

УДК 621.391:621.396

ББК 39.57-5

C458

О. Н. Скряпник

Иркутск, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ ТОЧНОСТИ
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ МЕТОДАМИ
ПОЛУНАТУРНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В работе методами полунатурного и математического моделирования проведены исследования характеристик навигационно-временного поля, создаваемого спутниковыми системами навигации ГЛОНАСС, GPS и совмещённой системой. Полунатурные эксперименты проведены с использованием программно-аппаратного комплекса в составе имитатора СН-3803М и авиационного приемника СН-4312. Показаны проблемы использования совмещенных приемников. На основе разработанной в среде LabView программы предложена методика построения полей точности ГЛОНАСС в горизонтальной и вертикальной плоскостях по значениям геометрических факторов.

Ключевые слова: спутниковая система навигации, GPS, ГЛОНАСС, геометрический фактор, навигационно-временное поле, моделирование, точность.

O. N. Skrypnik

Irkutsk, Russia

**RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF THE SATELLITE NAVI-
GATION SYSTEM PRECISION FIELDS BY HIL-SIMULATING
AND MATHEMATICAL MODELING**

By HIL-simulating and mathematical modeling the author researched the characteristics of a navigation and timing field created by the GLONASS, GPS satellite

navigation systems and the combined system. HIL-simulation experiments were carried out using the hardware and software of CH-3803M simulator and CH-4312 aircraft receiver. The problems of using integrated receivers are revealed. On the basis of a program developed in LabVIEW environment the technique of constructing the fields of GLONASS precision in the horizontal and vertical planes using the values of the geometrical factors is proposed.

Keywords: satellite navigation system, GPS, GLONASS, geometrical dilution of precision, navigation and timing field, modelling, precision.

Современный этап развития технологий и процедур организации воздушного движения, используемых в гражданской авиации, базируется на широком использовании спутниковых систем навигации (ССН). Применение ССН позволяет повысить эффективность аэронавигационного обеспечения воздушных судов (ВС) за счёт предоставления экипажам более точной и надежной информации о местоположении и параметрах движения ВС на всех этапах полета и в глобальном масштабе. При этом существует достаточно большое количество воздушных трасс (трансокеанические, трансполярные и кроссполярные), на которых ССН является единственным средством получения высокоточной навигационной информации.

Точность ССН зависит от ряда факторов, основными из которых являются: качество эфемеридного обеспечения, условия распространения радиосигналов по трассам навигационного спутника (НС) – потребитель, качество приемного устройства. Важнейшую роль при этом играют и характеристики создаваемого ССН навигационно-временного поля (НВП), которое зависит от количества наблюдаемых НС и их положения относительно потребителя (геометрический фактор (ГФ) системы) [Скрыпник, 2014].

Для проведения экспериментальных исследований точности и характеристик НВП ССН был создан программно-аппаратный комплекс в составе платформы National Instruments, имитатора сигналов CH-3803M, авиационного при-

емника СН-4312 и интерфейса его сопряжения с ПЭВМ для автоматизации процесса измерений и их статистической обработки (рис. 1).

Уникальность комплекса состоит в анализе НВП ССН по информации, формируемой на выходе реальных ГЛОНАСС/GPS приемников, что позволяет оценивать влияние используемых в них программных и аппаратных решений на качество предоставляемой информации [Скрыпник, Нечаев, Арефьев, 2014].

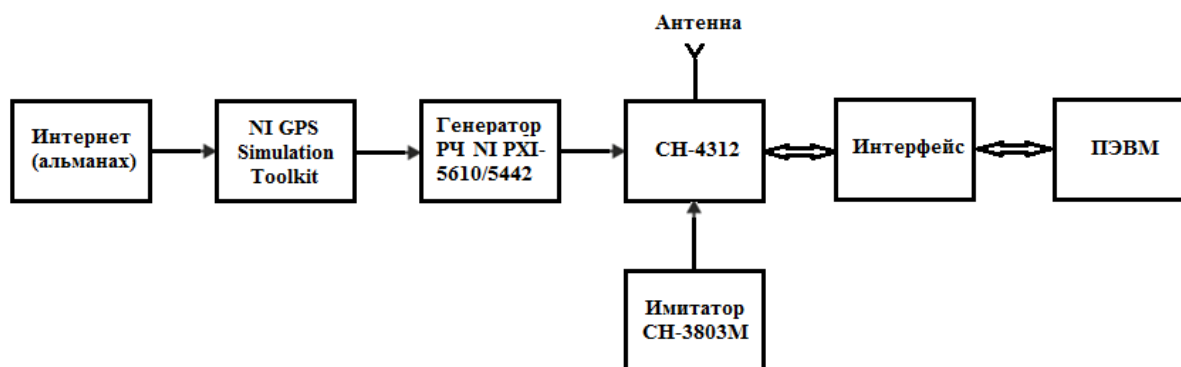


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Внешний вид программно-аппаратного модуля, используемого для проведения натуральных и полунатурных экспериментов, показан на рис. 2.



Рис. 2. Программно-аппаратный модуль

Комплекс позволяет проводить натурные и полунатурные эксперименты по оценке характеристик навигационно-временного поля спутниковых систем навигации ГЛОНАСС, GPS и совмещенной системы ГЛОНАСС/GPS.

Для исследования характеристик НВП и условий навигационного сеанса ГЛОНАСС в среде графического программирования Labview был разработан также и программный модуль. Модуль обеспечивает: моделирование орбиталь-

ного движения спутниковой группировки ГЛОНАСС по данным действующего альманаха системы; определение НС, находящихся в зоне видимости; расчет и отображение графиков изменения ГФ в любой заданной точке траектории движения ВС для любых заданных интервалов времени [Скрыпник, Арефьев, Арефьева, Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ RU 2016617951 от 19.07.2016].

Структурная схема программного модуля представлена на *рис. 3*.

Терминал обработки альманаха ГЛОНАСС предназначен для преобразования файла альманаха ГЛОНАСС, взятого с веб-сайта Информационно-аналитического центра (ИАЦ) ГЛОНАСС [4], к нужному формату.

Терминал расчета движения орбитальной группировки ГЛОНАСС использует алгоритм, реализованный на основе интерфейсного контрольного документа ГЛОНАСС [5].



Рис. 3. Структурная схема программного модуля

Панель управления и отображения информации программного модуля представлена на *рис. 4*.

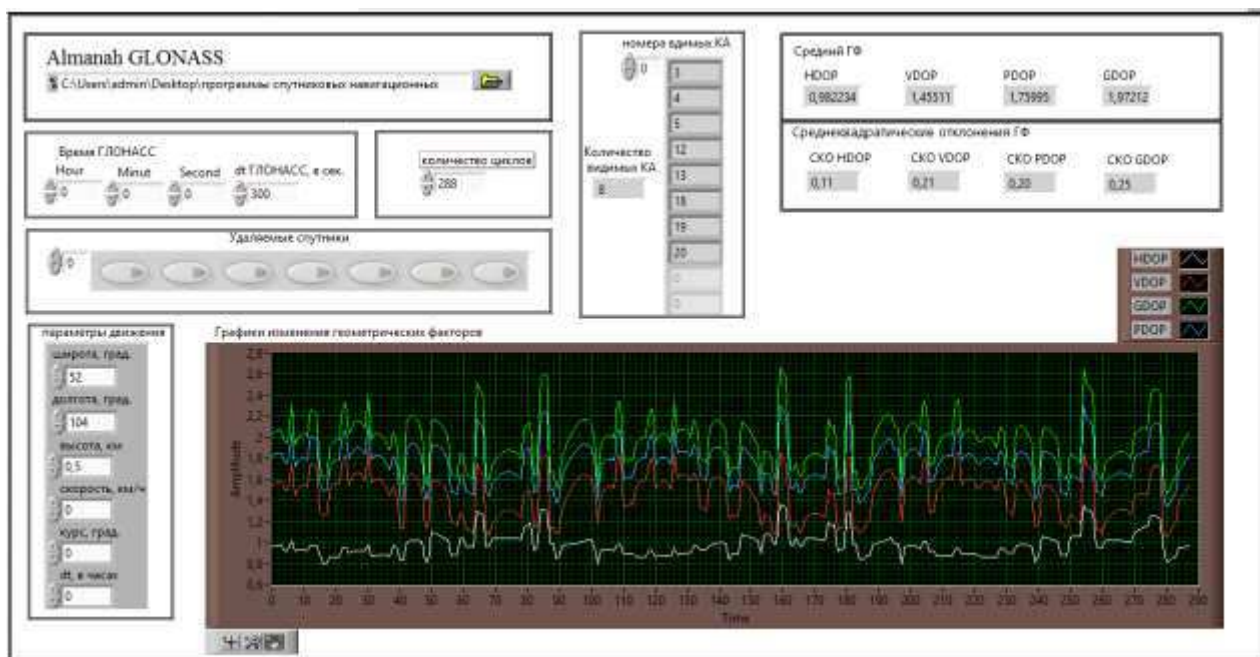


Рис. 4. Панель управления программного модуля

Путь к файлу с альманахом указывается в окне «Almanah GLONASS». Элемент управления «Время ГЛОНАСС» устанавливает начальное время ГЛОНАСС с шагом dt . Начальные параметры движения ВС устанавливаются на панели «Параметры движения». Кнопки «Удаляемые спутники» необходимы для исключения спутников из рабочего созвездия.

На панели отображаются графики изменения ГФ, количество и номера видимых НС, средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) значений ГФ на интервале наблюдения. Архитектура модуля является гибкой и может использоваться для создания более сложных моделирующих комплексов.

Адекватность полунатурного моделирования была подтверждена сопоставлением результатов натуральных и полунатурных экспериментов, полученных для вертикального VDOP и горизонтального HDOP геометрических факторов. Результаты экспериментов представлены на рис. 5, где кривые 1 соответствуют натурному эксперименту, кривые 2 – полунатурному эксперименту.

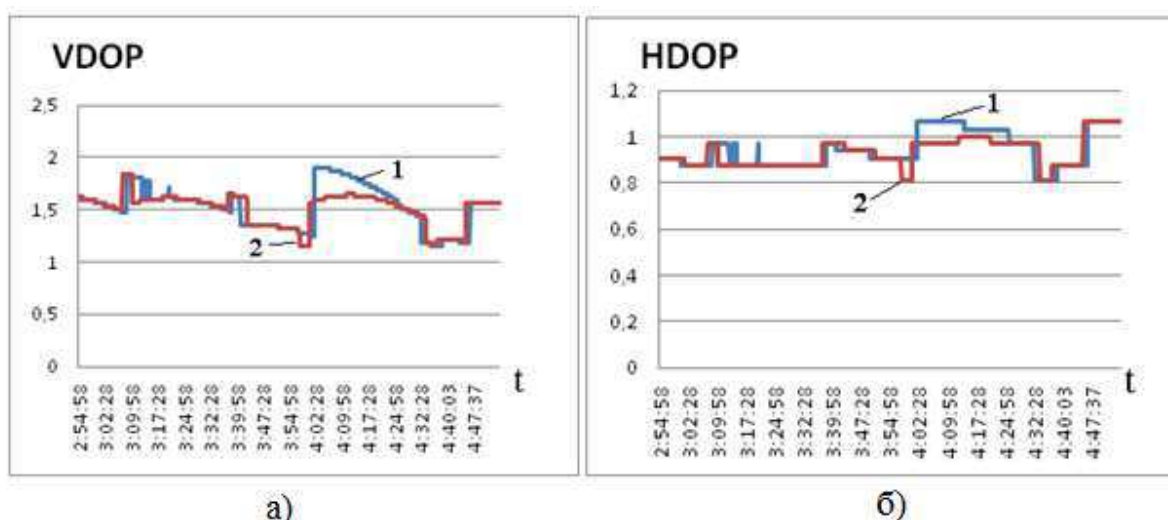


Рис. 5. Геометрический фактор: а – вертикальный; б – горизонтальный

Полученные результаты показали полную адекватность полунатурного моделирования в плане соответствия формируемых имитатором СН-3803М условий навигационного сеанса (значений ГФ, состава НС, находящихся в зоне радиовидимости) данным натурных экспериментов и приемлемую – в плане соответствия погрешностей определения координат.

Адекватность программного модуля ГЛОНАСС была проверена путем сопоставления его выходных данных (номера НС, находящиеся в зоне видимости; границы и продолжительность интервалов времени нахождения НС в зоне видимости; значения ГФ) с данными, полученными при натурном эксперименте с приемником СН-4312, расположенным в точке с координатами $H = 503,18$ м, $B = 52^{\circ}15'25,8''$, $L = 104^{\circ}21'22,1''$, с данными, формируемыми средой создания сценариев имитатора СН-3803М, а также с данными ИАЦ ГЛОНАСС [Скрыпник, Арефьев, Астраханцева, 2015]. Натурный эксперимент проводился 26.02.2015 г. на интервале времени 05:00–11:00 UTC. Для этих же условий проводилось математическое моделирование.

На рис. 6 показаны графики изменения HDOP (рис. 6, а) и VDOP (рис. 6, б), полученные при проведении натурного эксперимента (кривые 1) и путем математического моделирования (кривые 2).

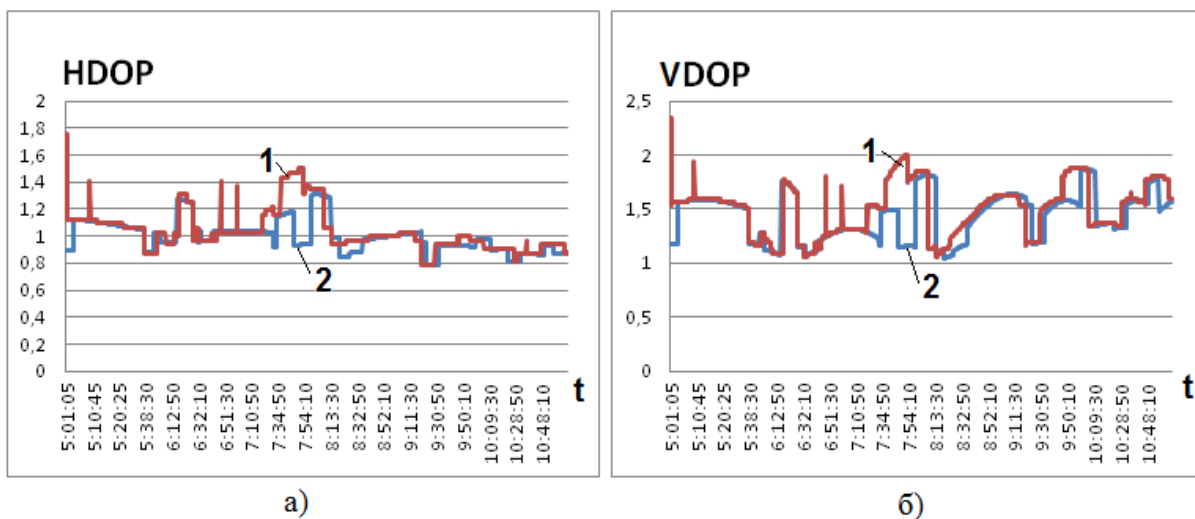


Рис. 6. Изменение ГФ на исследуемом интервале времени:

а – горизонтальный ГФ; б – вертикальный ГФ

Проведенные эксперименты показали хорошее соответствие результатов натурального эксперимента и математического моделирования, что говорит об адекватности разработанного программного модуля ГЛОНАСС. Некоторые несовпадения значений ГФ связаны с неустойчивым слежением приемника СН-4312 за сигналами НС в отдельные интервалы времени. Также обеспечивалось полное соответствие выходных данных разработанной модели с данными, формируемыми имитатором СН-3803М и данными ИАЦ ГЛОНАСС.

Как показывают эксперименты, в ряде случаев на интервале наблюдения имеют место значительные вариации значений ГФ, в большей степени – VDOP. Следовательно, точность ССН будет также изменяться в течение времени и в разных точках маршрута полета ВС. Поскольку ГФ является изменяющейся, но детерминированной функцией, его можно рассчитать в любой точке земной поверхности и для любого момента времени при известном альманахе системы. Это позволило разработать методику прогноза и построения полей точности ГЛОНАСС в вертикальной и горизонтальной плоскостях для заданных моментов времени в заданных областях воздушного пространства на основе вычисления значений ГФ [Скрыпник, Арефьев, Астраханцева, 2015].

На рис. 7 и рис. 8 показаны построенные для маршрута полета Иркутск–Москва поля точности ГЛОНАСС в цветовом представлении, соответствующем

интервальным значениям ГФ. В модели орбитального движения использовался альманах ГЛОНАСС по состоянию на 02.03.2015 г. Моделирование проводилось для интервала времени с 0:00 до 06:00 UTC.

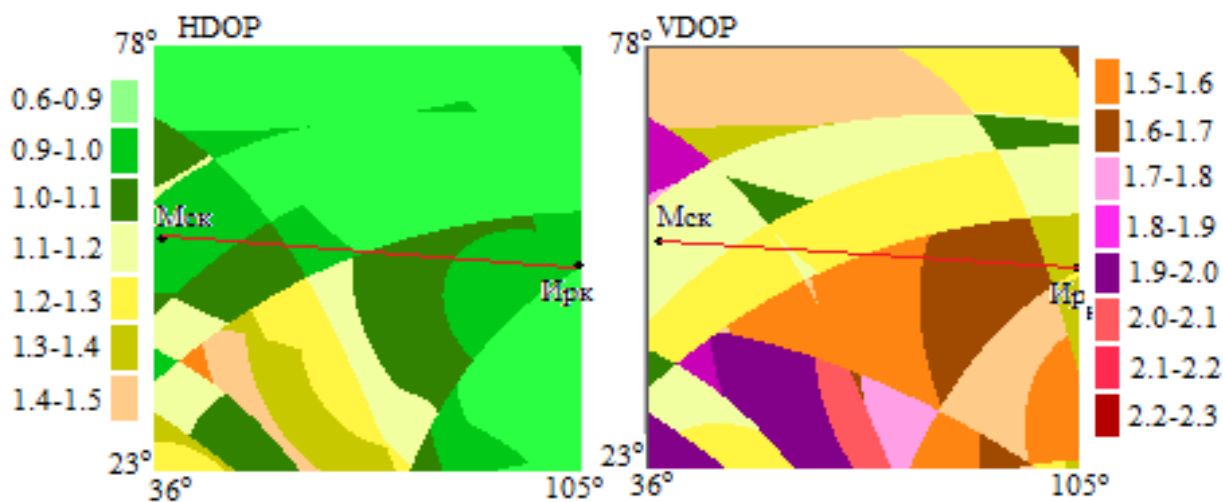


Рис. 7. Поля точности ГЛОНАСС в 0:00 UTC

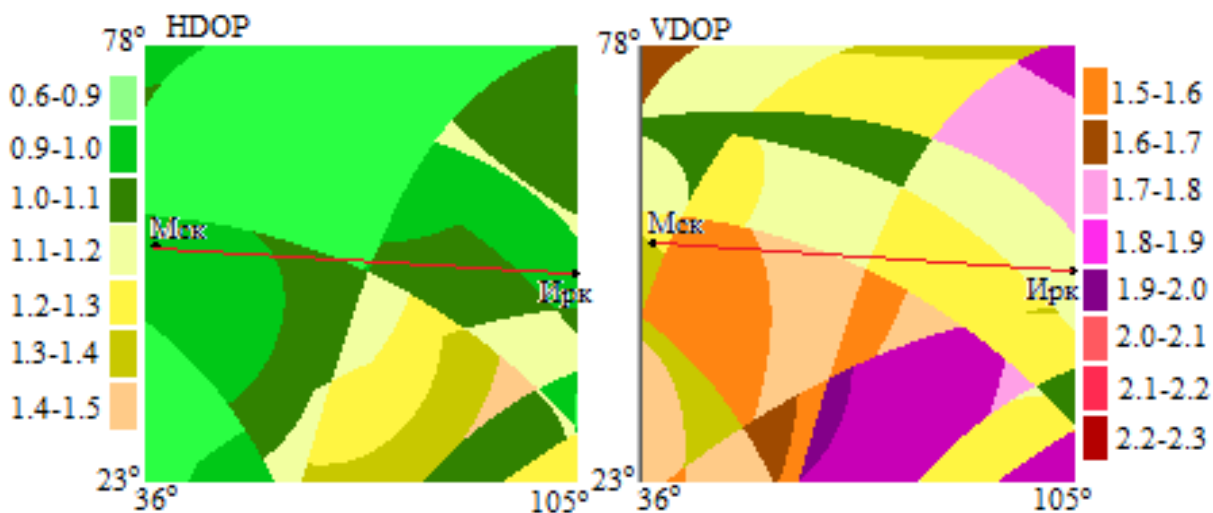


Рис. 8. Поля точности ГЛОНАСС в 06:00 UTC

Как видно из полученных результатов, поля точности динамичны, причем поле точности в вертикальной плоскости менее однородно. Предложенная методика и алгоритм прогнозирования и построения полей точности ГЛОНАСС может использоваться в вычислителе бортовой системы самолетовождения для повышения уровня ситуационной осведомленности экипажей об аэронавигационной обстановке в предоставляемом воздушном пространстве при использовании технологий зональной навигации и свободной маршрутизации.

В настоящее время выпускаются приемники ССН, позволяющие принимать и обрабатывать сигналы от систем ГЛОНАСС и GPS как одновременно (совмещенный режим), так и отдельно по выбираемой пользователем системе. Известно, что работа приемника ССН в совмещенном режиме обеспечивает меньшие значения как горизонтального (HDOP), так и вертикального (VDOP) геометрических факторов [Соловьев, 2000]. Можно предположить, что и точность навигационных определений при работе приемников в совмещенном режиме будет выше, чем при работе по отдельным системам.

Однако ГЛОНАСС и GPS отличаются принципами разделения каналов (соответственно частотное и кодовое разделение), что может привести к некоторым особенностям работы совмещенных приемников ССН. Так, например, сигналы ГЛОНАСС обладают большим, чем GPS, уровнем внутрисистемных шумов, что приводит к ухудшению их помехоустойчивости [Соловьев, 2000].

Полунатурный эксперимент по оценке характеристик приемника СН-4312 проводился для точек с координатами $59,87^{\circ}$ с.ш., $111,03^{\circ}$ в.д. (аэродром Талакан, UTC+10) и $67,43^{\circ}$ с.ш., $86,62^{\circ}$ в.д., (аэродром Игарка, UTC+8).

Эксперименты проводились на дату 05.11.2014 г. на интервале времени 5 ч, начало которого соответствовало 9:00 местного времени. На эту дату использовались по целевому назначению 24 НС ГЛОНАСС и 31 НС GPS.

В *табл. 1* приведены минимальные, максимальные и усредненные по всему объему выборки на исследуемом интервале времени значения ГФ при работе приемника по ГЛОНАСС, по GPS и в совмещенном режиме.

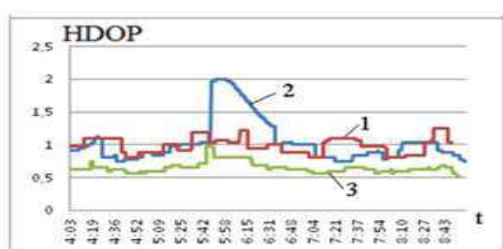
Как видно из приведенных в таблице данных, работа в совмещенном режиме в среднем примерно в 1,5 раза уменьшает как горизонтальный, так и вертикальный ГФ.

Таблица 1. Значения геометрических факторов

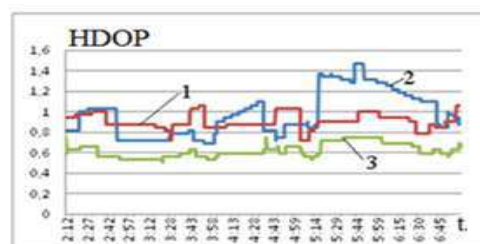
		HDOP- min	HDOP- max	HDOP _{сред} н.	VDOP- min	VDOP- max	VDOP _{сред} н.
Игарка	ГЛОНАСС	0,75	1,1	0,906	1,0	2,0	1,512
	GPS	0,75	1,5	0,978	1,0	3,7	1,793
	ГЛОНАСС/GPS	0,5	0,75	0,621	0,7	1,5	1,052

Талакан	ГЛОНАСС	0,8	1,25	1,036	1,0	2,1	1,437
	GPS	0,75	2,0	0,986	0,9	3,75	1,465
	ГЛОНАСС/GPS	0,5	0,95	0,651	0,6	1,5	0,891

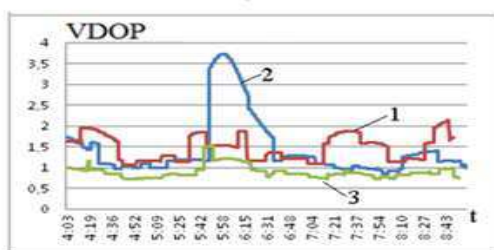
Результаты экспериментов представлены на *рис. 9* (Игарка) и *рис. 10* (Талакан) (кривые 1 – работа по ГЛОНАСС; 2 – по GPS; 3 – ГЛОНАСС/GPS). На *рис. 9, в* и *рис. 10, в* показаны графики изменения мгновенных ошибок измерения высоты [Скрыпник, Нечаев, Арефьев, Астраханцева, 2015; Скрыпник, Арефьев, Астраханцева, 2015].



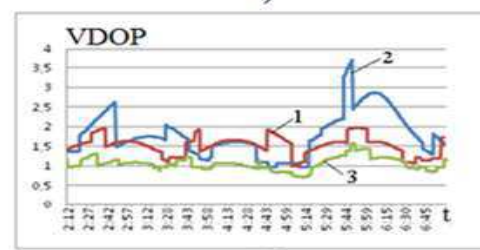
а)



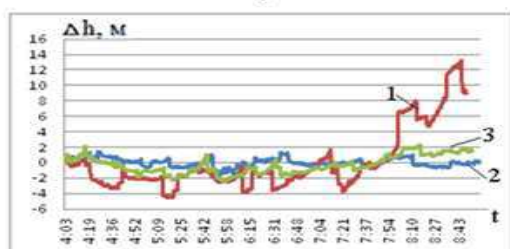
а)



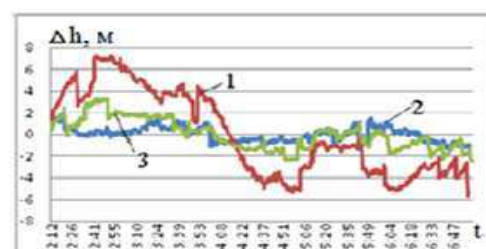
б)



б)



в)



в)

Рис. 9. Результаты экспериментов – аэродром Игарка

Рис. 10. Результаты экспериментов – аэродром Талакан

ГЛОНАСС, несмотря на значительно меньшее количество НС в орбитальной группировке, в целом обеспечивает в обоих пунктах, расположенных в высоких широтах, лучшие по ГФ условия навигационного сеанса, чем GPS. При этом следует отметить достаточно значительное ухудшение геометрического фактора GPS на отдельных интервалах времени.

Так, явно выраженный неблагоприятный для работы GPS по величине ГФ интервал времени в обоих пунктах наблюдался с 5:40 до 6:40 UTC. При этом работа в совмещенном режиме демпфировала ухудшение ГФ GPS, обеспечивая наилучшие и достаточно стабильные условия навигационного сеанса.

Анализ результатов исследования ошибки определения высоты приемником СН-4312 показывает, что, несмотря на меньшее значение VDOP по условиям навигационного сеанса, точность измерения высоты по ГЛОНАСС хуже, чем по GPS. Мгновенные значения погрешности измерения высоты приемником СН-4312 при работе по ГЛОНАСС (Игарка) достигают 7,5 м (при работе по GPS – до 2 м). При работе в совмещенном режиме ГЛОНАСС/GPS мгновенные погрешности измерения высоты достигают 3 м.

Рассчитанная по всей выборке измерений на исследуемом интервале времени точность измерения высоты, характеризуемая СКО, составила: аэродром Игарка – 0,68 м (GPS), 3,89 м (ГЛОНАСС) и 1,41 м (ГЛОНАСС/GPS); аэродром Талакан – 0,53 м (GPS), 3,94 м (ГЛОНАСС) и 1,19 м (ГЛОНАСС/GPS). При этом работа по совмещенной группировке обеспечивает близкую к GPS точность измерения высоты.

Особо следует отметить, что при полунатурном моделировании влияние эфемеридных погрешностей и условий распространения радиосигналов на точность измерений во всех режимах работы приемника одинаково.

Натурный эксперимент проводился для данных альманаха на 15.03.2015 Г. в точке с координатами $N = 52^{\circ}15'25''$, $E = 104^{\circ}21'22''$, $H = 503,2$ м (геодезически привязанный пункт в г. Иркутске) на интервале времени 05.30–11.00 UTC.

Результаты натурного эксперимента представлены на *рис. 11* (*a* – изменение VDOP; *b* – текущие значения погрешности измерения высоты). На рисунке кривые 1, 2, 3 соответствуют работе приемника по ГЛОНАСС, по GPS и в совмещенном режиме ГЛОНАСС/GPS.

При работе по GPS на исследуемом интервале времени VDOP изменяется от 1,0 до 3,5, при среднем значении – 1,39. Для ГЛОНАСС VDOP изменяется в меньшем диапазоне – от 1,05 до 2,0, при этом среднее значение составляет 1,47,

что несколько хуже, чем у GPS. При работе в совмещенном режиме VDOP изменяется от 0,8 до 1,7, при среднем значении – 0,99 на интервале наблюдения.

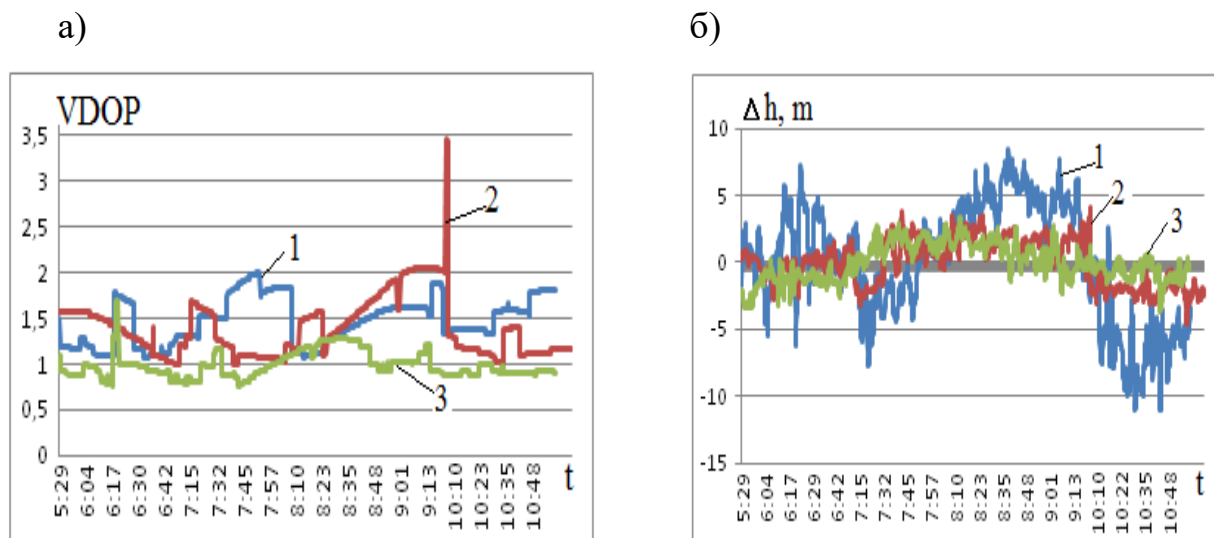


Рис. 11. Результаты натурального эксперимента:

а – вертикальный ГФ; б – погрешность измерения высоты

Натурный эксперимент так же, как и полунатурный, показал, что погрешность измерения высоты при работе по ГЛОНАСС хуже, чем при работе по GPS, а при работе приемника в совмещенном режиме точность измерения высоты будет хуже, чем при работе по GPS. Аналогичные результаты получены и для точности определения горизонтальных координат.

Таким образом, экспериментально показано, что при работе приемника СН-4312 как по ГЛОНАСС, так и в совмещенном режиме, фактическая точность оценки координат потребителя оказывается хуже, чем при работе только по системе GPS. Это может быть связано с особенностями схемной реализации радиочастотного тракта приемника, а также с отличиями структуры сигналов, используемых в ГЛОНАСС и GPS. По этой причине работа приемников в совмещенном режиме может быть рекомендована в случаях существенных сбоев в работе GPS.

Библиографический список

1. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (ред. 5.1). М: РНИИКП, 2008. 74 с.
2. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП ЦНИИмаш // [Электронный ресурс]. URL: <http://glonass-iac.ru/> (дата обращения: 10.01.2017).

3. *Скрыпник О. Н.* Исследование точности совмещенного ГЛОНАСС/GPS приемника / О. Н. Скрыпник, Е. Е. Нечаев, Р. О. Арефьев, Н. Г. Астраханцева // В сб. CriMiCo 2015–2015 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Севастополь: 2015, Т. 1. С. 239–240.

4. *Скрыпник О. Н.* Методика построения и анализ полей точности ГЛОНАСС в заданной зоне воздушного пространства / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Астраханцева // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221(11). С. 115–122.

5. *Скрыпник О. Н.* Построение и анализ полей точности GPS на основе программно-аппаратных средств NI GPS SIMULATION TOOLKIT / О. Н. Скрыпник, Е. Е. Нечаев, Р. О. Арефьев // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209(11), С. 5–12.

6. *Скрыпник О. Н.* Радионавигационные системы воздушных судов: учебник. М.: Инфра-М, 2014. 348 с.

7. *Скрыпник О. Н.* Экспериментальные исследования характеристик совмещенного GNSS приемника в высоких широтах / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Астраханцева // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221(11). С. 123–130.

8. *Скрыпник О. Н., Арефьев Р. О., Арефьева Н. Г.* Расчет характеристик навигационного сеанса системы ГЛОНАСС. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ RU 2016617951 от 19.07.2016.

9. *Соловьев Ю. А.* Системы спутниковой навигации. М: Эко-Трендз, 2000. 270 с.

References

1. GLONASS. The interface control document (ed. 5.1), Moscow, Joint-Stock Company "Institute of Space Device Engineering". 2008, 74p.

2. Information Analysis Center Of Coordinate-Time And Navigation Support, Federal State Unitary Enterprise Central Scientific-Research Institute Of Machine-Building <http://glonass-iac.ru/>.

3. *Skrypnik O. N.* Research of combined GLONASS/GPS receiver accuracy / O. N. Skrypnik, E. E. Nechaev, R. O. Aref'ev, N. G. Astrahanceva // collected book. CriMiCo 2015–2015 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Sevastopol: 2015, V. 1. Pp. 239–240.

4. Skrypnik O.N. Technique of construction and analysis of GLONASS precision fields in a specific zone of airspace / O. N. Skrypnik, R. O. Aref'ev, N. G. Astrahanceva // Scientific bulletin of the Moscow state technical university of civil aviation, 2015, №221(11), pp.115-122.

5. Skrypnik O. N. Construction and analysis of GPS precision fields on the basis of hardware-software NI GPS Simulation Toolkit. / O. N. Skrypnik, E. E. Nechaev, R. O. Aref'ev // Scientific bulletin of the Moscow state technical university of civil aviation, 2014, №209, pp.5-12.
6. Skrypnik O. N. Radio navigational systems of aircrafts. M.: INFRA-M, 2014. 348 p.
7. Skrypnik O.N. Experimental research of combined GNSS receiver characteristics in high latitudes / O. N. Skrypnik, R. O. Aref'ev, N. G. Astrahanceva // Scientific bulletin of the Moscow state technical university of civil aviation,, 2015, №221(11), pp.123-130.
8. Skrypnik O.N., Arefev R.O., Arefeva N.G. The characteristics calculation of a navigation session of the GLONASS system. Certificate of state registration of computer programs RU 2016617951 from 19.07.2016.
9. Soloviev Y.A. Satellite navigation systems. – M: Eco-Trends, 2000. 270 p.