

УДК 621.396

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОВМЕЩЕННОГО GNSS ПРИЕМНИКА В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

О.Н. СКРЫШНИК, Р.О. АРЕФЬЕВ, Н.Г. АСТРАХАНЦЕВА

Методами полунатурного моделирования с использованием имитатора СН-3803М и авиационного приемника СН-4312 исследованы условия навигационного сеанса и оценены погрешности измерения координат потребителя в высоких широтах в районах аэродромов Талакан и Игарка.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, геометрический фактор, навигационный спутник, точность определения координат.

ВВЕДЕНИЕ

Реализация новых технологий организации воздушного движения (ОрВД) формулирует необходимость внедрения в регулярную практику полетов гражданской авиации спутниковых систем навигации (ССН). Применение ССН позволяет создать высокоточное навигационно-временное поле и поле наблюдения в заданном регионе, выбрать структуру ОрВД, оптимальную по заданным критериям для выполнения целевых задач. При этом использование ССН выдвигает более высокие требования к точности и надежности решения задач навигации и наблюдения, вытекающие из необходимости обеспечения безопасности полетов.

ССН второго поколения GPS и ГЛОНАСС создают глобальное и достаточно точное навигационно-временное поле, что позволяет решать основные задачи самолетовождения на воздушных трассах с высоким уровнем безопасности полетов. Однако ССН присущ ряд существенных недостатков (низкая помехоустойчивость, влияние геометрического фактора, нарушение целостности, сбои в работе бортовых приемников, ухудшение точности при ионосферных возмущениях, высоком уровне солнечной активности и т.д.), что снижает эффективность их применения ввиду возможного значительного ухудшения характеристик, прежде всего точности определения координат воздушных судов (ВС). Данная проблема особенно актуальна для применения авиационного транспорта в малоосвоенных и труднодоступных регионах, как правило, расположенных в высоких широтах, где отсутствует развитая наземная инфраструктура технических средств ОрВД. Это не позволяет с их помощью создавать требуемое по точности, надежности, дальности действия и зонам покрытия навигационно-временное поле, дополняющее поле ССН.

Поэтому представляет определенный практический интерес исследование характеристик навигационно-временного поля ССН именно в высоких широтах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку проведение натурных экспериментов в указанных районах вызывает значительные трудности, для проведения исследований использованы методы полунатурного моделирования на основе программно-аппаратного комплекса в составе выпускаемых отечественной промышленностью имитатора сигналов спутниковых систем навигации СН-3803М и серийного сертифицированного авиационного приемника СН-4312. Однако приемник выводит на индикацию информацию о широте, долготе и высоте с недостаточной для исследований точностью. Поэтому для анализа использовалась информация, выдаваемая им во внешние устройства по шине ARINC-429, для чего был разработан интерфейс сопряжения (программная и аппаратная части) выхода приемника (шина стандарта ARINC-429) с ПЭВМ. Это также позволило автома-

тизировать процесс документирования и последующей обработки результатов достаточно продолжительных (до 8 часов) экспериментов.

Имитатор СН-3803М в имеющемся варианте комплектации позволяет имитировать сигналы ССН ГЛОНАСС, GPS, обеих систем совместно, а также имитировать различные сценарии (тип объекта, траектории движения, воздействие ионосферных и тропосферных погрешностей, изменение уровней сигналов спутников и пр.).

Приемник СН-4312 обеспечивает измерение и индикацию горизонтальных координат (широты и долготы) и высоты потребителя над поверхностью земного эллипсоида, расчет и индикацию горизонтального и вертикального геометрических факторов (ГФ), а также индикацию номеров наблюдаемых НС, их расположения на небесной сфере и уровня их сигналов в точке приема (функция RAIM [1]) (рис. 1). Приемник может работать по сигналам систем ГЛОНАСС, GPS и в совмещенном режиме.



Рис. 1. Внешний вид панели индикации приемника СН-4312

Информация о широте и долготе выдается потребителям в градусной мере. Для оценки точности их измерения более удобным является представление в метрической системе мер. С этой целью на этапе постобработки данные об ошибках измерения координат преобразовывались в метрическую систему в соответствии со следующими выражениями:

$$\delta B_i [M] = (B_i - B_0) [rad] \cdot (M + h);$$

$$\delta L_i = (L_i - L_0) \cdot (N + h) \cdot \cos B_0,$$

где δB_i , δL_i – погрешности измерения соответственно широты и долготы на i -м шаге измерений;

B_i , L_i – измеренные на i -м шаге приемником, B_0 , L_0 – истинные значения широты и долготы;

N , M – соответственно радиусы кривизны первого вертикала и параллели [2];

h – высота объекта над поверхностью земного эллипсоида.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью оценки адекватности полунатурного моделирования при работе приемника по ГЛОНАСС был проведен ряд натуральных и полунатурных экспериментов по методике, описан-

ной в [3], сопоставление результатов которых позволило выявить некоторые особенности и ограничения применения имитатора СН-3803М.

Натурные эксперименты проводились 05.11.2014 г. на интервале времени - 2 часа (с 02:55 до 4:55 UTC) для точки с координатами $H=503,18$ м, $B=52^{\circ}15'25,8''$, $L=104^{\circ}21'22,1''$ (г. Иркутск). При полунатурном эксперименте на эту же дату и время задавались альманах и эфемериды НС. В ходе экспериментов данные снимались с дискретностью 10 с.

Проведенные эксперименты показали, что имитатор в течение всего задаваемого интервала времени обеспечивает устойчивую генерацию сигналов от всех навигационных спутников, наблюдаемых при натурном эксперименте в заданной точке.

На рис. 2 показаны результаты исследования изменения горизонтального (HDOP) и вертикального (VDOP) ГФ по выходным данным приемника СН-4312 при натурном эксперименте (кривые 1) и полунатурном моделировании (кривые 2).

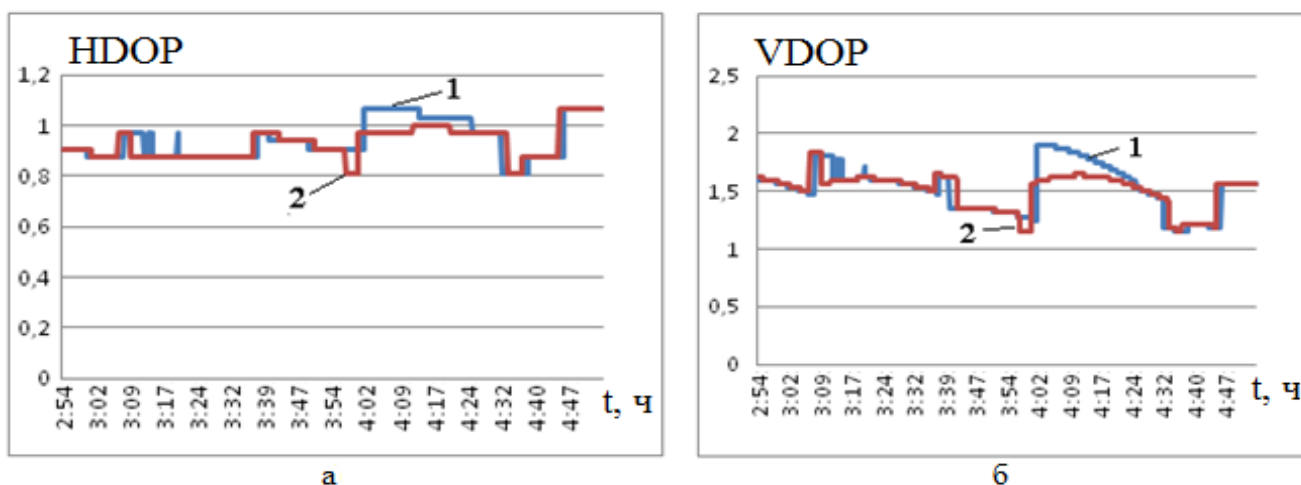


Рис. 2. Геометрический фактор: а) горизонтальный; б) вертикальный

В табл. 1 представлены рассчитанные по всему объему выборки для данного интервала времени средние значения горизонтального HDOP и вертикального VDOP геометрических факторов, а также среднеквадратические погрешности (СКП) вычисления HDOP и VDOP при полунатурном эксперименте по сравнению с натурным.

Таблица 1

Обобщенные результаты натурного и полунатурного экспериментов

Вид эксперимента	HDOP _{средн.}	VDOP _{средн.}	СКП _{HDOP}	СКП _{VDOP}
Натурный эксперимент	0,9399	1,529	0,0018	2,87467E-05
Полунатурное моделирование	0,9295	1,509		

Полученные результаты показывают адекватность полунатурного моделирования в плане соответствия формируемых имитатором СН-3803М условий навигационного сеанса (значений ГФ, состава НС, находящихся в зоне радиовидимости) данным натурных экспериментов.

На рис. 3 показаны результаты натурного (кривая 1) и полунатурного (кривая 2) экспериментов по оценке мгновенного значения погрешности измерения широты (рис. 3,а) и высоты (рис. 3,б) приемником СН-4312. При этом в среде создания сценариев имитатора СН-3803М задавались тропосферная и ионосферная (для сезона «зима») погрешности.

Следует заметить, что представленные на рис. 3,б графики получены после устранения систематических составляющих погрешностей, вызванных особенностями и условиями прове-

дения натурального и полунатурного экспериментов. В натурном эксперименте в результирующую погрешность измерения высоты входила систематическая составляющая, обусловленная длиной ВЧ кабеля от антенны (установленной на крыше здания) до места установки приемника. При полунатурном эксперименте систематическая составляющая была вызвана особенностями создания сценариев имитатором СН-3803М (задание высоты объекта над поверхностью геоида).

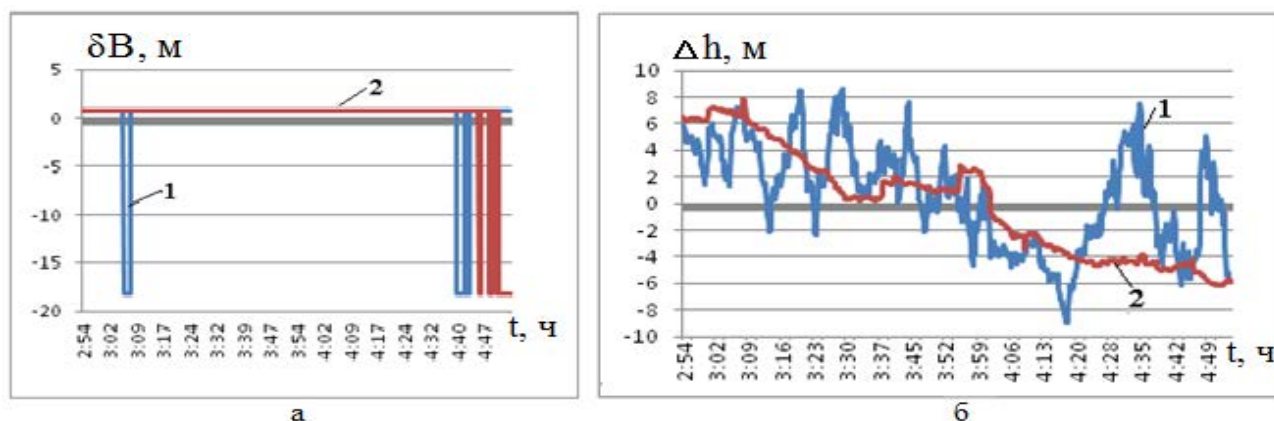


Рис. 3. Погрешность измерения: а) широта; б) высота

Полученные результаты показывают, что мгновенные значения погрешности измерения горизонтальных координат неподвижного объекта приемником СН-4312 при натурном эксперименте не превышают 16 - 18 м. При полунатурном эксперименте погрешность измерения широты в течение основного времени экспериментов была существенно меньше (первые единицы метров). Можно предположить, что такой характер погрешности определения горизонтальных координат (погрешность определения долготы имеет такой же характер и порядок значений) обусловлен реализованной в приемнике СН-4312 функцией по статистическому усреднению мгновенных значений измеренных координат.

Ошибки измерения высоты при натурном и полунатурном экспериментах изменяются на исследуемом интервале времени примерно в одинаковых пределах (± 9 м), однако "степень случайности" ошибки измерения высоты при натурном эксперименте существенно выше. Это может быть объяснено неполным учетом при полунатурном моделировании всех факторов, оказывающих влияние на реальную погрешность (быстрые флуктуации полного электронного содержания ионосферы, тропосферные флуктуации, многолучевость). Однако можно заключить, что имитатор СН-3803М обеспечивает достаточную адекватность полунатурного моделирования в плане соответствия натурному эксперименту по максимальным значениям погрешности определения высоты реальным приемником ССН на продолжительном интервале наблюдения. При этом отличия в мгновенных значениях погрешности измерения высоты могут быть достаточно существенными.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о достаточной для проведения экспериментальных исследований с использованием имитатора СН-3803М адекватности полунатурного моделирования, что позволяет считать достоверными получаемые результаты по исследованию характеристик ССН.

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАВИГАЦИОННО-ВРЕМЕННОГО ПОЛЯ GNSS В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Для исследования характеристик навигационно-временного поля ССН и оценки точности определения координат потребителей в высоких широтах были выбраны районы аэродромов Талакан ($59,87^0$ с.ш., $111,03^0$ в.д., UTC+10) и Игарка ($67,43^0$ с.ш., $86,62^0$ в.д., UTC+8).

С целью получения более полного анализа ожидаемых характеристик ССН в этих районах и сравнения возможностей существующих ССН, проводились исследования для

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

На рис. 4 представлены графики изменения горизонтального (HDOP) и вертикального (VDOP) ГФ при работе приемника СН-3412 по ГЛОНАСС (кривая 1), GPS (кривая 2) и в совмещенном режиме (кривая 3) для района Талакан.

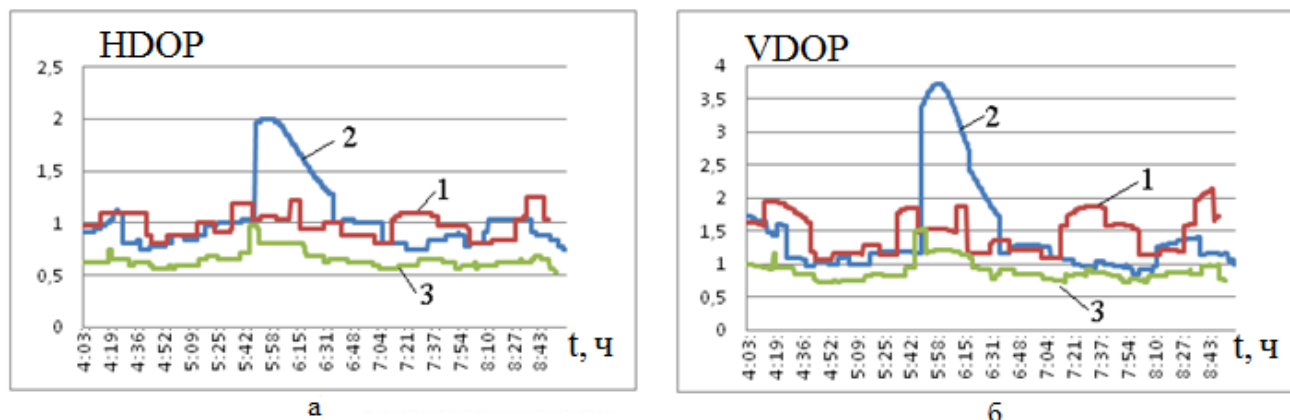


Рис. 4. Геометрические факторы в районе Талакан: а) горизонтальный; б) вертикальный

В табл. 2 приведены минимальные, максимальные и усредненные по всему объему выборки на исследуемом интервале времени значения горизонтального и вертикального ГФ при работе приемника по ГЛОНАСС, по GPS и в совмещенном режиме.

Таблица 2

Значения геометрических факторов в районе Талакан

Вид ГНСС	HDOP _{min}	HDOP _{max}	HDOP _{средн.}	VDOP _{min}	VDOP _{max}	VDOP _{средн.}
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

Из полученных результатов следует, что HDOP при работе по ГЛОНАСС в среднем несколько хуже, чем при работе по GPS, однако для GPS наблюдался достаточно продолжительный интервал времени (с 5:40 до 6:35 UTC) значительного ухудшения HDOP (до 1,3-2,0) и VDOP (до 1,7-3,75).

Таким образом, ГЛОНАСС в целом обеспечивает в районе аэродрома Талакан лучшие условия навигационного сеанса, чем GPS. При этом возможно достаточно значительное ухудшение геометрического фактора GPS на отдельных интервалах времени.

Работа по совмещенной группировке обеспечивает наилучшие и достаточно стабильные условия навигационного сеанса.

На рис. 5 показаны погрешности измерения широты (рис. 5,а) и высоты (рис. 5,б) при работе приемника по ГЛОНАСС (кривая 1), по GPS (кривая 2) и по совмещенной группировке НС ГЛОНАСС/GPS (кривая 3).

Как видно из полученных результатов, при работе по ГЛОНАСС погрешность измерения широты (длительные интервалы времени, когда мгновенные значения погрешности составляют 7-13 м) хуже, чем при работе по GPS и в совмещенном режиме (в указанных режимах наблюдались кратковременное увеличение мгновенного значения погрешности до 15 – 20 м).

Из полученных результатов следует, что, несмотря на меньшее значение геометрического фактора по условиям навигационного сеанса, точность измерения высоты приемником СН-4312 по ГЛОНАСС несколько хуже, чем по GPS.

Рассчитанная по всей выборке измерений на исследуемом интервале времени точность измерения высоты, характеризуемая СКП, составила 0,53 м (GPS), 3,94 м (ГЛОНАСС) и 1,19 м (ГЛОНАСС/GPS). При этом работа по совмещенной группировке обеспечивает точность измерения высоты, близкую к точности GPS.

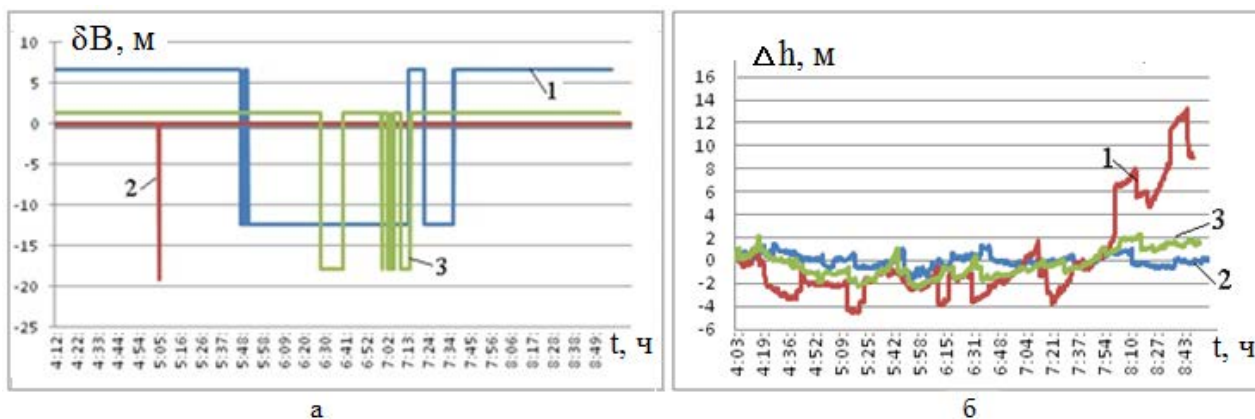


Рис. 5. Погрешности измерения координат: а) широты; б) высоты

На рис. 6 представлены графики изменения горизонтального (HDOP) и вертикального (VDOP) ГФ при работе приемника СН-3412 по ГЛОНАСС (кривая 1), GPS (кривая 2) и в совмещенном режиме (кривая 3) для района Игарка.

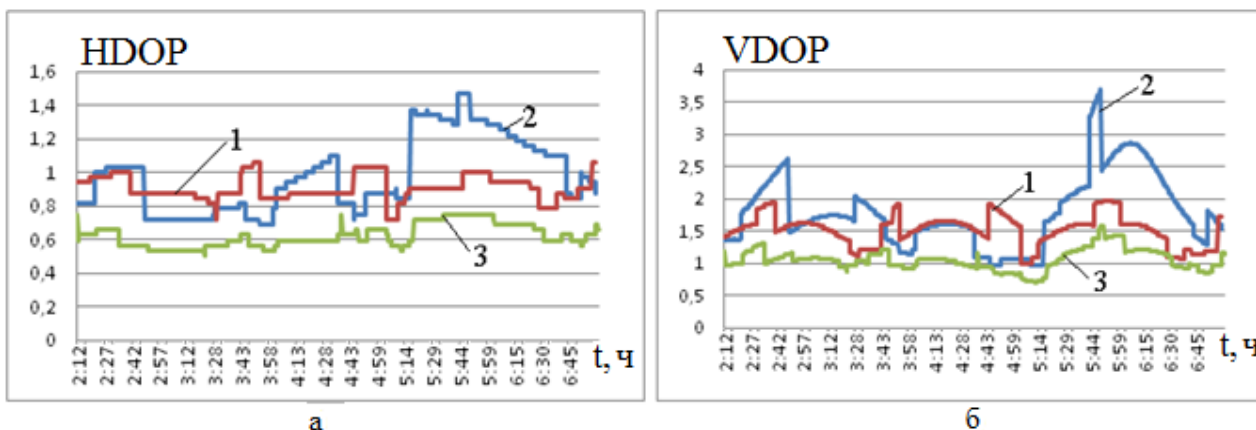


Рис. 6. Геометрические факторы в районе Игарка: а) горизонтальный; б) вертикальный

В табл. 3 приведены минимальные, максимальные и усредненные по всему объему выборки на исследуемом интервале времени значения горизонтального и вертикального ГФ при работе приемника по ГЛОНАСС, по GPS и в совмещенном режиме.

Таблица 3

Значения геометрических факторов в районе Игарка

Вид ГНСС	HDOP _{min}	HDOP _{max}	HDOP _{средн.}	VDOP _{min}	VDOP _{max}	VDOP _{средн.}
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

Из полученных результатов следует, что ГЛОНАСС в районе Игарка также, как и в районе Талакан, обеспечивает лучшие по значениям ГФ условия навигационного сеанса, чем GPS. При этом наиболее неблагоприятный по условиям работы GPS интервал времени наблюдался с 5:20 до 6:40 UTC (как и при проведении экспериментов для района Талакан). Также значительно лучшие условия навигационного сеанса наблюдаются при работе по объединенной группировке НС.

На рис. 7 представлены результаты исследования ошибки определения высоты (рис. 7,а) и широты (рис. 7,б) приемником СН-4312 при работе по ГЛОНАСС (кривая 1), по GPS (кривая 2) и по совмещенной группировке ГЛОНАСС/GPS.

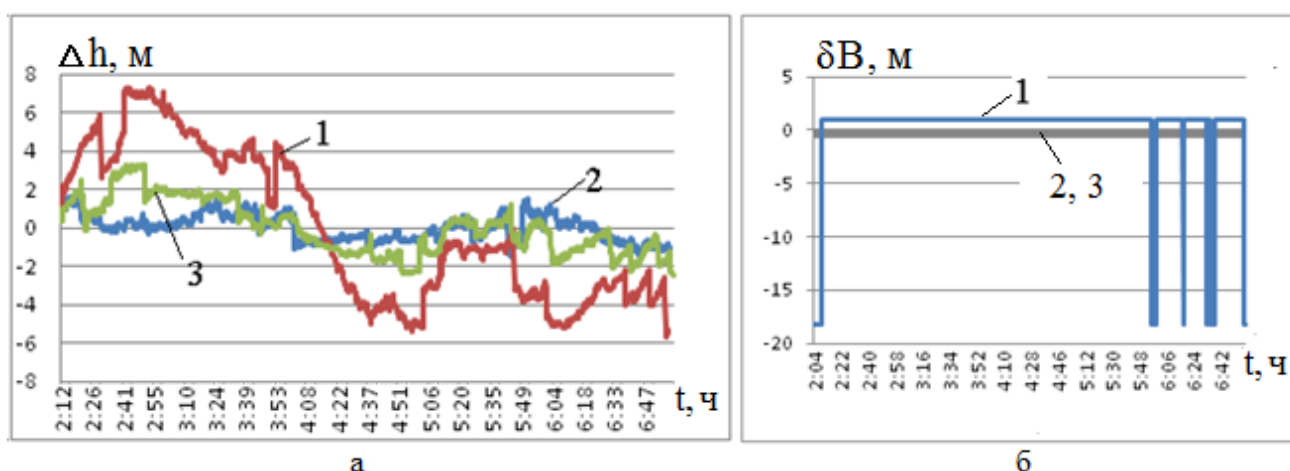


Рис. 7. Погрешности измерения координат: а) высоты; б) широты

Из полученных результатов следует, что, несмотря на меньшее значение ГФ, точность измерения высоты приемником СН-4312 по ГЛОНАСС хуже, чем по GPS. Мгновенные значения погрешности измерения высоты при работе по ГЛОНАСС 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 СКП измерения высоты составила 0,68 м (GPS), 3,89 м (ГЛОНАСС) и 1,41 м (работа по совмещенной группировке). При этом работа по совмещенной группировке обеспечивает точность измерения высоты близкую к точности GPS.

Как видно из полученных результатов, на исследуемом интервале времени наблюдается кратковременное увеличение погрешностей определения широты по ГЛОНАСС до 18 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1. Для анализируемых интервалов времени условия навигационного сеанса, определяемые значениями горизонтального и вертикального ГФ, в районе Игарки несколько хуже, чем в районе Талакана, что приводит соответственно и к худшей точности определения горизонтальных координат и высоты.

2. В рассматриваемых районах ГЛОНАСС обеспечивает лучшие, чем GPS, условия навигационного сеанса при значительно меньшей по составу орбитальной группировке НС.

3. Несмотря на улучшение условий навигационного сеанса при работе по совмещенной группировке ГЛОНАСС/GPS, точность навигационных определений приемником СН-4312 при

работе только по GPS оказалась выше. Это может быть связано с особенностями схемной реализации радиочастотного тракта приемника, а также с отличиями структуры сигналов, используемых в ГЛОНАСС и GPS.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Радиотехника, 2010.
2. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Монография. В 2-х т. Т 1. - М.: ФГУП "Картгеоцентр", 2005.
3. Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арефьев Р.О. Построение и анализ полей точности GPS на основе программно-аппаратных средств NI GPS SIMULATION TOOLKIT // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 5-12.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE COMBINED GNSS RECEIVER CHARACTERISTICS IN HIGH LATITUDES

Skrypnik O.N, Arefev R.O., Astrakhanceva N.G.

The nautical system's conditions in high latitudes (in the area of Talakan and Igarka airfields) assisted by GLONASS, GPS and combined system GLONASS/GPS have been examined through semirealistic simulation. Nautical session's conditions are characterized by horizontal (HDOP) and vertical (VDOP) geometrical factors' values in specified areas of terrain. Researches using the firmware complex within the satellite navigation systems signal simulator CH-3803M and the aeronautical receiver CH-4312, interlinked by bus ARINC-429 with personal computer have been conducted. Particularities of using the simulator and receiver CH-4312 for carrying out semirealistic experiments have been shown. By comparing these results with the results of realistic experiments the validity of semirealistic modelling has been estimated. The accuracy of receiver's CH-4312 position determination when operated by GLONASS, GPS and combined mode for Talakan and Igarka areas have been examined.

Key words: GLONASS, GPS, geometric factor, navigation satellite, positioning accuracy.

REFERENCES

1. Perov A.I., Harisov V.N. GLONASS. Principy postroeniya i funkcionirovaniya (GLONASS. The principles of construction and operation). – М.: Radiotekhnika, 2010. (In Russian)
2. Antonovich K.M. Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii (The use of satellite navigation systems in geodesy). – М.: Kartgeocentr, 2005. Vol. 1. (In Russian)
3. Skrypnik O.N., Nechaev E.E., Aref'ev R.O. Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii. 2014. № 209. Pp. 5-12. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Скрыпник Олег Николаевич, 1959 г.р., окончил Киевское ВВАИУ (1981), профессор, доктор технических наук, почетный работник высшего профессионального образования РФ, заместитель директора Иркутского филиала МГТУ ГА по учебно-научной работе, автор свыше 80 научных работ, область научных интересов – радионавигация, спутниковые системы навигации, межсамолетная навигация, комплексная обработка навигационной информации. E-mail: skripnikon@yandex.ru.

Арефьев Роман Олегович, 1991 г.р., окончил Иркутский филиал МГТУ ГА (2013), аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, автор 11 научных работ, область научных интересов: радионавигация, спутниковые системы навигации. E-mail: seven7772009@ya.ru.

Астраханцева Наталья Геннадьевна, окончила Иркутский филиал МГТУ ГА (2013), аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, автор 10 научных работ, область научных интересов: радиосвязь, широкополосные системы связи, радионавигация, спутниковые системы навигации. E-mail: n_astrahanceva_awesome@mail.ru.