

О расширении функциональных возможностей НАП СРНС при работе по двум спутниковым системам

© В. И. Бабуров¹, Н. В. Васильева¹, Н. В. Иванцевич^{1,2}

¹АО «Навигатор», г. Санкт-Петербург, Россия

²БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) в настоящее время используются в различных направлениях человеческой деятельности, в том числе в области движения транспортных средств. В силу глобальности и непрерывности навигационных полей спутниковых систем второго поколения, использующих средневысокие орбиты, они перспективны для навигации летательных аппаратов различного назначения, от воздушных судов до космических аппаратов и малых беспилотных летательных аппаратов. В этих применениях реализуются как штатные, так и нештатные варианты использования навигационных полей СРНС. К штатному использованию навигационного поля относится функционирование навигационной аппаратуры потребителя СРНС при условиях, оговоренных в интерфейсных документах на эти системы. В этих ситуациях должны обеспечиваться точности навигационных определений, зафиксированные в этих документах. Однако при эксплуатации воздушных судов, космических аппаратов, беспилотных летательных аппаратов и других объектов возникают нештатные ситуации, такие как затенение отдельных областей окружающего потребителя пространства, например горами, постройками или искусственными препятствиями; работа в условиях крена, тангажа воздушного или качки морского судна; наличие отражений от подстилающей и других отражающих поверхностей и другие нештатные ситуации.

Некоторые из перечисленных ситуаций могут быть преодолены, если использовать информационную избыточность навигационного поля, создаваемого двумя СРНС, например, ГЛОНАСС + GPS, ГЛОНАСС + BeiDou и в других сочетаниях СРНС. Кроме того, при одновременном использовании навигационных полей двух СРНС появляется возможность для упрощения алгоритмов обработки информации при дифференциальных (относительных) местоопределениях за счёт реализации метода передачи дифференциальных поправок по координатам, а не по псевдодальностям. В статье анализируется состав рабочих созвездий навигационных спутников ГЛОНАСС + GPS, оценивается информационная избыточность рабочих созвездий спутников при штатном и различных вариантах нештатного использования навигационного поля; проводится сравнение с аналогичными характеристиками систем ГЛОНАСС и GPS при стандартных и относительных местоопределениях.

Результаты получены методом имитационного математического моделирования и представлены в виде таблиц, содержащих параметры распределений числа НИСЗ в рабочих созвездиях и геометрических факторов, при различных ограничениях, соответствующих нештатным ситуациям. Полученные результаты могут быть полезны при оценке точности и надёжности навигационно-временных определений бортовыми навигационно-посадочными комплексами летательных аппаратов различного назначения в сложных условиях выполнения полётов.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, навигационное поле, информационные характеристики, точность, имитационное моделирование

Контакты для связи: Иванцевич Наталья Вячеславовна (nvivantsevich@yandex.ru).

Для цитирования: Бабуров В. И., Васильева Н. В., Иванцевич Н. В. О расширении функциональных возможностей НАП СРНС при работе по двум спутниковым системам // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 59. С. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.59.3-8>

Functionality Expansion of GNSS Receiver when Using Two Satellite Systems

V. I. Baburov¹, N. V. Vasilyeva¹, N. V. Ivantsevich^{1,2}

¹JSC Navigator, Saint Petersburg, Russia

²BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Satellite radio navigation systems are currently used in various fields of human activity. A special place is occupied by applications in the field of vehicle traffic. Due to the worldwide and continuity of the navigation fields of second-generation satellite systems using medium-low orbits, they are promising for navigation of aircraft for various purposes, from aircraft to space apparatuses and small UAVs. In these applications, both regular and non-standard options for using the navigation fields of the GNSS are implemented. The regular use of the navigation field refers to the functioning of GNSS receiver under the conditions stipulated in the interface documents for these systems. In these situations, the posi-

tioning accuracy recorded in these documents should be ensured. However, during the operation of aircraft, spacecraft, UAVs and other objects, abnormal situations arise, such as overshadowing of certain areas of the surrounding consumer space, for example, mountains, buildings or artificial obstacles; work in conditions of roll, pitch of aircraft or rolling of a ship; the presence of reflections from the underlying and other reflective surfaces and other abnormal situations.

Some of these situations can be overcome by using the information redundancy of the navigation field created by two GNSS, for example, GLONASS + GPS, GLONASS + BeiDou and in other GNSS combinations. In addition, with the simultaneous use of the navigation fields of two satellite systems, it is possible to simplify information processing algorithms for differential (relative) localities by implementing the method of transmitting differential corrections by coordinates, and not by pseudoranges. The article analyzes the composition of the working constellations of GLONASS + GPS navigation satellites, evaluates the information redundancy of the working satellites constellations with regular and various variants of the non-standard use of the navigation field; a comparison is made with similar characteristics of GLONASS and GPS standard and relative positioning.

The results are obtained by the method of simulation mathematical modeling and are presented in the form of tables containing the parameters of the distributions of the number of navigation satellites in working constellations and geometric factors, under various constraints corresponding to emergency situations. The results obtained can be useful in assessing the accuracy and reliability of positioning by on-board navigation and landing complexes of aircraft for various purposes in difficult flight conditions.

Keywords: GNSS, navigation field, information characteristics, positioning accuracy, mathematical simulation.

Contacts: Natalia V. Ivantsevich (nviwantsevich@yandex.ru).

For citation: Baburov V. I., Vasilyeva N. V., Ivantsevich N. V. Functionality expansion of GNSS receiver when using two satellite systems // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 59. P. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/AppAstron.59.3-8>

Введение

СРНС в настоящее время используются в различных областях человеческой деятельности, в том числе в области движения транспортных средств. В силу глобальности и непрерывности навигационных полей спутниковых систем второго поколения, использующих средневысокие орбиты, они перспективны для навигации летательных аппаратов (ЛА) различного назначения, от воздушных судов (ВС) до КА и малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Реализуются как штатные, так и нештатные варианты использования навигационных полей СРНС. К штатному использованию навигационного поля относится функционирование навигационной аппаратуры потребителя (НАП) СРНС при условиях, оговоренных в интерфейсных документах на эти системы (ГЛОНАСС, ICD-GPS). В этих ситуациях должны обеспечиваться точности навигационных определений, зафиксированные в этих документах.

Однако при эксплуатации ВС, КА, БПЛА и других объектов возникают нештатные ситуации: затенения отдельных областей окружающего потребителя пространства, например горами, постройками или искусственными препятствиями; работа в условиях крена, тангажа ВС или качки морского судна; наличие отражений от подстилающей и других отражающих поверхностей; наличие организованных помех, помех по диапазону и др. В этих условиях может возникнуть необходимость в формировании так называемого «управляемого рабочего созвездия» спутников. Такое созвездие отличается от стандартного тем, что из последнего по определенной программе на потре-

бителе (П) исключаются отдельные спутники или спутники, расположенные относительно П в заданном диапазоне углов возвышения. При этом достигается эффект ослабления влияния помех на результаты координатно-временных измерений.

Реализуемость таких управляемых рабочих созвездий (РС) зависит от информационной избыточности навигационного поля СРНС и от допустимых углов возвышения спутников в РС, формируемом в НАП. Чем больше информационная избыточность навигационного поля, тем больше возможностей для создания управляемых РС в НАП. Известным способом увеличения информационной избыточности навигационного поля и, следовательно, РС в НАП, является использование совместно с ГЛОНАСС другой радионавигационной системы. Наиболее перспективным является совместное использование двух глобальных спутниковых радионавигационных систем, например, ГЛОНАСС + GPS, ГЛОНАСС + BeiDou и другие сочетания СРНС.

В работе рассмотрен первый из упомянутых вариантов формирования навигационного поля двух систем. Проанализирован состав рабочих созвездий навигационных спутников, проведена оценка информационной избыточности рабочих созвездий спутников при штатном и различных вариантах нештатного использования навигационного поля; выполнено сравнение с аналогичными характеристиками систем ГЛОНАСС и GPS. Рассмотрены также возможности использования информационной избыточности для упрощения процесса обработки информации при дифференциальных (относительных) местоопределениях путём передачи поправок потребителям по коор-

динатам вместо поправок к псевдодальностям. С этой целью исследована структура навигационного поля для двух потребителей, находящихся на заданном удалении друг от друга.

Структурные свойства глобального навигационного поля, создаваемого двумя спутниковыми системами ГЛОНАСС + GPS

Исследование структурных свойств навигационных полей СРНС ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС + GPS проводилось методом имитационного математического моделирования. Моделировались ситуации «СРНС — ВС» для N временных точек. При расчетах значение N принималось равным 100000. Каждой ситуации соответствовало расположение ВС в точке с координатами Санкт-Петербурга. Моменты времени проведения навигационных определений по сигналам СРНС выбирались равномерно из интервала повторяемости конфигурации спутников СРНС. Алгоритмы и блок-схема моделирования ситуаций «СРНС — ВС» подробно рассмотрены в монографии ([Бабуров и др., 2005](#)). Баллистические структуры ГЛОНАСС и GPS соответствовали 2021 г.: СРНС ГЛОНАСС состояла из 24 навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ), а GPS из 31 НИСЗ ([glonass-iac.ru](#)).

В результате моделирования структурных характеристик навигационных полей СРНС были получены эмпирические вероятности $P(n_e)$ количественного состава n_e рабочих созвездий НИСЗ при

различных минимально допустимых углах возвышения спутников a_{\min} . Ввиду большого объема полученных данных в табл. 1 приведены только некоторые характеристики распределений числа видимых НИСЗ СРНС ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС + GPS в зависимости от допустимых углов возвышения НИСЗ: минимальное — $n_{e \min}$, максимальное — $n_{e \max}$ и наиболее вероятное n_e^* значения числа видимых спутников n_e . В предпоследнем столбце табл. 1 даны также вероятности значений n_e^* .

Из приведенных данных следует, что при стандартных условиях использования навигационного поля СРНС ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС + GPS обладают существенной структурной и информационной избыточностью, поскольку для проведения навигационных определений необходимо, чтобы в зоне радиовидимости было не менее 4 НИСЗ при работе по одной СРНС и 5 НИСЗ — при одновременном использовании сигналов НИСЗ ГЛОНАСС и GPS. В нештатных ситуациях, в сложных условиях пилотирования, например при крене и/или тангаже ВС более 25° , проведение навигационных определений по ГЛОНАСС + GPS возможно, а по каждой из СРНС отдельно такой возможности не будет из-за отсутствия в зоне радиовидимости ВС необходимого числа спутников.

Аналогичные расчёты были выполнены и для ситуаций, когда П располагался случайным образом на поверхности Земли; полученные выводы практически совпадают с приведенными выше.

Таблица 1

Характеристики распределений числа видимых НИСЗ ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС+ GPS в зависимости от допустимых углов возвышения, г. Санкт-Петербург

a_{\min}	СРНС	$n_{e \min}$	$n_{e \max}$	n_e^*	$P(n_e^*)$
5°	ГЛОНАСС	6	12	9	0.5760
	GPS	7	15	12	0.2231
	ГЛОНАСС + GPS	14	25	19	0.2181
10°	ГЛОНАСС	6	10	8	0.5043
	GPS	5	14	9	0.2523
	ГЛОНАСС + GPS	12	23	17	0.2076
15°	ГЛОНАСС	5	9	7	0.4853
	GPS	6	12	7	0.2691
	ГЛОНАСС + GPS	11	20	15	0.2209
20°	ГЛОНАСС	4	9	6	0.5439
	GPS	4	11	6	0.2844
	ГЛОНАСС + GPS	9	20	13	0.2654
25°	ГЛОНАСС	4	8	5	0.4614
	GPS	4	11	5	0.2931
	ГЛОНАСС + GPS	8	17	11	0.2763
30°	ГЛОНАСС	3	6	4	0.6190
	GPS	3	9	4	0.3807
	ГЛОНАСС + GPS	6	14	9	0.3385

Информационные характеристики глобальных навигационных полей ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС + GPS

Необходимое количество спутников в зоне радиовидимости ВС определяет необходимые условия для выполнения навигационных определений. Но оно может быть недостаточным для местопределения с заданной точностью. Точность

навигационных определений зависит от информационных свойств рабочего созвездия НИСЗ. В качестве информационной характеристики принимаются геометрические факторы (ГФ). Максимально допустимым значением геометрического фактора по положению PDOP в нормативных документах на систему ГЛОНАСС принимается значение, равное 6 (glonass-iac.ru).

Таблица 2

Статистики геометрических факторов ГЛОНАСС+GPS
в зависимости от допустимых углов возвышения навигационных спутников

α_0	ГФ	Среднее (ГФ)	СКО (ГФ)	Max (ГФ)	P (PDOP > 6)
5°	HDOP	0.61	0.06	1.01	0.00000
	VDOP	0.97	0.12	2.26	
	PDOP	1.15	0.12	2.47	
10°	HDOP	0.68	0.08	1.48	0.00000
	VDOP	1.17	0.17	3.97	
	PDOP	1.35	0.17	4.06	
15°	HDOP	0.77	0.11	1.81	0.00007
	VDOP	1.43	0.28	5.34	
	PDOP	1.63	0.28	5.47	
20°	HDOP	0.89	0.15	2.46	0.00089
	VDOP	1.81	0.45	5.88	
	PDOP	2.03	0.45	6.00	
25°	HDOP	1.07	0.21	3.64	0.00849
	VDOP	2.36	0.67	5.92	
	PDOP	2.60	0.67	6.00	
30°	HDOP	1.31	0.32	5.06	0.06639
	VDOP	3.08	0.84	5.92	
	PDOP	3.36	0.85	6.00	

Таблица 3

Статистики геометрических факторов ГЛОНАСС
в зависимости от допустимых углов возвышения навигационных спутников

α_0	ГФ	Среднее (ГФ)	СКО (ГФ)	Max (ГФ)	P (PDOP > 6)
5°	HDOP	1.01	0.18	2.09	0.00019
	VDOP	1.66	0.35	3.89	
	PDOP	1.95	0.35	4.19	
10°	HDOP	1.16	0.24	2.43	0.01077
	VDOP	2.01	0.47	5.87	
	PDOP	2.33	0.48	5.98	
15°	HDOP	1.33	0.33	5.52	0.07664
	VDOP	2.39	0.64	5.87	
	PDOP	2.75	0.66	6.00	
20°	HDOP	1.53	0.47	5.55	0.23337
	VDOP	2.79	0.78	5.87	
	PDOP	3.21	0.81	6.00	
25°	HDOP	1.68	0.42	5.52	0.41530
	VDOP	3.23	0.90	5.88	
	PDOP	3.67	0.89	6.00	
30°	HDOP	1.85	0.46	5.47	0.47245
	VDOP	3.75	0.93	5.86	
	PDOP	4.21	0.90	6.00	

Таблица 4

Статистики геометрических факторов GPS
в зависимости от допустимых углов возвышения навигационных спутников

α_0	ГФ	Среднее (ГФ)	СКО (ГФ)	Max (ГФ)	P (PDOP > 6)
5°	HDOP	0.84	0.12	2.05	0.00003
	VDOP	1.36	0.27	5.55	
	PDOP	1.60	0.27	5.64	
10°	HDOP	0.95	0.18	3.37	0.00098
	VDOP	1.65	0.40	5.71	
	PDOP	1.92	0.41	5.98	
15°	HDOP	1.10	0.26	3.96	0.00927
	VDOP	2.06	0.61	5.83	
	PDOP	2.35	0.63	6.00	
20°	HDOP	1.30	0.36	4.99	0.04459
	VDOP	2.58	0.78	5.87	
	PDOP	2.90	0.80	6.00	
25°	HDOP	1.53	0.46	5.50	0.14969
	VDOP	3.19	0.87	5.90	
	PDOP	3.56	0.90	6.00	
30°	HDOP	1.76	0.53	5.19	0.33674
	VDOP	3.78	0.84	5.90	
	PDOP	4.20	0.87	6.00	

Для определения статистических характеристик геометрических факторов использовались те же модели ситуаций «СРНС — ВС», что и при исследовании структурных свойств навигационных полей ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС + GPS.

Результаты моделирования в виде статистических характеристик ГФ по горизонтальным (HDOP) и вертикальной (VDOP) координатам и по положению в пространстве (PDOP) для СРНС ГЛОНАСС + GPS, ГЛОНАСС и GPS для различных минимально допустимых углов возвышения α_0 представлены в табл. 2, 3 и 4 соответственно.

Из приведенных данных в табл. 2, 3 и 4 следует, что при местоопределениях по двум системам ГЛОНАСС + GPS возможно получение тех же показателей точности, которые заявлены в интерфейсных документах на одну СРНС при допустимом угле места 5°, при допустимом угле места 25°, с вероятностью не менее 0.99.

Перспективы использования навигационного поля двух СРНС для дифференциальных местоопределений с передачей поправок по координатам

В настоящее время для дифференциальных местоопределений, являющихся частным случаем относительных местоопределений, используются способы, основанные на передаче поправок к измеряемым радионавигационным параметрам, например к псевдодальностям. Поправки переда-

ются от контрольно-корректирующей станции (ККС) на определяющийся объект по каждому спутнику из числа образующих рабочее созвездие. Известен также метод коррекции координат. В этом случае поправки передаются по координатам, например по широте, долготе и высоте расположения П. Объем передаваемой информации при этом значительно меньше, и проще алгоритмы выработки поправок и их использования в НАП. Для реализации этого метода необходимо, чтобы свойства навигационного поля СРНС были приблизительно одинаковыми в местах расположения ККС и П. Поэтому была исследована возможность использования информационной избыточности объединённого созвездия для обоснования возможности передачи поправок по координатам для реализации преимуществ этого метода. Ниже исследуются характеристики навигационного поля ГЛОНАСС+GPS для двух потребителей, разнесённых в пространстве на заданную величину, для одних и тех же моментов времени. Если рабочие созвездия и геометрические факторы для них совпадают с высокой вероятностью, то это означает, что поправки к координатам для этих потребителей тоже должны совпадать. Моделировались следующие ситуации. Один из потребителей находится в точке с координатами 60° с. ш., 30° в. д. на поверхности Земли, $h = 0$. Второй потребитель расположен на расстоянии ΔL от первого в произвольном направлении. Были рассчитаны вероят-

Вероятность несовпадения рабочих созвездий для двух потребителей, расположенных на заданном удалении друг от друга

α_{\min}	ΔL , км	ГЛОНАСС	GPS	ГЛОНАСС +GPS
5°	10.0	0.00475	0.00772	0.01243
	50.0	0.02432	0.03788	0.06142
10°	10.0	0.00512	0.00871	0.01377
	50.0	0.02479	0.04552	0.06937

ности P того, что в выбранный случайным образом момент времени из интервала повторяемости спутниковой конфигурации рабочие созвездия НКА для обоих потребителей будут различны, то есть будут отличаться на 1 и более НИСЗ. Были произведены расчеты для различных удалений ΔL и минимально допустимых углов возвышения НКА α_{\min} . Определение видимых НКА для рабочих созвездий осуществлялось для спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и совмещенной ГЛОНАСС и GPS. Объем выборки составлял 100000. Результаты моделирования представлены в табл. 5.

Заключение

Проведенные исследования структурных и информационных характеристик глобального навигационного поля, создаваемого двумя спутниковыми радионавигационными системами, позволяют расширить круг задач, решаемых при навигации различных классов потребителей, в том числе — при нештатном использовании навигационного поля. В частности, полученные результаты могут быть полезны при оценке точности и надёжности навигационно-временных определений бортовыми навигационно-посадочными комплексами ЛА различного назначения в сложных условиях выполнения полётов.

Из приведенных данных следует, что с вероятностью не менее 0.95 рабочие созвездия НИСЗ для двух потребителей, расположенных на удалении один от другого до 50 км, будут одинаковы при работе по каждой из СРНС (ГЛОНАСС, GPS) — при допустимых углах возвышения НИСЗ до 10°. При работе по объединённому созвездию при тех же условиях соответствующее значение вероятности будет не менее 0.93. Эти данные могут быть использованы при обосновании целесообразности применения в локальных дифференциальных системах метода дифференциальной коррекции по координатам.

Литература

Бабуров В. И., Васильева Н. В., Иванцевич Н. В. Совместное использование навигационных полей ГЛОНАСС и GPS в сложных условиях пилотирования воздушных судов в Арктике // Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2020)». Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 г. Материалы конференции. Часть 1. 2020 С. 332.

Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС // Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М., 2008.

ИАЦ. Состав и состояние орбитальной группировки ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-iac.ru/glonass/> (дата обращения 01.12.2021).