (от 8 до 77 сек) решать навигационную задачу, а далее происходит срыв слежения за всеми видимыми НС обеих систем.

При уменьшении мощности помехи до 3 дБмВт (повышении отношения $q_{с/п}$ до уровня -93 дБВт и выше) срыв слежения за сигналами НС не происходит, но точность определения координат значительно ухудшается (рис. 4, а). Максимальная СКО определения высоты составляет 72,2 м (кривая 1), широты – 27 м (кривая 2), долготы – 24 м (кривая 3).

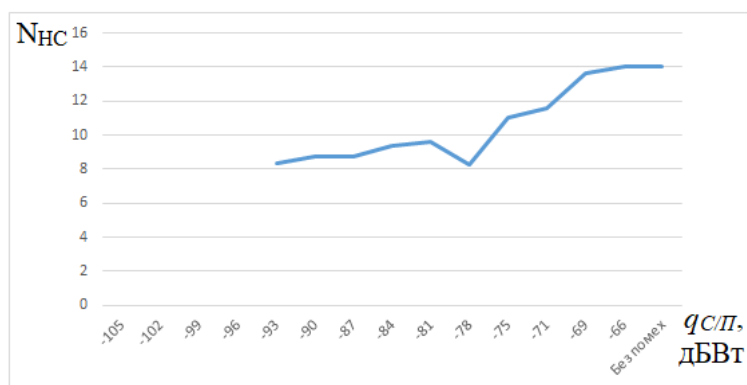
Из графиков изменения ГФ и количества НС (рис. 4 б, в) видно, что в решении навигационной задачи находятся 8 НС с периодическим переходом в режим поиска и захвата сигналов спутников GPS.



а)



б)



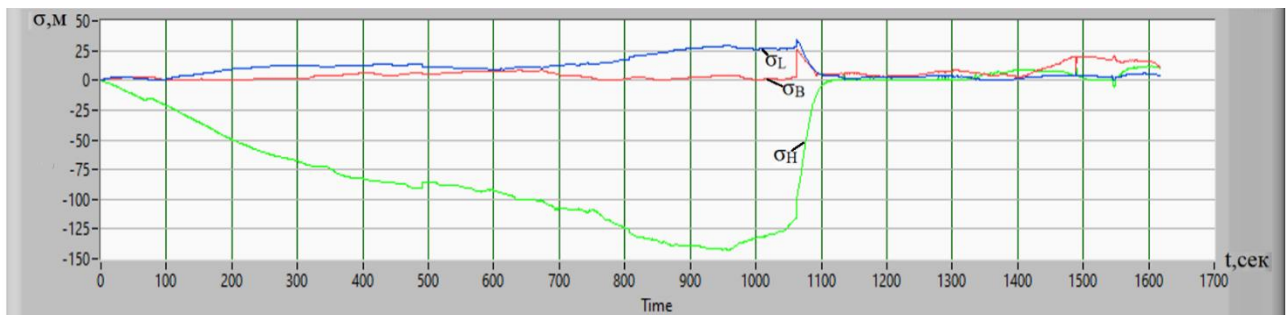
в)

Рисунок 4 – Результаты экспериментов (GPS):

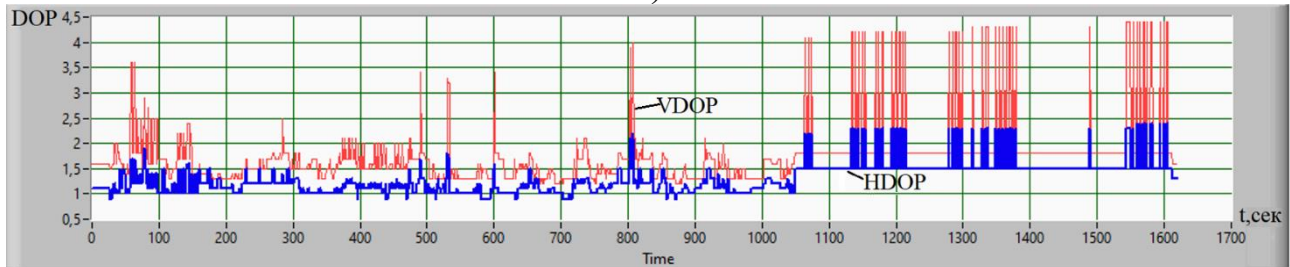
а) СКО ошибок измерения координат; б) значения ГФ; в) количество НС

На рисунке 5 представлены графики текущих ошибок измерения координат (рис. 5 а) и изменения ГФ (рис. 5 б) при отношении сигнал/помеха $q_{СП} = -90$ дБВт. Влияние узкополосной помехи приводит к значительному увеличению ошибки измерения высоты (кривая 1) и менее выраженному ухудшению точности определения горизонтальных координат (кривая 2 – широты, кривая 3 – долготы) (рис. 5 а), а также флуктуациям ГФ (рис. 5 б).

Увеличение ошибок измерения координат и флуктуации ГФ обусловлено нестабильным слежением за навигационными спутниками системы GPS. Для исключения влияния помехи по каналу GPS на интервале с 1100 по 1630 временных отсчетов приемник был переведен в режим решения навигационной задачи только по сигналам от НС ГЛОНАСС (рис. 5 а, б). Примерно через 1,5 минуты работы приемника по сигналам ГЛОНАСС СКО измерения координат стабилизировались и стали равны: по широте (σ_B) – 3,24 м, по долготе (σ_L) – 11,13 м, по высоте (σ_H) – 5,5 м. Однако влияние помехи в данном случае все еще сказывается и на работу приемника по ГЛОНАСС, поэтому наблюдаются флуктуации ГФ, но менее выраженные.



а)



б)

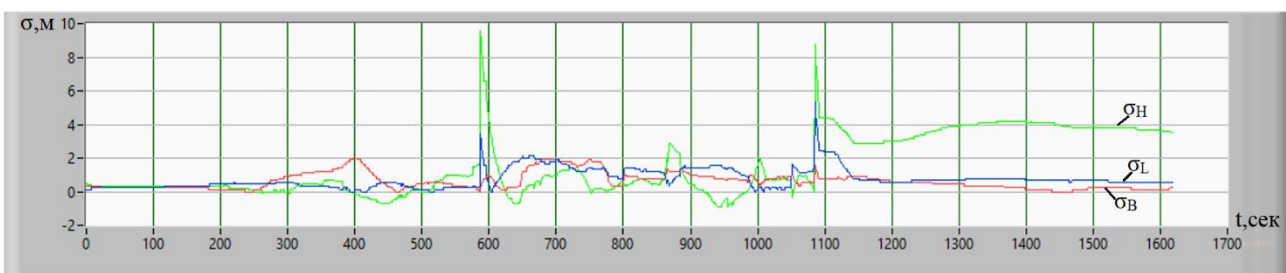
Рисунок 5 – Результаты эксперимента при $q_{СП}=-90$ дБВт:

а) значения текущих ошибок измерения координат; б) значения ГФ

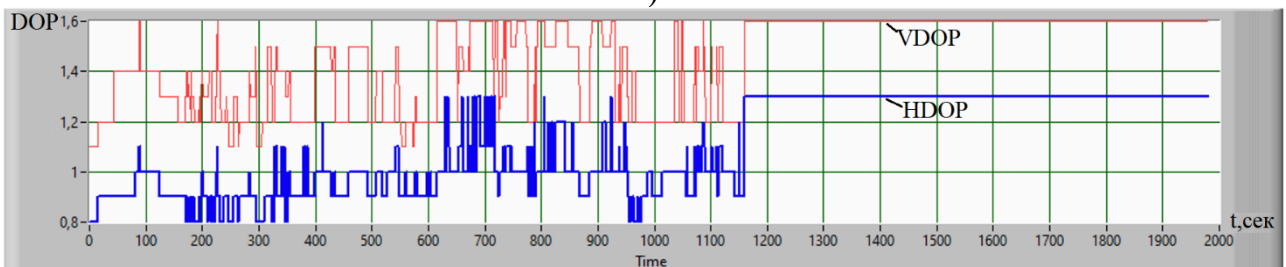
При соотношениях сигнал/помеха $q_{СП}=-87$ и $q_{СП}=-84$ дБВт наблюдаются сильные флуктуации ошибки измерения высоты, что также обусловлено нестабильным слежением за НС из-за влияния помехи.

При соотношениях $q_{СП}=-81$ и $q_{СП}=-78$ дБВт наблюдается уменьшение ошибок измерения координат и флуктуаций значений ГФ (рис. 6 а, б).

Исключение из решения навигационной задачи НС GPS приводит к уменьшению как ошибок измерения координат, так и флуктуаций ГФ. При стабильном слежении за 6-ю НС спутниками ГЛОНАСС (с 1250 отчета) СКО измерения широты составила 0,58 м, долготы – 0,34 м, высоты – 3,6 м.



а)

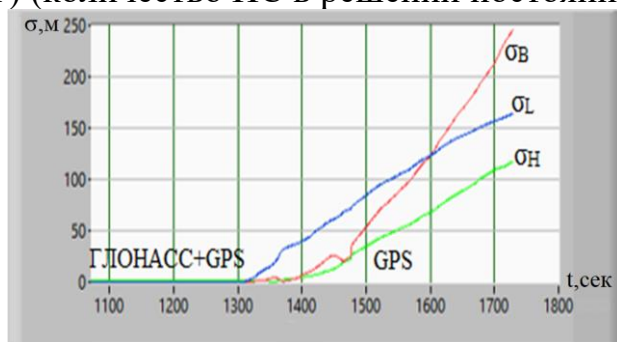


б)

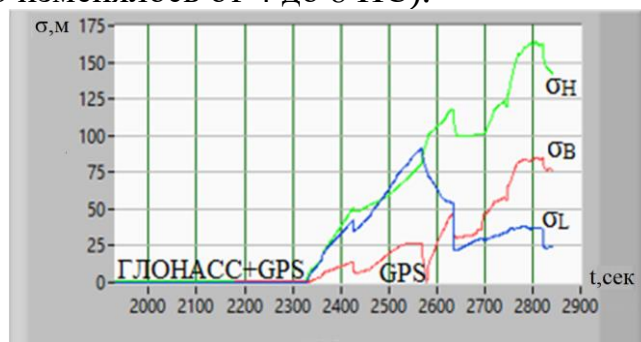
Рисунок 6 – Результаты эксперимента при $q_{СП}=-81$ дБВт:

а) значения ошибок измерения координат; б) значения ГФ

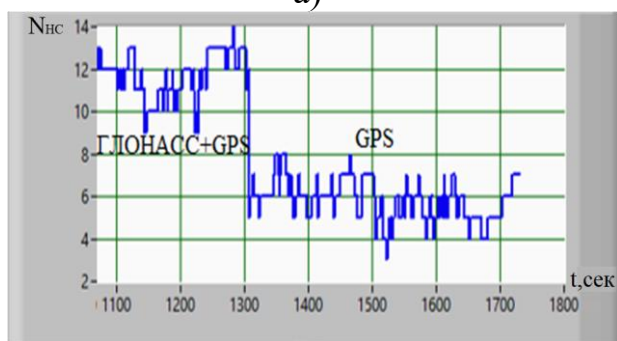
Дальнейшее уменьшение уровня помехи с -15 дБмВт (рис. 7 а, в) до -21 дБмВт (рис. 7 б, г) (соответственно $q_{СП}=-75$; $q_{СП}=-69$ дБВт) привело к улучшению точности определения координат и большему количеству НС GPS в слежении. Однако при исключении из решения навигационной задачи ГЛОНАСС (с 1250 отсчета), точность определения координат значительно ухудшилась из-за сохраняющейся нестабильности слежения за НС GPS (рис. 7 в, г) (количество НС в решении постоянно изменялось от 4 до 8 НС).



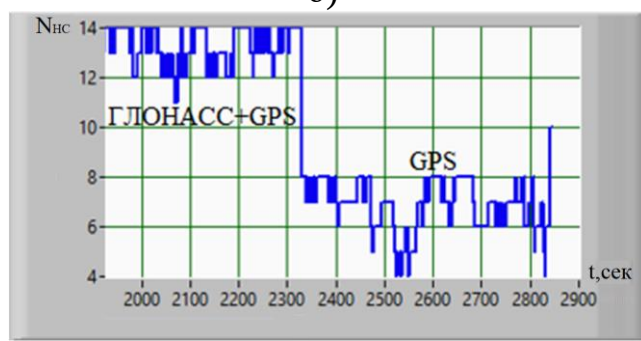
а)



б)



в)



г)

Рисунок 7 – Результаты экспериментов в режимах ГЛОНАСС/GPS и GPS:
а) мгновенные значения ошибок измерения координат при помехе -15 дБмВт;
б) ошибки измерения координат при помехе -21 дБмВт; в) количество НС в решении навигационной задачи при помехе -15 дБмВт; г) количество НС в решении навигационной задачи при помехе -21 дБмВт

В результате экспериментов было установлено, что допустимый уровень помехи, при котором обеспечивается стабильная работа приемника по системе GPS (без ГЛОНАСС), составил -24 дБмВт.

Результаты экспериментов при помехе на частоте ГЛОНАСС

Исследования помехоустойчивости приемника в условиях влияния узкополосной помехи проводились на частоте 1602 МГц при максимальном уровне помехи 15 дБмВт и уровне сигнала на выходе имитатора -120 дБмВт. При данных условиях приемник не блокируется, так как решение навигационной задачи продолжается по спутникам GPS (рис. 8). Точность позиционирования при данном уровне помехи не ухудшается ввиду стабильного слежения за НС.

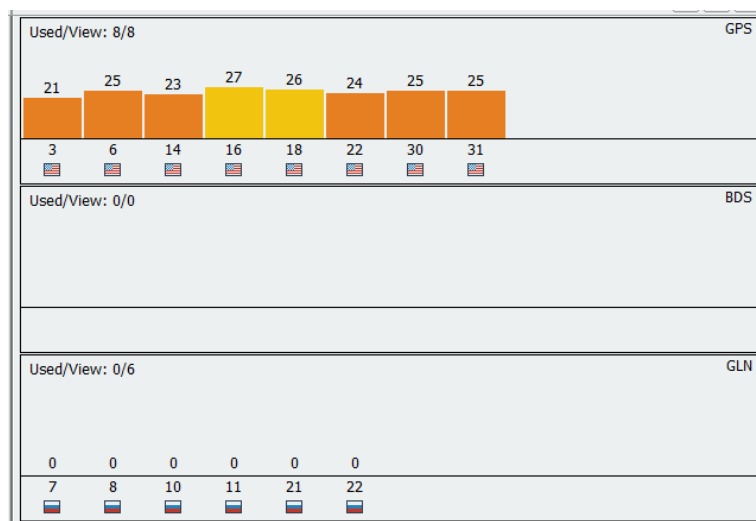


Рисунок 8 – Уровни сигнала видимых НС GPS при помехе

Для определения уровня помехи, при котором будут подавлены сигналы от НС GPS, уменьшали выходную мощность имитатора сигналов СН-3803М. В качестве критерия оценки влияния помехи по каналу ГЛОНАСС на работу канала GPS рассчитывался средний уровень сигнала со всех видимых НС GPS (1) при заданном отношении сигнал/помеха (рис. 9).

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n=8} \left(\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N=1500} P_t \right) \quad (1)$$

где: N_n – количество видимых НС GPS; N – количество временных отсчётов; P_t – уровень сигнала N_n спутника на момент времени t .

При уровне сигнала с имитатора -130дБмВт (-160 дБВт) и помехи - 15 дБмВт (отношение сигнал/помеха $q_{СП}$ -115 дБВт), сигналы от всех НС GPS были подавлены.

При $q_{СП}$ -112 дБВт (уровень сигнала имитатора равен -127 дБмВт/-157 дБВт) средний уровень сигналов от видимых НС GPS составляет 15 дБГц (рис. 9). В этом случае слежение за сигналами является нестабильным и приводит к ухудшению СКО определения координат (широты – 8,74 м, долготы – 24,86 м, высоты – 1,3 м).

При $q_{СП}$ -110 дБВт (уровень сигнала имитатора равен -125 дБмВт/-155 дБВт), так же, как и при -112 дБВт, наблюдается ухудшение точности (СКО широты 5,4 м, долготы – 10,6 м, высоты – 3,11 м).

Стабильная работа приемника по сигналам от НС GPS обеспечивается при отношении сигнал/помеха $q_{СП}$ -108дБВт, средний уровень сигналов (рис. 9) составляет 24,4 дБГц. При этом СКО определения широты составляет 0,64 м, долготы – 0,74 м, высоты – 0,46 м.

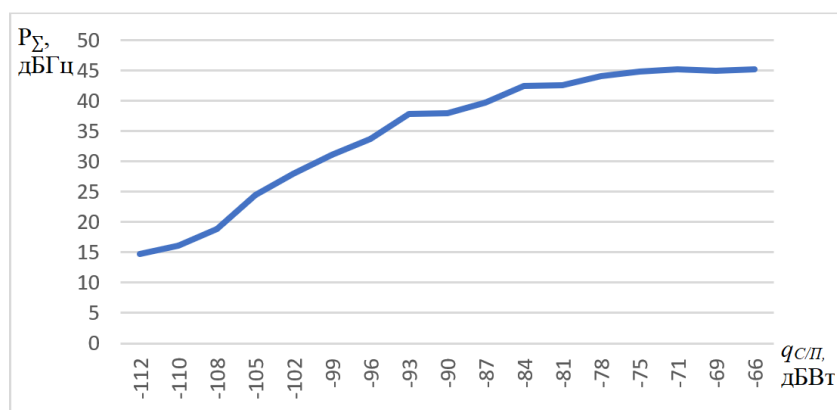


Рисунок 9 – Зависимость среднего уровня сигналов всех видимых НС GPS

Сигналы системы ГЛОНАСС были подавлены при отношении сигнал/помеха от -115 до -66 дБВт. Допустимый уровень помехи составил -27 дБмВт (при уровне -120 дБмВт с имитатора сигналов СН-3803М).

Заключение

На основании полученных результатов по исследованию помехоустойчивости GNSS приёмника ATGM336H можно заключить следующее:

1. Наличие узкополосной помехи на частоте GPS с уровнем от 6 до 15 дБмВт приводит к полному подавлению сигналов как от НС GPS, так и от НС ГЛОНАСС. Это вызвано тем, что помеха, поступая на малошумящий усилитель, из-за своего высокого уровня попадает на нелинейный участок АЧХ, что приводит к формированию дополнительных гармоник. Одна из гармоник при преобразовании частоты попадает в фильтр промежуточной частоты канала ГЛОНАСС, что и приводит к подавлению сигналов от НС данной системы. Дальнейшее уменьшение уровня помехи (с 0 до -6 дБмВт) приводит и к уменьшению уровней гармоник, поэтому подавления сигналов от НС ГЛОНАСС не происходит, но точность определения координат при этом снижается. Уровень помехи равный -9 дБмВт является допустимым, поэтому приемник продолжает решать навигационную задачу по сигналам от НС ГЛОНАСС. Допустимый уровень помехи для системы GPS составил -24 дБмВт.

2. Наличие узкополосной помехи на частоте ГЛОНАСС не приводит к подавлению сигналов от НС GPS. При этом, несмотря на частотное разделение каналов в ГЛОНАСС, все ее спутники блокируются. Допустимый уровень помехи для системы ГЛОНАСС составил -27 дБмВт.

3. Решение навигационной задачи мультисистемным приемником может быть обеспечено при наличии недопустимого уровня узкополосной помехи по одному из каналов при переходе на другую навигационную систему. В таком случае при установке приемника на транспортное средство, например БПЛА, необходимо реализовать функцию управления выбором системы GNSS.

Библиографический список

Алгоритмы управления траекториями беспилотных авиационных комплексов при полете в составе группы / А. К. Ермаков, Т. Ю. Портнова, Б. В. Лежанкин, В. В. Ерохин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIV Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 31 мая – 04 июня 2021 года. Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 62-69. EDN YIEIWM.

Арефьев Р. О. Опыт использования программно-определяемых GNSS приёмников / Р. О. Арефьев, О. Н. Скрыпник, Н. Г. Арефьева // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022. № 1. С. 88-100. DOI 10.51955/23121327_2022_1_88. EDN JTMAYO

Валеев В. Г. Экспериментальное исследование помехоустойчивости аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем / В. Г. Валеев, И. Н. Корнилов, В. Э. Иванов // Радиотехника. 2011. № 9. С. 46-51. EDN OKDLVF.

Вознюк В. В. Исследование помехоустойчивости аппаратуры потребителей глобальной навигационной спутниковой системы GPS на основе технологии программного приема / В. В. Вознюк, П. А. Маслаков, А. В. Фомин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 650. С. 33-40. EDN VRDKWL.

Евдокимов Ю. К. Исследование помехоустойчивости навигационных приемников систем GPS/ГЛОНАСС / Ю. К. Евдокимов, Р. К. Сагдиев // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х томах, Казань, 10–12 августа 2016 года. Том 1. Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2016. С. 320-324. EDN RXGUQX.

Методика оценки помехоустойчивости перспективного навигационного приемника ГНСС беспилотного летательного аппарата/ А. В. Коровин, В. А. Миронов, А. А. Новиков, [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 8. С. 1162-1171.

Скрыпник О. Н. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Арефьева // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 296-301. EDN VSQSMT.

Скрыпник О. Н. Характеристики точности мультисистемных GPS/GLONASS/Beidou приёмников / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев // Авиационный вестник. 2020. № 3. С. 26-30. EDN FGFORV.

Толстиков А. С. Противодействие спуфингу и повышение помехоустойчивости аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем / А. С. Толстиков, А. Е. Ушаков // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 9. С. 319-327. EDN VAGTEO.

Туринцев С. В. Программная реализация алгоритма кодирования и декодирования местоположения ВС в дискретно-адресном режиме вторичной радиолокации / С. В. Туринцев, М. С. Туринцева // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации : Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа, Иркутск, 13–14 октября 2022 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2022. С. 115-121. EDN YGUUUY.

Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer/ T. E. Humphreys, B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O'Hanlon, P. M. Kintner // Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, USA. 2008. P. 2314-2325.

Borio D. Jammer impact on Galileo and GPS receivers/ D. Borio, C. O'Driscoll, J. Fortuny // International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), IEEE. 2013. P. 1-6.

Experimental Evaluation of the Impact of Different Types of Jamming Signals on Commercial GNSS Receivers / H. Elghamrawy, M. Karaim, M. Tamazin, A. Noureldin // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. № 12. pp. 4240.

Glomsvoll O. GNSS jamming resilience for close to shore navigation in the Northern Sea / O. Glomsvoll, L. K. Bonenberg // *The Journal of Navigation*. 2017. V. 70. № 1. P. 33-48.

Glomsvoll O. Jamming of GPS & GLONASS signals // Department of Civil Engineering, Nottingham Geospatial Institute, 2014. 80 p.

Jamming mitigation using an improved fuzzy weighted least square method in combined GPS and GLONASS receiver / M. R. Mosavi, A. Khavari, A. Tabatabaei, M. J. Rezaei // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2017. V. 76. P. 107-116.

References

Arefyev R. O., Skrypnik O. N., Arefyeva N. G. (2022). The Experience Of Using GNSS software-defined receivers. *Crede Experto: transport, society, education, language*. № 1: 88-100. DOI 10.51955/23121327_2022_1_88. EDN JTMAYO (In Russian)

Borio D., O'Driscoll C., Fortuny J. (2013). Jammer impact on Galileo and GPS receivers. *International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, IEEE. 1-6.

Elghamrawy H., Karaim M., Tamazin M., Noureldin A. (2020). Experimental Evaluation of the Impact of Different Types of Jamming Signals on Commercial GNSS Receivers. *Applied Sciences*. 10(12): 4240.

Ermakov A. K., Portnova T. Yu., Lezhankin B. V., Erokhin V. V. (2021). Trajectory control algorithms for unmanned aircraft complexes flying in formation. *Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy : Materialy XXIV Mezhduna-rodnoj nauchnoj konferencii*. In 3-th parts, Saint-Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. 2: 62-69. EDN YIEIWM. (In Russian)

Evdokimov Yu. K., Sagdiev R. K. (2016). Research of the noise immunity of the GPS/GLONASS navigation receivers. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossijskoj aviakosmicheskoy otrasli: sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*: in 2-h volumes, Kazan: Tatarstan Academy Of Sciences: 320-324 (In Russian)

Glomsvoll O. Jamming of GPS & GLONASS signals. *Department of Civil Engineering*. Nottingham Geospatial Institute, 2014. 80 p.

Glomsvoll O., Bonenberg L. K. (2017). GNSS jamming resilience for close to shore navigation in the Northern Sea. *The Journal of Navigation*. 70(1): 33-48.

Humphreys T. E., Ledvina B. M., Psiaki M. L., O'Hanlon B. W., Kintner P. M. (2008). Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer. *Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. 2314-2325.

Korovin A. V., Mironov V. A., Novikov A. A., Truscinskiy A. Yu., Fateev Y. L. (2016). The noise stability estimating method of perspective navigation receiver GNSS un-manned aerial vehicle. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 9(8): 1162-1171. (In Russian)

Mosavi M. R., Khavari A., Tabatabaei A., & Rezaei M. J. (2017). Jamming mitigation using an improved fuzzy weighted least square method in combined GPS and GLONASS receiver. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 76: 107-116.

Skrypnik O. N., Arefyev R. O., Arefeva N. G. (2019). Estimation of positioning error characteristics of combined GLONASS / GPS receivers. *Modern high technologies*. 10-2: 296-301. (In Russian)

Skrypnik O. N., Arefyev R. O. (2020). Accuracy characteristics of multi-system GPS/GLONASS/Beidou receivers. *Nauchno-prakticheskij zhurnal aviacionnyj vestnik*. 3: 26-30. (In Russian)

Tolstikov A. S., Ushakov A. E. (2018). Countering spoofing and improving the noise immunity of coordinate-time definitions of GNSS technologies. *Interespo Geo-Sibir'*. 9: 319-327. (In Russian)

Turintsev S. V., Turintseva M. S. (2022). Software implementation of the algorithm for coding and decoding the location of the target in the discrete-address mode of secondary radiolocation. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii: Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoj*

nauchno-prakticheskoy konferencii. posvyashchennoj prazdnovaniyu 100-letiya konstruktorskogo byuro "Tupolev", 55-letiya Irkutskogo filiala MGTU GA, 75-letiya Irkutskogo aviacionnogo tekhnicheskogo kolledzha. Irkutsk: Irkutsk branch Moscow State Technical University of Civil Aviation. 115-121. EDN YGUUUY. (In Russian)

Valeev V. G., Kornilov I. N., Ivanov V. E. (2011). Experimental survey of noise immunity of user equipment of satellite radio navigation systems. Radioengineering. 9: 46-51 (In Russian)

Voznuk V. V., Maslakov P. A., Fomin A. V. (2016). The research of the noise immunity of users' GPS equipment based on the SDR technology. Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni AF Mozhajskogo. Saint-Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy. 650: 33-40. (In Russian)