

Анализ применения бортовой аппаратуры межспутниковых измерений для контроля целостности ГЛОНАСС

В. В. Куршин, *д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Р. Б. Сятковский, *contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. А. Панов, *contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье приведены результаты анализа применения информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений для решения задачи контроля целостности системы ГЛОНАСС. Данные результаты были получены с использованием математического моделирования алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС, использующего информацию межспутниковых измерений. В качестве характеристик основных отказов обслуживания НКА ГЛОНАСС при моделировании использовались данные Стандарта эксплуатационных характеристик открытого сервиса ГЛОНАСС (СТЭХОС). Полученные результаты контроля целостности показывают их соответствие требованиям основных категорий потребителей ГЛОНАСС.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, ГНСС, целостность, алгоритмы контроля целостности

Analysis of the Application of Onboard Inter-Satellite Measurement Equipment for Monitoring of the GLONASS Integrity

V. V. Kurshin, *Dr. Sci. (Engineering), vkurshin@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

R. B. Syatkovskiy, *contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. A. Panov, *contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of the analysis of the use of information from the onboard equipment for inter-satellite measurements to solve the problem of monitoring the integrity of the GLONASS system. These results were obtained from mathematical modeling of the GLONASS integrity control algorithm using information from inter-satellite measurements. The GLONASS Open Service Performance Standard (OS PS) data were used as characteristics of the main GLONASS service failures in the simulation. The obtained results of the integrity control show their compliance with the requirements of the main categories of GLONASS consumers.

Keywords: GLONASS, GNSS, integrity, integrity control algorithms

Введение

Эффективность применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в большой степени зависит от возможности системы оперативно обнаруживать неправильно функционирующий навигационный космический аппарат (НКА). Несвоевременное исключение неверной информации, излучаемой спутником, может привести к значительному снижению точности навигационных определений потребителя вплоть до неверного определения местоположения.

Наиболее высокие требования к целостности предъявляются авиационными потребителями [1] при точном заходе на посадку по категории I — время обнаружения $t = 6$ с, вероятность обнаружения $P = 1-2 \cdot 10^{-7}$ (табл. 1).

В настоящее время подобным требованиям потребителей по целостности в полной мере не соответствует ни одна из существующих ГНСС, в частности время обнаружения неисправного НКА в си-

стеме ГЛОНАСС может достигать 16 часов [2], а в системе GPS — 6 часов [3]. Это затрудняет их использование в качестве основных навигационных средств в ряде критически важных навигационных приложений.

Для решения проблемы контроля целостности предлагается использовать информацию бортовой аппаратуры межспутниковых измерений (БАМИ) системы ГЛОНАСС. Сравнение измеряемых БАМИ значений дальности между взаимовидимыми НКА с расчетными значениями расстояний между ними, по данным эфемерид, позволяют выявить отклонения превышающие пороговое значение и определить НКА, излучающий неверную эфемеридно-временную информацию (рис. 1).

В статье предлагается алгоритм контроля целостности ГЛОНАСС на основе использования информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений (далее — алгоритм) и результаты математического моделирования его работы.

Таблица 1. Требования к характеристикам сигнала в пространстве

Типовая операция	Точность по горизонтали, 2 СКО/СКО, м	Точность по вертикали, 2 СКО/СКО, м	Целостность	Время до предупреждения, с	Непрерывность	Эксплуатационная готовность
На маршруте	3700/1850	Не назначена	$1-1 \cdot 10^{-7}/\text{ч}$	300	$1-1 \times 10^{-4}/\text{ч} - 1-1 \times 10^{-8}/\text{ч}$	0,99–0,99999
На маршруте и в зоне аэродрома	740/370	Не назначена	$1-1 \cdot 10^{-7}/\text{ч}$	15	$1-1 \times 10^{-4}/\text{ч} - 1-1 \times 10^{-8}/\text{ч}$	0,99–0,99999
Начальный заход, промежуточный заход, неточный заход (НРА), вылет	220/110	Не назначена	$1-1 \cdot 10^{-7}/\text{ч}$	10	$1-1 \times 10^{-4}/\text{ч} - 1-1 \times 10^{-8}/\text{ч}$	0,99–0,99999
Неточный заход на посадку с управлением по вертикали (APV-I)	16/8	20/10	$1-2 \cdot 10^{-7}$ за заход	10	$1-8 \times 10^{-6}$ в любые 15 с	0,99–0,99999
Неточный заход на посадку с управлением по вертикали (APV-II)	16/8	8/4	$1-2 \cdot 10^{-7}$ за заход	6	$1-8 \times 10^{-6}$ в любые 15 с	0,99–0,99999
Точный заход на посадку по категории I	16/8	(6–4)/(3–2)	$1-2 \cdot 10^{-7}$ за заход	6	$1-8 \times 10^{-6}$ в любые 15 с	0,99–0,99999

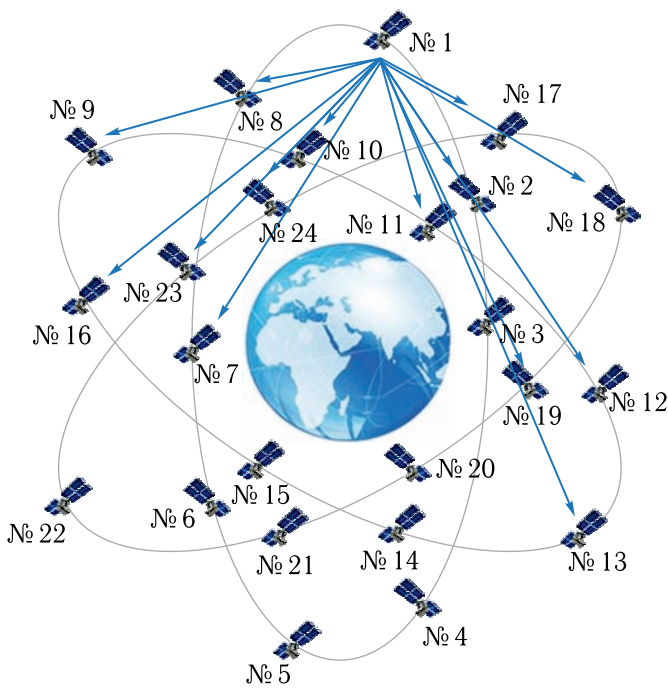


Рис. 1. НКА ГЛОНАСС, взаимовидимые посредством БАМИ

Описание алгоритма

Работа алгоритма подразумевает, что каждый НКА ГЛОНАСС оснащен БАМИ, обеспечивающей непрерывное измерение расстояний и передачу эфемеридно-временной информации между всеми НКА системы.

Решение о достоверности/недостоверности излучаемой навигационной информации принимается непосредственно на борту каждого НКА. Алгоритм одинаков для всех НКА системы и на примере выбранного НКА_{*i*} выглядит следующим образом (рис. 2):

1) передача информационно-измерительного радиосигнала БАМИ НКА₁, НКА₂, ... НКА_{*m*}, где *m* — количество НКА ГЛОНАСС;

2) прием НКА_{*i*} (*i* = 1, 2, ... *m*) информационно-измерительного радиосигнала БАМИ от НКА, в зоне радиовидимости которых он находится;

3) измерение НКА_{*i*} расстояний до радиовидимых НКА по измеренному времени задержки распространения принятых от них информационно-измерительных радиосигналов БАМИ:

$$R_{измj} = c \cdot \Delta t_j + c \cdot \Delta t_j^{ШВ}, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где *n* — количество радиовидимых НКА, *n* < *m*;

c — скорость света;

Δt_j — время задержки распространения информационно-измерительного радиосигнала от НКА_{*j*};

$\Delta t_j^{ШВ}$ — сдвиг шкалы времени (ШВ) НКА_{*j*} относительно ШВ системы ГЛОНАСС (извлекаются из информационно-измерительных радиосигналов БАМИ);

4) расчет НКА_{*i*} расстояний до радиовидимых НКА по собственным эфемеридам и эфемеридам, извлеченным из принятых от них информационно-измерительных радиосигналов БАМИ:

$$R_{расчj} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где *x_i*, *y_i*, *z_i* — эфемериды НКА_{*i*}; *x_j*, *y_j*, *z_j* — эфемериды НКА_{*j*};

5) вычисление модулей разности между измеренными и рассчитанными значениями расстояний от НКА_{*i*} до радиовидимых НКА:

$$\Delta R_j = |R_{измj} - R_{расчj}|, \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

6) сравнение ΔR_j с пороговым значением $\Delta R_{порог}$ для принятия решения о достоверности или недостоверности излучаемой навигационной информации (НИ) НКА_{*i*} по мажоритарному методу.

При нахождении НКА_{*i*} в зоне радиовидимости трех НКА принятие решения будет выглядеть следующим образом:

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$\Delta R_1 < \Delta R_{порог}$	$\Delta R_1 > \Delta R_{порог}$	$\Delta R_1 > \Delta R_{порог}$	$\Delta R_1 > \Delta R_{порог}$
$\Delta R_2 < \Delta R_{порог}$	$\Delta R_2 < \Delta R_{порог}$	$\Delta R_2 > \Delta R_{порог}$	$\Delta R_2 > \Delta R_{порог}$
$\Delta R_3 < \Delta R_{порог}$	$\Delta R_3 < \Delta R_{порог}$	$\Delta R_3 < \Delta R_{порог}$	$\Delta R_3 > \Delta R_{порог}$
Решение: НИ НКА _{<i>i</i>} — достоверна	Решение: НИ НКА _{<i>i</i>} — достоверна	Решение: НИ НКА _{<i>i</i>} — недостоверна	Решение: НИ НКА _{<i>i</i>} — недостоверна

7) принятие решения, что НИ, излучаемая НКА_{*i*}:

– достоверна — переход к выполнению алгоритма с пункта 1;

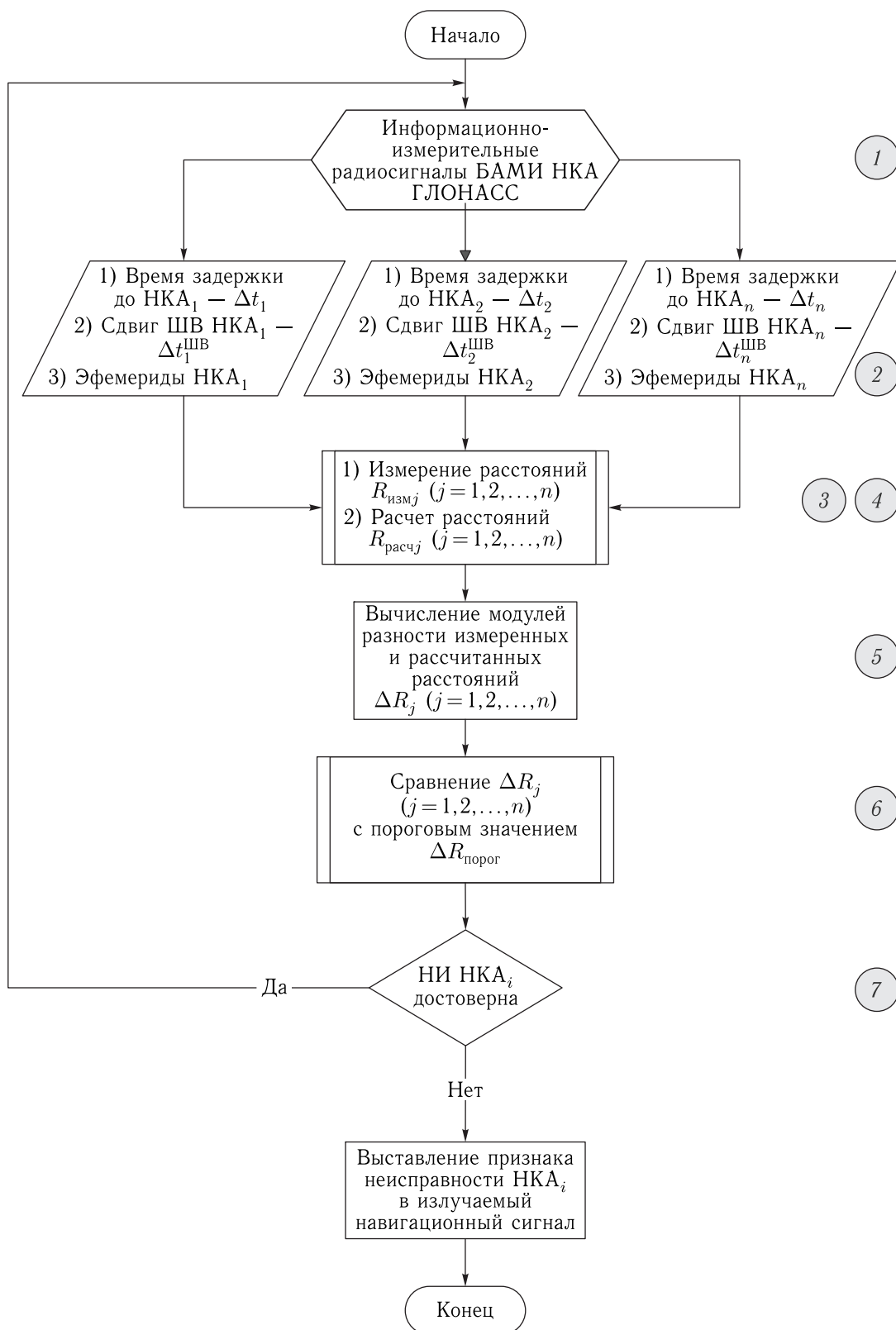


Рис. 2. Блок-схема алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС на основе использования информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений

– недостоверна — выставление признака неисправности НКА_i в излучаемый навигационный сигнал, получив который навигационная аппаратура потребителя не будет использовать НИ НКА_i для определения своего местоположения.

Математическое моделирование работы алгоритма

Для проверки эффективности работы алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС на основе использования информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений было проведено математическое моделирование его работы и ситуаций нарушения целостности системы ГЛОНАСС.

Положение космических аппаратов на орбите задается кеплеровыми элементами орбиты (КЭО). Эфемериды НКА ГЛОНАСС, излучаемые в составе цифровой информации радионавигационных сигналов, задаются в геоцентрической системе координат (ГСК).

Для системы ГЛОНАСС-К статистические данные погрешностей определения местоположения НКА (табл. 2) задаются в системе координат НКА и представлены в ИКД ГЛОНАСС [4].

Таблица 2. Составляющие погрешности ГЛОНАСС-К

Составляющая погрешности	СКО погрешности определения	
	местоположения, м	скорости, см/с
Вдоль орбиты	3,5	0,02
По бинормали к орбите	3,5	0,02
По радиусу-вектору	0,5	0,17

Величины допустимых погрешностей СКО даны по трем направлениям движения НКА, которые можно использовать для формирования возмущенной орбиты движения НКА.

При моделировании процессов расчета и измерения расстояний между НКА необходимо использовать координаты НКА, заданные в одной системе координат, для этого необходимо преобразовать параметры орбит НКА ГЛОНАСС из КЭО в ГСК.

Для перевода параметров орбиты НКА ГЛОНАСС из КЭО в ГСК был разработан программный блок с использованием уравнения невозмущенного движения НКА в инерциальной системе координат с использованием орбитальных элементов [5].

Для моделирования движения НКА по орбите, подверженной возмущениям, используются величины допустимых погрешностей СКО по трем направлениям движения НКА (табл. 2).

Согласно данным Стандарта эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС) ГЛОНАСС [2] существуют два вида основных отказов по статистике:

1) отказы, связанные с возникновением скачков ошибок (табл. 3);

2) отказы, связанные с возникновением нарастающих ошибок (табл. 4).

Математическое моделирование алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС на основе использования информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений для проверки правильности расчета порогового значения разности измеренных и рассчитанных расстояний между НКА $\Delta R_{\text{порог}}$ было проведено по методу Монте-Карло — закладка эфемерид на борт НКА была смоделирована 10^7 раз. Дополнительные ошибки при этом не вносились.

Результаты проведенного моделирования подтвердили теоретический расчет на основании статистических данных [2] порогового значения разности измеренных и рассчитанных расстояний между НКА $\Delta R_{\text{порог}}$, которое составляет 59,7 м (рис. 3).

Результаты математического моделирования алгоритма

Моделирование скачков ошибок проводилось для значений скачков ошибок эфемерид: 70 м, 300 м и 700 м. На 50-й секунде моделирования в координаты одного из НКА вносилась ошибка и фиксировались моменты превышения значений разностей между измеренными и рассчитанными значениями расстояний между всеми радиовидимыми НКА (ΔR) порогового значения $R_{\text{порог}}$.

Результаты математического моделирования работы алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС

Таблица 3. Характеристики отказов, связанных с возникновением скачков ошибок (Worst-case SIS URE > 70 м) НКА «ГЛОНАСС-М», 2009–2015

Тип отказа	Характер динамики URE	Кол-во отказов	Общее время, ч	Вероятность, 1e-6/ч/НКА	Вероятность, 1e-6/НКА
Независимый (1 НКА)	Скачок 70–300 м	3	5	2,04	3,40
Независимый (1 НКА)	Скачок 300–700 м	6	32,34	4,08	21,97
Независимый (1 НКА)	Скачок > 700 м	24	26,99	16,31	18,34

Таблица 4. Характеристики отказов, связанных с возникновением нарастающих ошибок (Worst-case SIS URE > 18 м) НКА «ГЛОНАСС-М», 2009–2015

Тип отказа	Характер динамики URE	Кол-во отказов	Общее время, ч	Вероятность, 1e-6/ч/НКА	Вероятность, 1e-6/НКА
Независимый (1 НКА)	Линейный рост < 0,01 м/с	266	1573,02	180,75	1068,86
Независимый (1 НКА)	Линейный рост 0,01–0,05 м/с	11	72,84	7,47	49,49

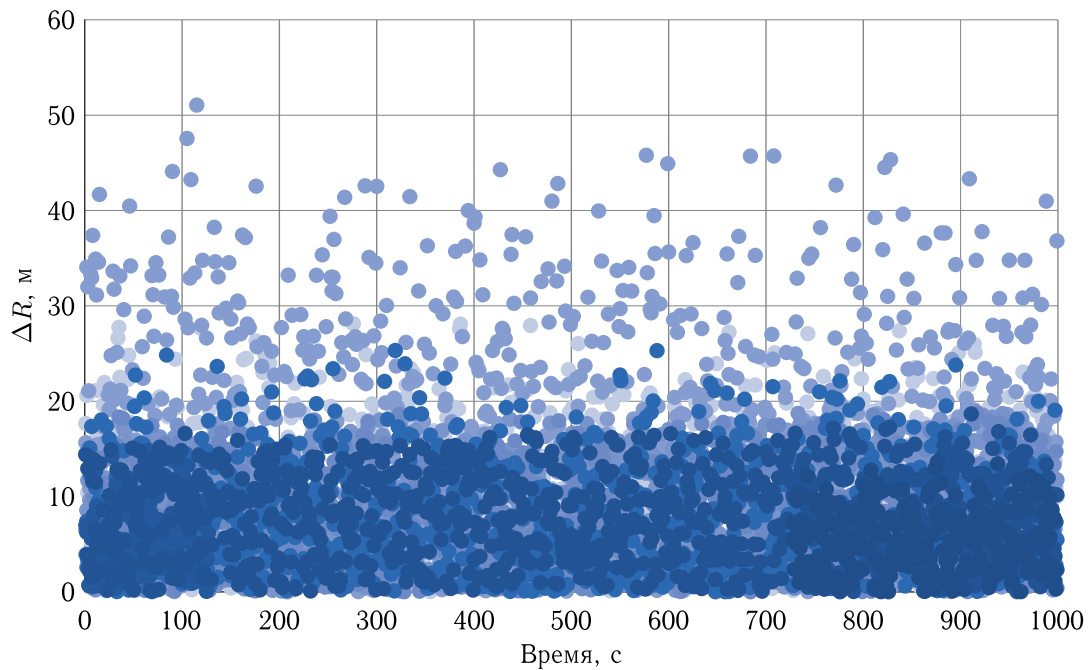


Рис. 3. Значения разности измеренных и рассчитанных расстояний между НКА ΔR при моделировании по методу Монте-Карло

на основе использования информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений представлены в табличном и графическом видах (объемные гистограммы).

Значения разности между измеренными и рассчитанными значениями расстояний между радиовидимыми НКА ГЛОНАСС (ΔR) при моделирова-

нии скачков ошибки на 70 м, 300 м и 700 м для неисправного НКА представлены в табл. 5, 6 и 7 и отображены на рис. 4, 5 и 6 соответственно.

Результаты моделирования скачков ошибок показывают, что они определяются алгоритмом на следующей секунде после их возникновения, независимо от величины ошибки.

Таблица 5. Значения ΔR (м) при скачке ошибки на 70 м для неисправного НКА (КА 1)

Время, с	КА 2	КА 8	КА 9	КА 10	КА 11	КА 16	КА 17	КА 18	КА 19
1	3,38	1,47	20,11	3,64	3,27	—	—	—	9,34
2	2,62	11,88	22,08	2,48	1,57	11,85	11,94	17,79	8,34
...									
47	11,05	0,21	6,68	23,28	12,20	1,85	0,39	13,08	15,39
48	7,61	14,97	21,58	21,20	0,03	22,67	1,78	3,72	12,84
49	12,43	11,79	4,37	12,20	6,08	10,11	9,70	16,78	11,43
50	72,61	100,02	80,64	80,64	71,28	79,65	71,91	71,91	72,48
51	73,97	91,05	80,26	80,26	73,81	80,17	79,18	79,18	73,98
52	78,93	82,59	74,62	74,62	75,44	74,69	81,69	81,69	70,46
53	79,19	85,36	74,87	74,87	71,41	82,02	71,71	71,71	72,38
54	72,59	83,70	73,72	73,72	77,17	91,50	70,23	70,23	71,67
55	70,31	76,59	85,75	85,75	73,66	78,58	73,58	73,58	73,64

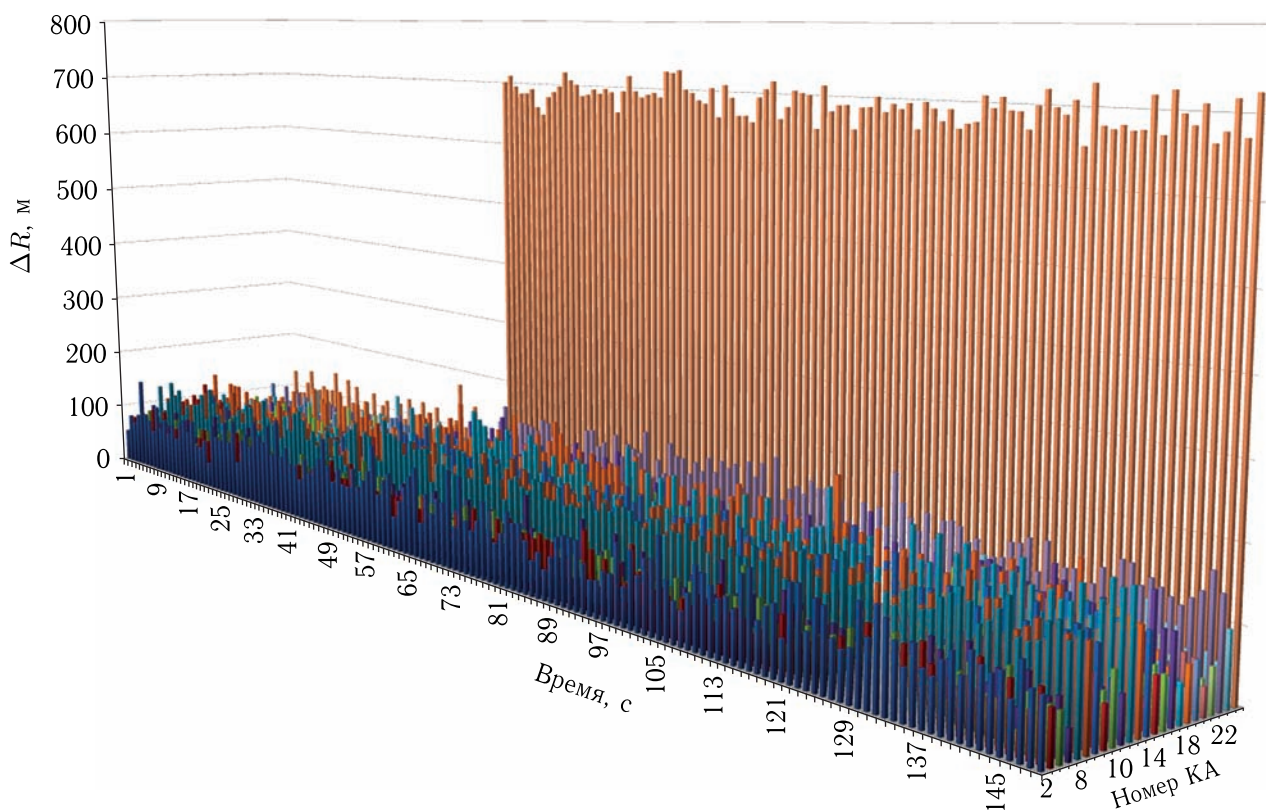


Рис. 4. Объемная гистограмма значений ΔR (м) при скачке ошибки 70 м для неисправного НКА (КА 1)

Таблица 6. Значения ΔR (м) при скачке ошибки на 300 м для неисправного НКА (КА 1)

Время, с	КА 2	КА 8	КА 9	КА 10	КА 11	КА 16	КА 17	КА 18	КА 19
1	11,07	0,12	12,43	6,95	8,50	—	—	—	9,41
2	2,19	29,86	5,08	2,91	5,29	4,77	4,89	19,82	1,69
...									
46	14,71	24,25	4,31	22,67	3,59	31,39	6,35	6,57	3,00
47	6,51	2,90	15,39	19,49	15,87	3,03	3,75	9,16	9,09
48	26,29	11,68	4,14	6,42	7,30	32,03	19,34	3,98	16,50
49	18,09	1,77	16,36	5,99	16,00	25,49	10,67	1,18	16,12
50	304,28	306,86	304,16	304,16	300,65	311,30	306,73	306,73	300,07
51	302,98	302,71	312,42	312,42	303,19	315,46	308,69	308,69	300,54
52	310,13	310,04	315,50	315,50	305,14	310,40	300,31	300,31	305,31
53	300,66	314,82	302,16	302,16	301,51	301,62	311,70	311,70	303,72
54	304,05	322,24	317,74	317,74	303,19	300,77	312,70	312,70	304,43

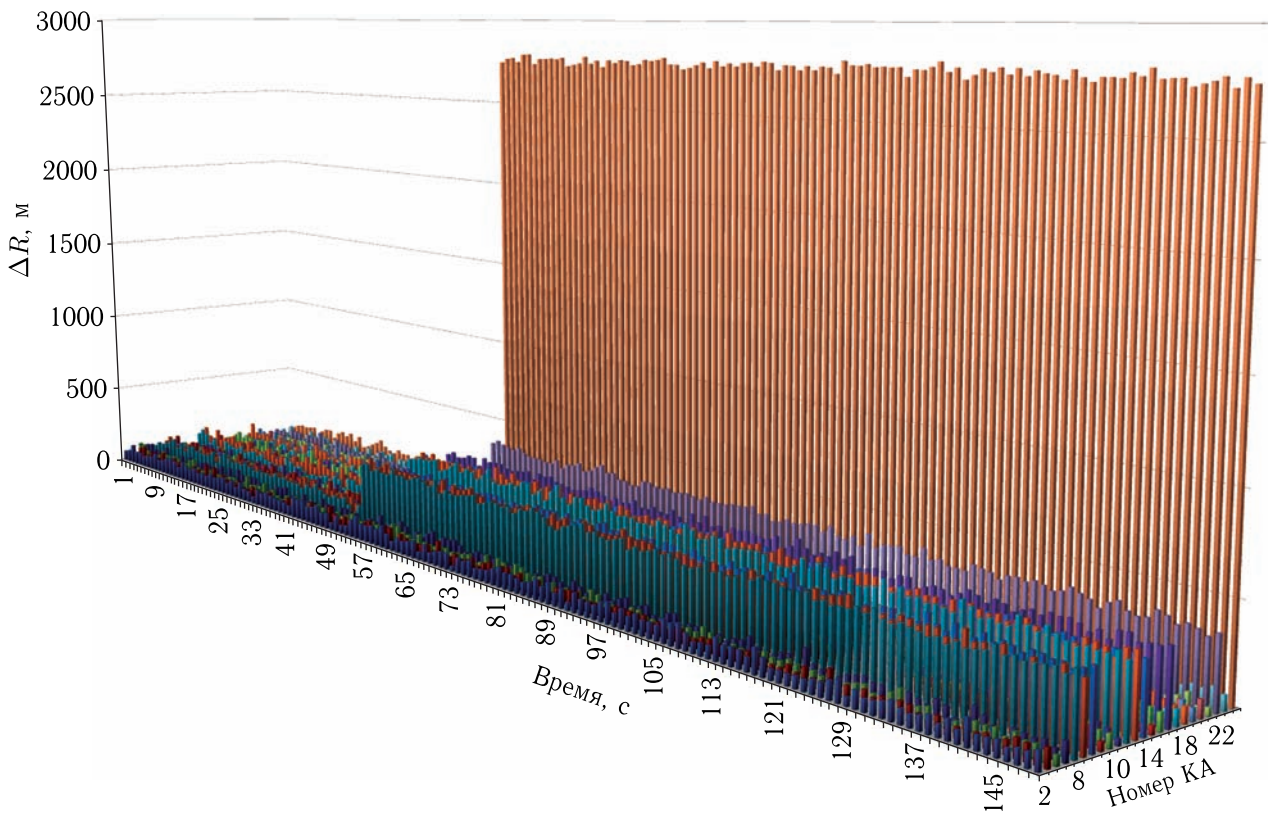


Рис. 5. Объемная гистограмма значений ΔR (м) при скачке ошибки 300 м для неисправного НКА (КА 1)

Таблица 7. Значения ΔR (м) при скачке ошибки на 700 м для одного неисправного НКА (КА 1)

Время, с	КА 2	КА 8	КА 9	КА 10	КА 11	КА 16	КА 17	КА 18	КА 19
1	7,12	15,47	13,34	5,62	0,02	—	—	—	9,65
2	16,29	7,73	15,25	13,01	13,02	23,96	12,13	5,49	7,29
...									
47	5,57	3,89	16,25	0,41	1,48	11,46	13,65	13,79	2,64
48	3,89	4,52	5,79	16,03	17,18	4,70	16,45	12,37	12,80
49	7,13	5,00	15,36	3,92	12,21	26,81	21,70	4,90	11,15
50	700,53	722,74	702,63	702,63	703,01	704,35	708,62	708,62	704,39
51	708,77	743,80	705,79	705,79	707,61	714,06	700,65	700,65	700,22
52	706,56	711,63	703,67	703,67	704,33	714,07	700,33	700,33	703,06
53	705,57	705,10	716,33	716,33	703,03	707,95	714,80	714,80	700,68
54	703,69	706,06	715,63	715,63	704,60	720,91	704,46	704,46	705,48
55	701,65	705,65	713,90	713,90	700,24	708,02	711,03	711,03	700,48

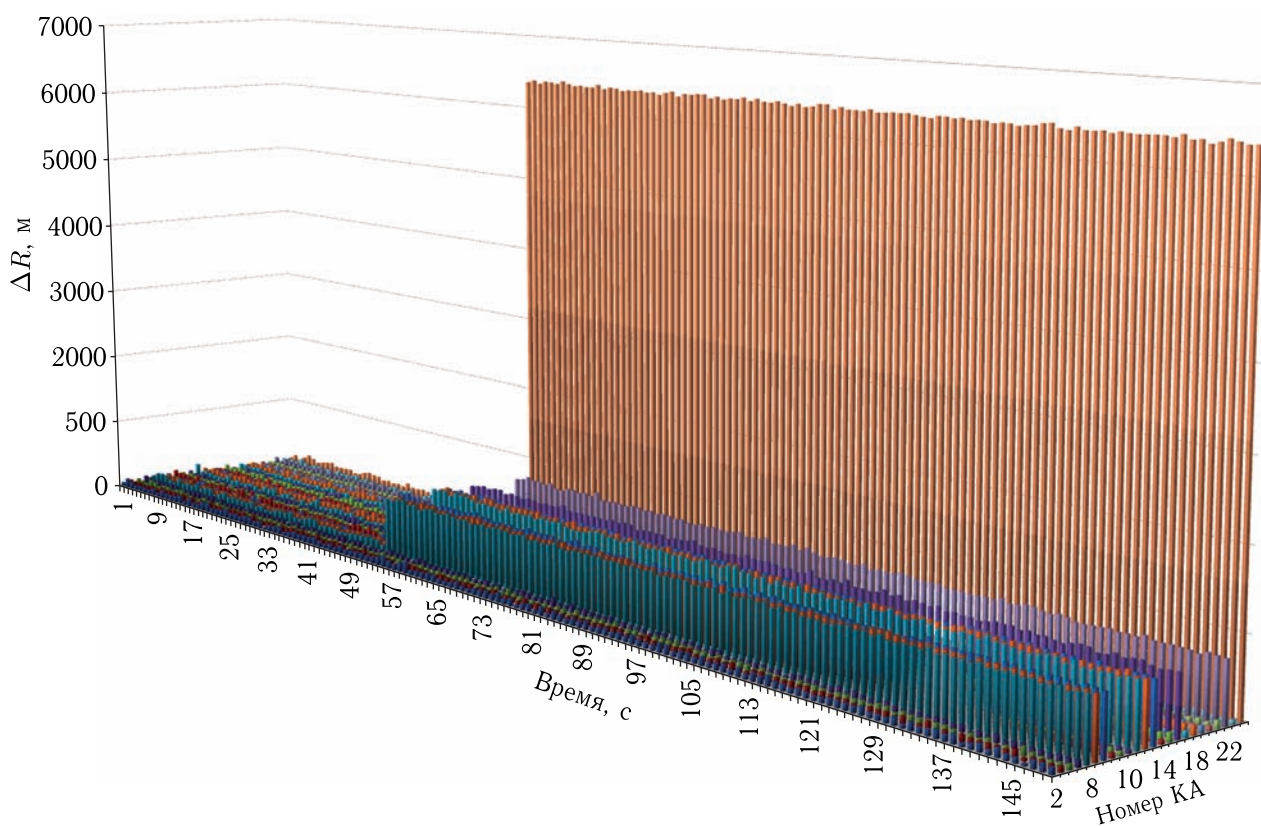


Рис. 6. Объемная гистограмма значений ΔR (м) при скачке ошибки 700 м для одного неисправного НКА (КА 1)

Таблица 8. Значения ΔR (м) при нарастающей ошибке 0,01 м/с для одного неисправного НКА (КА 1)

Время, с	КА 2	КА 8	КА 9	КА 11	КА 16	КА 17	КА 18	КА 19
1	10,31	4,65	5,19	18,62	—	—	—	7,85
...								
5039	55,18	53,95	55,30	70,13	50,67	53,55	66,95	54,30
5040	54,96	53,40	60,92	62,25	66,18	60,59	61,31	59,75
5041	50,43	50,43	63,56	59,99	60,06	58,29	61,64	82,19
5042	75,30	50,44	67,56	65,25	61,52	54,46	55,49	63,69
5043	67,27	54,59	68,46	52,16	56,07	52,25	53,11	64,68
5044	52,42	52,93	70,24	67,68	55,21	52,11	50,76	52,24
5045	51,48	52,63	56,93	65,73	55,67	53,46	59,02	66,55
5046	64,41	50,84	51,94	69,64	55,81	54,24	59,4	67,00
5047	61,85	52,13	58,78	54,95	59,31	56,58	72,42	67,03
...								
5932	73,99	64,00	74,17	69,24	62,49	73,34	59,67	63,43
5933	68,13	67,84	76,49	84,01	66,78	60,88	66,21	76,33
5934	76,95	63,83	70,14	66,27	63,20	63,91	59,37	61,40
5935	60,56	64,53	73,51	85,94	64,31	59,77	72,63	79,87

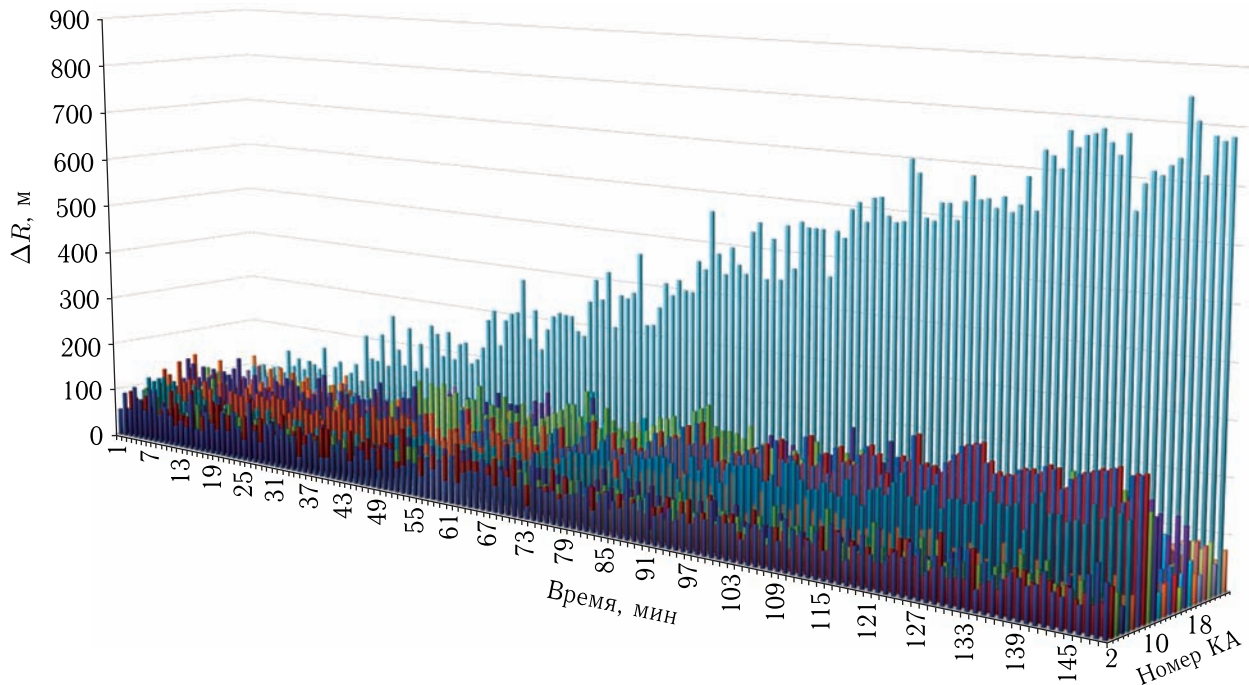


Рис. 7. Объемная гистограмма значений ΔR (м) при нарастающей ошибке 0,01 м/с для одного неисправного НКА (КА 1)

Таблица 9. Значения ΔR (м) при нарастающей ошибке 0,05 м/с для одного неисправного НКА (КА 1)

Время, с	КА 2	КА 8	КА 9	КА 10	КА 16	КА 21	КА 22
1	8,66	8,71	15,97	12,48	14,45	7,61	6,38
2	12,43	8,91	17,53	8,34	11,43	9,46	12,43
...							
1146	57,96	59,51	58,53	59,42	59,24	58,98	57,54
1147	58,58	59,40	64,66	58,92	59,26	66,05	58,85
1148	59,58	61,40	64,66	58,92	66,26	66,45	61,04
1149	61,05	60,79	68,78	64,64	65,14	61,06	61,05
1150	58,78	61,41	64,66	61,38	66,49	60,72	59,75
1151	61,23	59,13	66,96	59,27	70,12	59,92	60,18
1152	60,49	60,01	64,01	64,41	64,15	60,29	61,44
1153	63,69	58,89	58,99	61,33	63,24	61,77	62,27
1154	60,05	59,61	59,81	72,09	59,34	64,76	62,00
1155	59,95	59,69	60,97	74,15	71,79	63,98	61,17

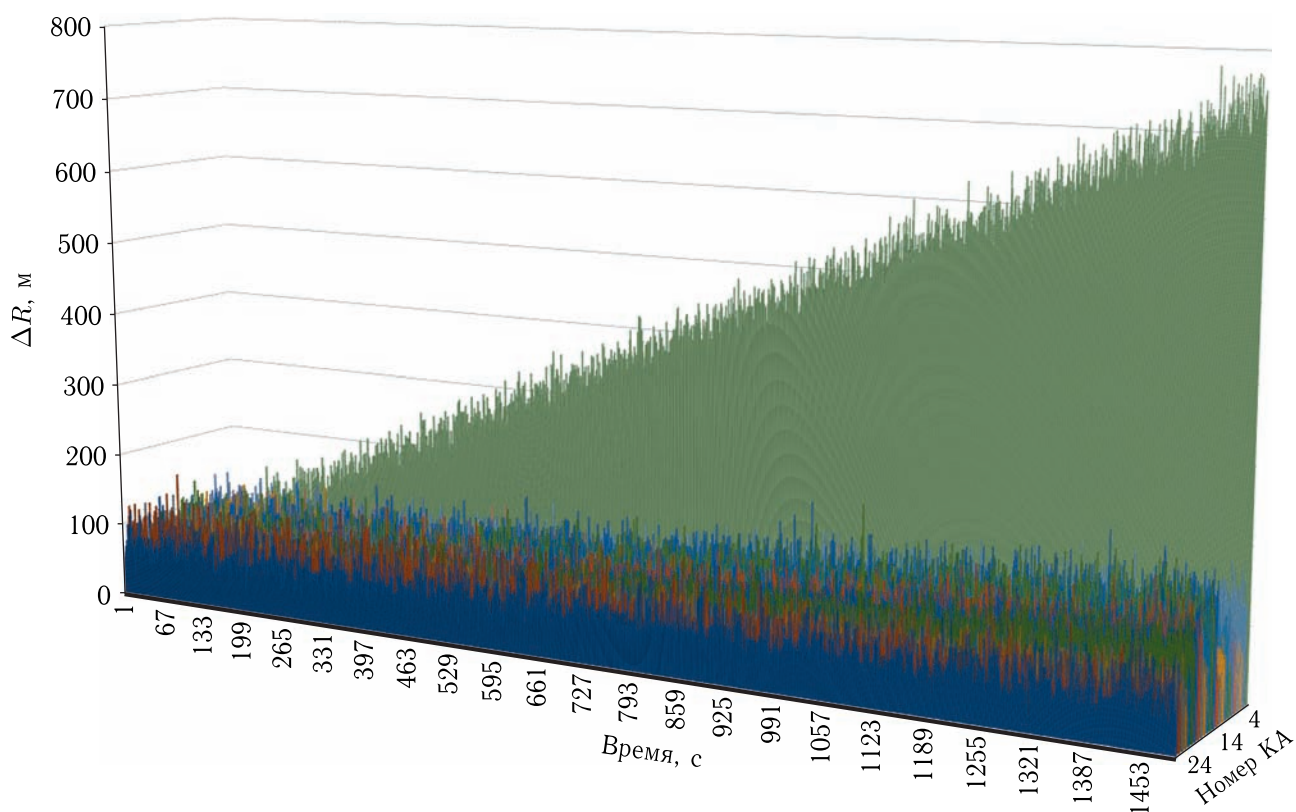


Рис. 8. Объемная гистограмма значений ΔR (м) при нарастающей ошибке 0,05 м/с для одного неисправного НКА (КА 1)

Моделирование нарастающих ошибок проводилось для значений линейного роста ошибки — 0,01 м/с и 0,05 м/с.

На первом шаге моделирования в координаты одного из НКА вносилась нарастающая ошибка и фиксировались моменты превышения значений разностей между измеренными и рассчитанными значениями расстояний между всеми радиовидимыми НКА (ΔR) порогового значения $R_{\text{порог}}$.

Значения разности между измеренными и рассчитанными значениями расстояний между радиовидимыми НКА ГЛОНАСС (ΔR) при моделировании нарастающих ошибок 0,01 м/с и 0,05 м/с для неисправного НКА представлены в табл. 8 и 9 и отображены на рис. 7 и 8 соответственно.

Результаты моделирования нарастающих ошибок показывают, что при достижении ими порогового значения они фиксируются алгоритмом на 1-й или 2-й секунде.

Заключение

Проведенный анализ применения бортовой аппаратуры межспутниковых измерений для контроля целостности и математическое моделирование предложенного алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС на основе использования информации БАМИ показал следующее:

1) отказы НКА ГЛОНАСС, связанные с возникновением скачков ошибок и связанные с возникновением нарастающих ошибок, определяются практически сразу, как только происходит превышение пороговых значений, и время доведения информации о нарушении целостности ГЛОНАСС зависит только от времени проведения измерений БАМИ и выставления признака неисправности кадра в радиона-

вигационный сигнал, что в данном случае меньше $t \leq 6$ с;

2) моделирование работы алгоритма по методу Монте-Карло показало, что вероятность обнаружения нарушения целостности составляет $P \geq 1-2 \times 10^{-7}$.

Таким образом, результаты математического моделирования алгоритма контроля целостности ГЛОНАСС на основе использования информации бортовой аппаратуры межспутниковых измерений показали их соответствие требованиям основных категорий потребителей ГНСС.

Список литературы

1. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Авиационная электросвязь. Том 1. Радионавигационные средства. 7-е изд., июль 2018 г. Поправка к SARPs ИКАО по GNSS, том 1, приложение 10, начало применения 08.11.2018.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Редакция 2.2 (6.2019).
3. Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance standard. Fifth Edition, September 2020.
4. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. Москва, 2008.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.05.2023

Дата принятия рукописи
в печать 07.08.2023