

МЕТОДЫ ВЗАИМНОЙ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УГЛОМЕРНЫХ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Д. Д. Дмитриев, В. Н. Тяпкин, Ю. Л. Фатеев,

А. Б. Гладышев✉, Н. С. Кремез

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

В статье приведены результаты экспериментальных исследований методов взаимной высокоточной навигации для беспилотных и специализированных транспортных систем. Предлагаемые методы основаны на применении относительных режимов работы двух и более угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Для проведения исследований разработан программно-аппаратный комплекс, состоящий из двух угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, опорно-поворотного устройства и компьютерной модели навигационной системы беспилотных и специализированных транспортных систем. Он обеспечивает погрешность позиционирования антенной системы по угловым координатам менее 1 угловой минуты, что позволяет его использовать в качестве эталона при измерении угловых перемещений антенной системы приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Приведены и проанализированы результаты измерений плановых и угловых координат как в автономном, так и в относительном фазовом режимах работы угломерных приемников глобальных навигационных спутниковых систем. Установлено, что среднеквадратическая погрешность измерения относительных координат составила 0,019 м. Дальнейшее увеличение точности измерения относительных координат возможно за счет принятия мер по снижению погрешности многолучевого приема, которая является наиболее значимой некоррелированной погрешностью измерения координат двумя комплектами приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Таким образом, методы взаимной высокоточной навигации с использованием угломерных приемников глобальных навигационных спутниковых систем обладают высокой точностью без использования внешней информации о дифференциальных поправках. Это позволит осуществлять эксплуатацию беспилотных или специальных транспортных систем в труднодоступных и северных районах в условиях отсутствия связи и прочих неблагоприятных факторах.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, глобальная навигационная спутниковая система, навигационный приемник, беспилотный транспорт, фазовое измерение, относительная навигация.

Введение

Ведущие корпорации мира проявляют существенный интерес к разработке высокоточного и надежного навигационного оборудования беспилотных и специализированных транспортных систем [1]. Навигация, то есть определение по-

ложения объектов в пространстве и времени, является важнейшей задачей, без решения которой сильно затруднена работа множества различных сложных систем, плотно вошедших в нашу жизнь. Например, в научной сфере навигация используется в организации и проведении исследований космоса, околоземного пространства, исследований Земли. Навигационные системы стали неотъемлемой частью систем мониторинга подвижных объектов, в том числе промышленного и городского

✉ a-glonass@yandex.ru

го автотранспорта. Высокоточная навигация применяется в геодезии и картографии, при разработке месторождений полезных ископаемых, в строительстве и сельском хозяйстве, а также во многих других областях экономики.

Основой современных бортовых навигационных систем различных классов транспорта, нашедших практически повсеместное применение, как правило, являются приемники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Но, несмотря на все достоинства ГНСС, они не могут обеспечить требуемую точность измерения координат в автономном режиме по причине достаточно большой величины внешних составляющих погрешности – эфемеридной, тропосферной, ионосферной и т. п. Одним из наиболее активно разрабатываемых методов компенсации этих составляющих погрешности является применение дифференциальных режимов работы ГНСС-приемников.

За рубежом постоянно уделяется большое внимание модернизации существующей системы спутниковой навигации GPS, в том числе и созданию дифференциальных сетей: WAAS (Wide Area Augmentation System) – для территории Северной Америки, SACCSA – для территории Южной Америки, AFI – для территории Африки, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Services) – для территории Европы, и система MSAS – для территории Японии. Существующие дифференциальные методы GPS Post Processing Kinematic (PPK) и Real Time Kinematic (RTK) обладают рядом преимуществ позиционирования объектов, наиболее существенным из которых является сантиметровая точность позиционирования. Сети, предоставляющие PPK и RTK решения существуют на коммерческой основе, а также бесплатно в отдельных странах в рамках государственных геодезических сетей. Они охватывают значительные площади стран мира с полем высокоточных поправок [2–4].

В России сети дифференциальных станций в настоящее время развернуты не более чем в двух десятках регионов России. Северные и труднодоступные регионы России вообще не покрыты сетью станций дифференциальной коррекции.

Кроме того, известные на сегодняшний день бортовые навигационные системы беспилотных машин не позволяют измерять углы пространственной ориентации при помощи ГНСС-приемников. Причем, если в ряде случаев достаточно определения курса, то в сложных дорожных условиях и на бездорожье (на склонах, в лесу, болотистой местности) требуется непрерывный контроль всех трех углов пространственной ориентации – курса, крена и тангажа. Подобные измерения проводятся, как правило, с использованием инерциальных систем – акселерометров, гироскопов, что резко увеличивает стоимость навига-

ционной системы в целом [5]. А недорогие бесплатформенные инерциальные датчики обладают низкими показателями точности и надежности.

Таким образом, существует актуальная проблема разработки методов высокоточной взаимной навигации и измерения пространственной ориентации беспилотных и специализированных транспортных систем с использованием угломерных ГНСС-приемников за счет применения методов относительных фазовых измерений.

Методы взаимной высокоточной навигации за счет использования режима относительных фазовых измерений в угломерных ГНСС-приемниках основаны на пространственно-временной коррелированности погрешностей радионавигационных параметров сигналов навигационных космических аппаратов (НКА), измеренных в различных точках пространства в близкие моменты времени. В данном случае измерение абсолютных координат объектов осуществляется со стандартной точностью, а между собой они привязываются с гораздо меньшей погрешностью – единиц миллиметров. Это обусловлено эффектом компенсации постоянных и медленно меняющихся во времени и пространстве коррелированных составляющих погрешностей измерения радионавигационных параметров, т. е. псевдозадержки дальномерного кода, псевдодоплеровской частоты и псевдофазы принимаемых сигналов НКА. При вычислении относительных координат составляются разности измеренных псевдодальностей, при этом значительная часть внешних погрешностей измерения компенсируется [6–8].

Основными преимуществами методов взаимной навигации является отсутствие контрольно-корректирующих станций и необходимости в организации каналов связи с сетью Интернет, возможность высокоточного измерения взаимных координат и углов пространственной ориентации. Важнейшим улучшаемым показателем навигационных систем является, прежде всего, точность измерения координат и углов пространственной ориентации. Кроме собственно измерения относительных координат и углов пространственной ориентации использование методов относительных фазовых измерений позволяет формировать эталонные траектории движения без использования электронных карт, что особенно актуально при организации транспортных путей на территориях со сложным рельефом, при добыче полезных ископаемых, обработке земельных участков в ходе сельскохозяйственных работ.

Невзирая на большое количество публикаций на тему относительной навигации, в том числе и с использованием фазовых методов, подавляющее число экспериментальных данных было получено в результате компьютерной постобработки «сырых» данных от двух разнесенных комплектов ГНСС-приемников.

1. Назначение и состав программно-аппаратного комплекса для исследования методов взаимной высокоточной навигации

Большинство используемых в настоящее время исследовательских комплексов направлены в основном на исследование характеристик ГНСС-приемников [9; 10] – точностных, временных, помехоустойчивости и др. В рамках этой работы был разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК) для проведения экспериментальных исследований методов высокоточного измерения координат и углов пространственной ориентации на основе применения относительных фазовых измерений двух угломерных ГНСС-приемников.

В программную часть ПАК входит компьютерная модель навигационной системы беспилотных и специализированных транспортных систем. Она предназначена для имитации работы бортовой системы навигации и выполняет следующие основные функции:

- а) имитация работы бортовой навигационной системы;
- б) проведение сравнительной оценки разработанных методов;
- в) проведение экспериментальных исследований разработанных методов.

Возможности модели:

- а) обработка сигналов НКА, принятых при помощи угломерных ГНСС-приемников;
- б) измерение координат антенного поста одного ГНСС-приемника относительно антенного поста другого ГНСС-приемника;
- в) расчет показателей качества результатов измерений.

Компьютерная модель содержит компоненты, моделирующие физические процессы и технические принципы функционирования аппаратных составных частей системы:

- а) модель навигационного поля, обеспечивающую численное моделирование (расчет) зоны одновременного уверенного приема сигналов от заданного количества НКА;

- б) модель информационного кадра для расчета относительных координат в соответствии с разработанным на этапе проектирования форматом данных;

- в) модель среды распространения навигационного сигнала, отражающую основные воздействия на него:

- затухание навигационного сигнала при распространении в свободном пространстве;
- переотражение навигационного сигнала от объектов, имеющих размеры, превосходящие длину волны;
- задержка навигационного сигнала при распространении в тропосфере;
- моделирование эффекта Доплера.

- г) модель навигационного приемника, реализующую алгоритмы первичной (поиск и захват навигационного сигнала, а также слежение за ним) и вторичной обработки навигационного сигнала (решение навигационной задачи, определение углов пространственной ориентации объекта);

- д) модель погрешности измерения, которая моделирует погрешности, связанные с задержкой навигационного сигнала в тропосфере, аппаратные погрешности приемника, а также учитывает геометрию расположения НКА, то есть осуществляет расчет геометрического фактора.

Основой аппаратной части ПАК являются два угломерных ГНСС-приемника и опорно-поворотное устройство (ОПУ), обеспечивающее проведение экспериментальных исследований с заданной точностью. Наличие двух угломерных ГНСС-приемников позволяет осуществлять прием реальных навигационных сигналов, определять местоположение и пространственную ориентацию антенных постов.

ОПУ позволяет осуществлять вращение антенной системы ГНСС-приемника по трем осям – азимут, крен и тангаж. В его состав входит контроллер, имеющий возможность как местного управления ОПУ, так и дистанционного при помощи персонального компьютера по протоколу Ethernet. Внешний вид представлен на рис. 1, а технические характеристики – в табл. 1.



а



б

Рис. 1. ОПУ SPE.TS01 с установленными антеннами угломерного ГНСС-приемника (а) и контроллер (б)

Таблица 1

Основные технические характеристики ОПУ

№	Характеристика	Значение
1	Диапазон вращения по азимуту, град.	0–360
2	Диапазон вращения по тангажу (углу места), град.	± 45
3	Диапазон вращения по крену, град.	± 45
4	Шаг поворота по осям вращения, град.	0,01
5	Точность установки по осям вращения, угловая минута	1
6	Скорость поворота по осям вращения, град./с	1; 3; 6; 12
7	Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	515×390×185
8	Масса ОПУ, кг	40

2. Исследование точности автономного измерения координат и углов пространственной ориентации

При проведении экспериментальных исследований в автономном режиме измерения координат антенные системы ГНСС-приемников № 1 и № 2 были установлены на открытой площадке с углами закрытия не более 10°, обеспечивающими прием навигационного сигнала. Результаты измерения координат антенных постов ГНСС-приемников № 1 и № 2 приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

Результаты расчета точностных характеристик измерения координат ГНСС-приемниками приведены в табл. 2.

СКО углов пространственной ориентации является среднеквадратической погрешностью определения углов пространственной ориентации и приведено в табл. 3.

С помощью ОПУ было изменено пространственное положение антенного поста второго макета ГНСС-приемника по азимуту, крену и тангажу на 30°. Значения абсолютной погрешности измерения углов пространственной ориентации второго макета ГНСС-приемника представлены в табл. 4.

Таким образом, точность измерения текущих координат и углов пространственной ориентации каждого из антенных постов не хуже обеспечиваемой глобальными навигационными спутниковыми системами ГЛОНАСС / GPS.

Таблица 2

Результаты расчета точностных характеристик измерения координат ГНСС-приемниками

Измеренные характеристики	X	Y	Z
Координаты ГНСС-приемника № 1, м	-171834,484	3572219,254	5263688,533
СКО (σ), м	0,795	2,520	1,755
Координаты ГНСС-приемника № 2, м	-171853,691	3572213,528	5263701,664
СКО (σ), м	0,252	1,241	0,986

Таблица 3

Значения СКО углов пространственной ориентации

Значение	ГНСС-приемник № 1	ГНСС-приемник № 2
σ _α , угловая минута	15,9	13,5
σ _β , угловая минута	19,3	16,9
σ _γ , угловая минута	17,2	18,6

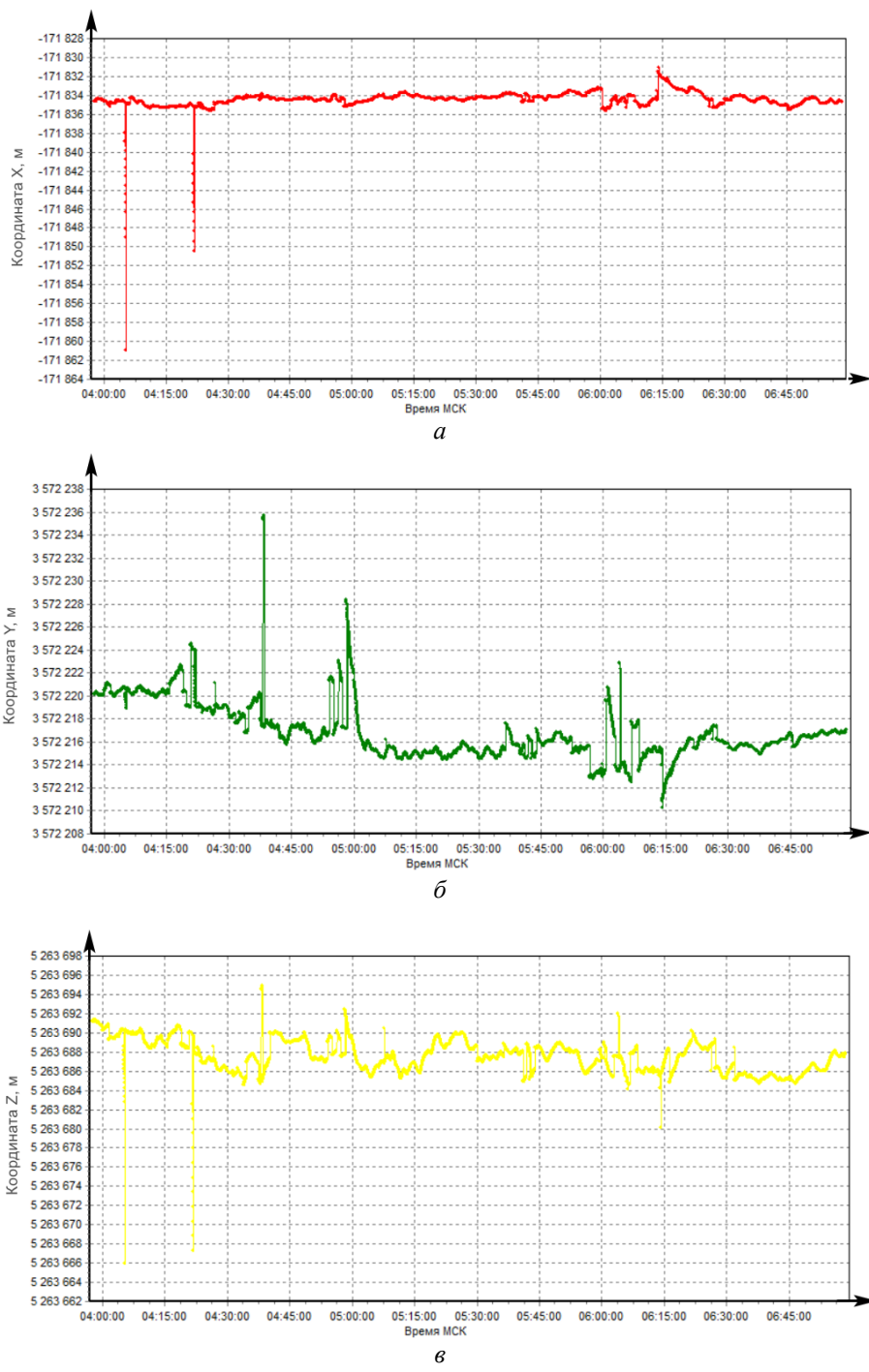
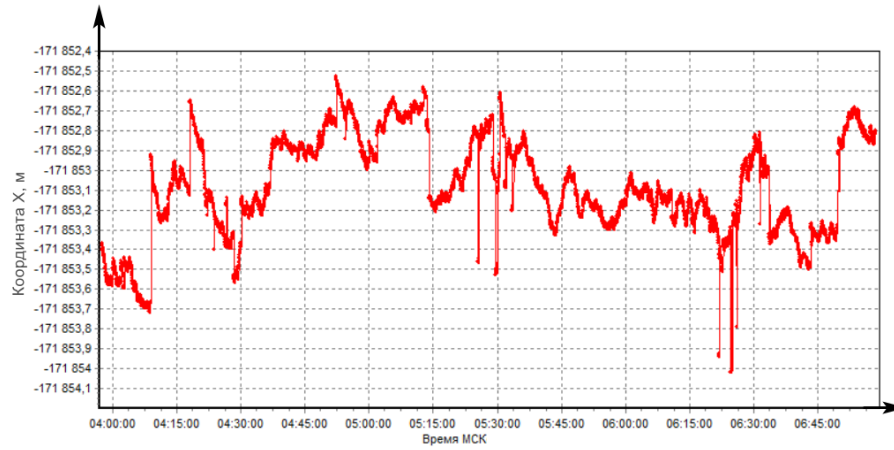


Рис. 2. Измерение координат антенного поста ГНСС-приемника № 1:
 а – координата X; б – координата Y; в – координата Z

Таблица 4

Исследование абсолютной погрешности измерения углов пространственной ориентации

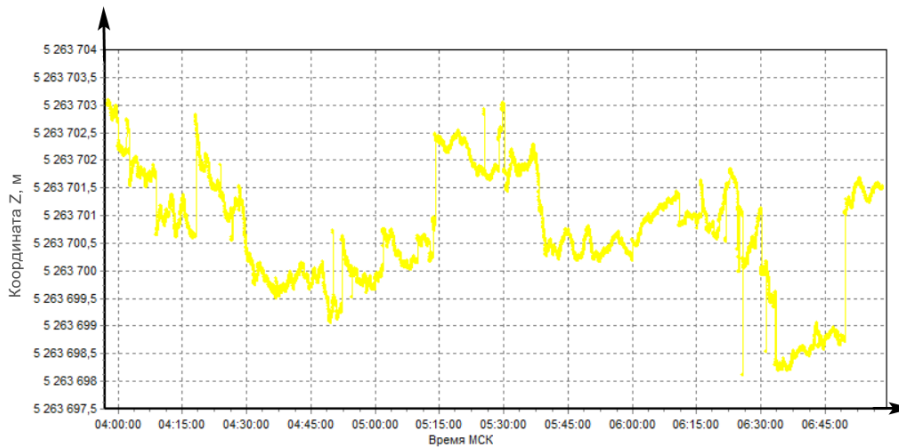
Измеренная величина	Азимут	Крен	Тангаж
Угол поворота антенного поста, град.	30	30	30
Математическое ожидание условно нулевого положения, град.	113,096	0,038	0,733
Математическое ожидание второго положения, град.	143,306	30,268	30,988
Абсолютная ошибка, мин.	12,6	13,8	15,3



a



б



в

Рис. 3. Измерение координат антенного поста ГНСС-приемника № 2:
a – координата X ; *б* – координата Y ; *в* – координата Z

3. Проверка точности измерения координат и углов пространственной ориентации одного антенного поста относительно другого

Антенные системы ГНСС-приемников № 1 и № 2 были установлены на открытой площадке

с углами закрытия не более 10° , обеспечивающими прием навигационных сигналов и расположенных в соответствии с рис. 4.

Измерения производились для трех различных положений антенного поста второго ГНСС-приемника:

- при изменении положения по X и Z на 1 м;
- при изменении азимута дискретно на 30° ;

- при изменении курса и тангажа на 15°. Погрешность измерения навигационных параметров по результатам измерения в режиме взаимной навигации приведена в табл. 5. Пример результатов измерений представлен на рис. 5.

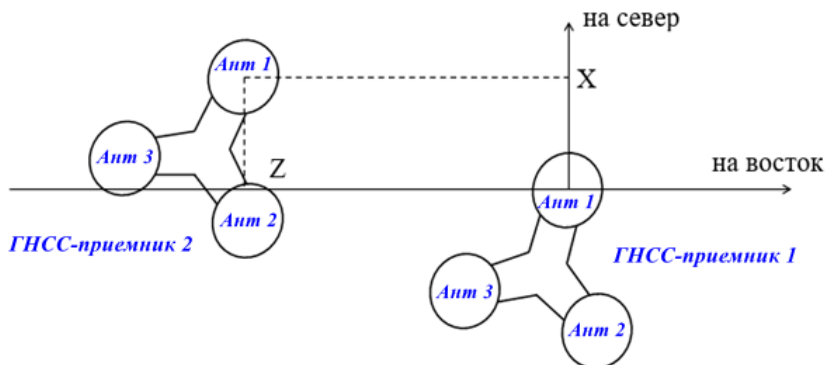


Рис. 4. Расположение антенных постов ГНСС-приемников

Таблица 5

Среднеквадратическая погрешность (СКП) измерения навигационных параметров

Наименование характеристики	Исходное положение антенного поста	Первое положение антенного поста	Второе положение антенного поста
СКП координаты X	0,012	0,015	0,013
СКП координаты Y	0,017	0,019	0,016
СКП координаты Z	0,013	0,014	0,012
СКП угла по крену	13,4	12,6	13,9
СКП угла по тангажу	17,6	16,7	17,5
СКП угла по азимуту	17,2	15,6	14,3

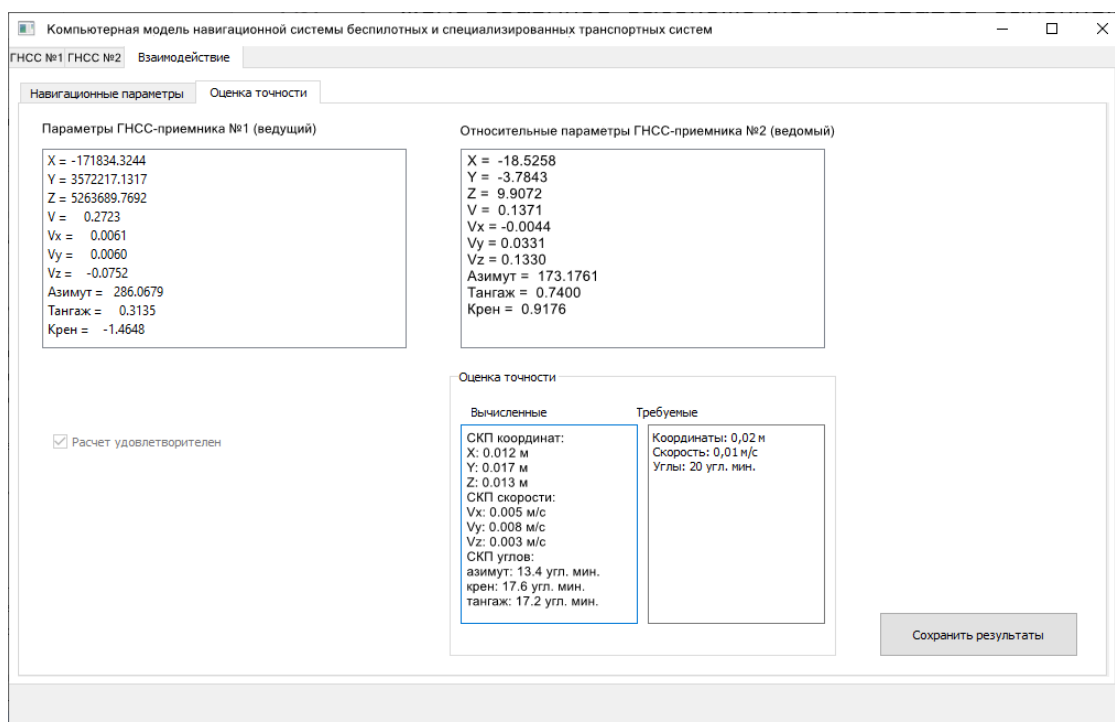


Рис. 5. Результаты измерений в режиме взаимной навигации

Заключение

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что среднеквадратическая погрешность измерения относительных координат составила 0,019 м. Дальнейшее увеличение точности измерения относительных координат возможно за счет принятия мер по снижению погрешности многолучевого приема, которая является наиболее значимой некоррелированной погрешностью

измерения координат двумя комплектами ГНСС-приемников.

Таким образом, методы взаимной высокоточной навигации с использованием угломерных ГНСС-приемников обладают высокой точностью без использования внешней информации о дифференциальных поправках. Это позволит осуществлять эксплуатацию беспилотных или специальных транспортных систем в труднодоступных и северных районах, в условиях отсутствия связи и прочих неблагоприятных факторах.

Список литературы

- [1] Miranda V. R. F., Rezende A. M. C., Rocha T. L., Azpúrua H., Pimenta L. C. A., Freitas G. M. Autonomous Navigation System for a Delivery Drone // *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2022. vol. 33. issue 1. pp. 141–155. doi: 10.1007/s40313-021-00828-4.
- [2] Luo X., Schaffler S., Branzanti M., Chen J. Assessing the benefits of Galileo to high-precision GNSS positioning – RTK, PPP and post-processing // *ASR*. 2021. vol. 68. issue 12. pp. 4916–4931. doi: 10.1016/j.asr.2020.08.022.
- [3] Kamaludin A. H., Azman U. F. N. U., Wan Aris W. A., Musa T. A. Global positioning system measurement technique: Assessment on virtual reference station data // *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2021. vol. 69. issue 8. pp. 347–357.
- [4] Pirti A. Evaluating the accuracy of post-processed kinematic (Ppk) positioning technique // *Geodesy and Cartography*. 2021. vol. 47. issue 2. pp. 66–70. doi: 10.3846/gac.2021.12269.
- [5] Geragersian P., Petrunin I., Guo W., Grech R. An INS/GNSS fusion architecture in GNSS denied environments using gated recurrent units // *AIAA Science and Technology Forum and Exposition*. doi: 10.2514/6.2022-1759.
- [6] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография. Красноярск : СФУ, 2012. 259 с.
- [7] Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Gladyshev A. B., Zverev P. Yu. Methods of High-Precision Mutual Navigation of Small Spacecraft // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. 2020. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067505.
- [8] Гарин Е. Н., Дмитриев Д. Д., Кокорин В. И., Кремез Н. С. Определение относительных координат объекта с помощью спутниковых средств радионавигации // *Радиолокация, навигация и связь: сб. докл. конф. «RLNC-2006» в 3-х т. Т. 3. Воронеж. 2006. С. 1776–1784.*
- [9] Sokolovskiy A. V., Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratushniak V. N. Hardware Diagram of Computing Devices of Navigation Equipment of Consumers SRNS // *11th International IEEE Scientific and Technical Conference on Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2017. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239510.
- [10] Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Tyapkin V. N., Fateev Yu. L. Hardware-Software Complex for Studying the Characteristics of GNSS Receiver // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491665.

METHODS OF MUTUAL HIGH-PRECISION NAVIGATION BASED THE USE OF RELATIVE MODES OF ANGLE- MEASURING RECEIVERS OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS SIGNALS

D. D. Dmitriev, V. N. Tyapkin, Yu. L. Fateev, A. B. Gladyshev, N. S. Kremez

*Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation*

The article presents the results of experimental studies of mutual high-precision navigation methods for unmanned and specialized transport systems. The proposed methods are based on the application of the relative operating modes of two or more angle-measuring receivers of global navigation satellite systems signals. To conduct research, a software and hardware

complex has been developed, consisting of two angle-measuring receivers of global navigation satellite systems signals, a turntable and a computer model of the navigation system of unmanned and specialized transport systems. It provides the positioning error of the antenna system in angular coordinates less than 1 arc minute, which allows it to be used as a reference when measuring the angular displacements of the receiver of global navigation satellite systems signals antenna system. The results of measurements of planar and angular coordinates both in autonomous and relative phase modes of operation of goniometric receivers global navigation satellite systems signals are presented and analyzed. It has been established that the root-mean-square error of measuring relative coordinates was 0,019 meter. A further increase in the relative position measurement accuracy is possible by taking measures to reduce the multipath reception error, which is the most significant uncorrelated position measurement error by two sets of receivers of global navigation satellite systems signals. Thus, the methods of mutual high-precision navigation using angle-measuring receivers of global navigation satellite systems signals have high accuracy without the use of external information about differential corrections. This will allow the operation of unmanned or special transport systems in hard-to-reach and northern regions, in conditions of lack of communication and other adverse factors.

Keywords: software and hardware complex, global navigation satellite system, navigation receiver, unmanned transport, phase measurement, relative navigation.

References

- [1] Miranda V. R. F., Rezende A. M. C., Rocha T. L., Azpúrua H., Pimenta L. C. A., Freitas G. M. Autonomous Navigation System for a Delivery Drone // *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2022, vol. 33, issue 1, pp. 141–155. doi: 10.1007/s40313-021-00828-4.
- [2] Luo X., Schauffer S., Branzanti M., Chen J. Assessing the benefits of Galileo to high-precision GNSS positioning – RTK, PPP and post-processing // *ASR*, 2021, vol. 68, issue 12, pp. 4916–4931. doi: 10.1016/j.asr.2020.08.022.
- [3] Kamaludin A. H., Azman U. F. N. U., Wan Aris W. A., Musa T. A. Global positioning system measurement technique: Assessment on virtual reference station data // *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2021, vol. 69, issue 8, pp. 347–357.
- [4] Pirti A. Evaluating the accuracy of post-processed kinematic (Ppk) positioning technique // *Geodesy and Cartography*, 2021, vol. 47, issue 2, pp. 66–70. doi: 10.3846/gac.2021.12269.
- [5] Geragersian P., Petrunin I., Guo W., Grech R. An INS/GNSS fusion architecture in GNSS denied environments using gated recurrent units // *AIAA Science and Technology Forum and Exposition*. doi: 10.2514/6.2022-1759.
- [6] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. *Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы GLONASS* [Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system]. Krasnoyarsk, SibFU, 2012, 259 p. (In Russian)
- [7] Дмитриев Д. Д., Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л., Гладышев А. Б., Зверев П. Ю. Methods of High-Precision Mutual Navigation of Small Spacecraft // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*, 2020. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067505.
- [8] Гарин Е. Н., Дмитриев Д. Д., Кокорин В. И., Кремез Н. С. *Определение относительных координат объекта с помощью спутниковых средств радионавигации* [Definition of relative coordinates of object by means of satellite systems of radionavigation]. Radiolocation, navigation and communication : a collection of reports of the conference «RLNC-2006», Voronezh, 2006, vol. 3, pp. 1776–1784. (In Russian)
- [9] Sokolovskiy A. V., Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratushniak V. N. Hardware Diagram of Computing Devices of Navigation Equipment of Consumers SRNS // *11th International IEEE Scientific and Technical Conference on Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 2017. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239510.
- [10] Дмитриев Д. Д., Гладышев А. Б., Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л. Hardware-Software Complex for Studying the Characteristics of GNSS Receiver // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491665.

Сведения об авторах

Гладышев Андрей Борисович – кандидат технических наук, начальник кафедры Сибирского федерального университета. Окончил Военный университет ПВО (г. Тверь) в 2000 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация, системы связи, системы радиоэлектронной борьбы.

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры АСУ Сибирского федерального университета. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники в 1995 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация.

Кремез Николай Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры АСУ Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2004 году. Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, комплексы средств автоматизации.

Тяпкин Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры РТВ Сибирского федерального университета. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники в 1979 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация.

Фатеев Юрий Леонидович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры специальных радио-технических систем Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский политехнический институт в 1988 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация.