

Результаты международных испытаний этапа III фазы «Демонстрация и Оценка» среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ

Д. В. Антонов, *antonov_dv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Б. Варгин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Воропаева, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Киреев, *к. т. н.*, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Масловский, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Федосеев, *fedoseev_av@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Представлены результаты международных испытаний КОСПАС–САРСАТ по оценке точности определения координат аварийных радиобуев (АРБ) на этапе III фазы «Демонстрация и Оценка» (ДиО) среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС). Результаты испытаний получены на станциях приема и обработки информации (СОСПОИ) в г. Москве (Россия), в г. Тулузе (Франция), в штате Мэриленд (США) и на о. Шпицберген (Норвегия). По результатам проведенных испытаний погрешность местоопределения АРБ, полученная на московской СОСПОИ, составила 0,64–0,82 км в 95 % случаев при использовании штатных спутников с транспондерами *L*-диапазона, что в 6–8 раз меньше заданной требованиями к системе СССПС. Проведено сравнение и подтверждено соответствие теоретически рассчитанных и реально полученных во время испытаний погрешностей местоопределения. Отмечено негативное влияние неполного космического сегмента на погрешность местоопределения. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными московской СОСПОИ на этапе II фазы «ДиО» (с использованием спутников с транспондерами *S*-диапазона), и результатами, предоставленными другими национальными администрациями, участвовавшими на этапах II и III фазы ДиО СССПС.

Ключевые слова: космический аппарат, КОСПАС–САРСАТ, СССПС, аварийные радиобуи, АРБ

Results of Phase III of the International COSPAS–SARSAT MEOSAR Demonstration and Evaluation Test Campaign

D. V. Antonov, *antonov_dv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. B. Vargin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. V. Voropaeva, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. A. Kireev, *Cand. Sci. (Engineering)*, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. Yu. Maslovskiy, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. V. Fedoseev, *fedoseev_av@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The results of world wide demonstration and evaluation (D&E) test campaign aimed at characterizing the performance of the COSPAS–SARSAT medium-orbit satellite search and rescue (MEOSAR) system with respect to its capability to independently locate COSPAS-SARSAT first-generation 406 MHz distress radio beacons (DR) are presented. The location accuracy estimates were collected during Phase III of the MEOSAR D&E at the local user terminals (MEOLUTs) in Moscow, in Toulouse (France), in the state of Maryland (USA) and on Spitsbergen (Norway). According to the results, the location error achieved at the Moscow MEOLUT was 0.64–0.82 km in 95% of cases when using MEOSAR L-band satellites, which is 6–8 times lower than the requirements established for the MEOSAR system. The comparison between theoretical location accuracy estimates and actual location errors is made and the validity of the calculations is demonstrated. The article also notes the negative impact of an incomplete MEOSAR space segment on the location error. Finally, the results are compared with the results obtained at the Moscow MEOLUT in phase II of the D&E (using satellites with S-band transponders) and the results provided by other National Administrations that participated in phases II and III of the MEOSAR D&E.

Keywords: spacecraft, COSPAS–SARSAT, MEOSAR, distress radio beacons

Введение

Среднеорбитальная спутниковая система поиска и спасения (СССПС) КОСПАС–САРСАТ является результатом эволюции требований и ожиданий пользователей системы КОСПАС–САРСАТ к ее характеристикам и возможностям. СССПС КОСПАС–САРСАТ получила значительные преимущества перед геостационарными и низкоорбитальными спутниковыми системами поиска и спасения (НССПС и ГССПС), уже входящими в КОСПАС–САРСАТ как по глобальности обслуживания, так и по оперативности доставки информации в поисково-спасательные службы за счет перехода на среднеорбитальный космический сегмент. Данная система разрабатывается с двухтысячных годов силами участников соглашения о Международной программе КОСПАС–САРСАТ и в данный момент принята в стадию ранней эксплуатации. Демонстрация работы системы как один из этапов ее создания проводилась в 2013–2019 гг. на фазе «Демонстрация и Оценка» (ДиО).

Фаза «Демонстрация и Оценка» СССПС была учреждена Советом КОСПАС–САРСАТ для подтверждения ожидаемых возможностей разрабатываемой системы и определения ее преимуществ относительно НССПС и ГССПС. В силу жесткой связи темпов развития СССПС с наличием наземного и в основном космического сегментов фаза ДиО проводилась в несколько этапов [1]. 1-й этап был проведен в 2013–2014 гг. при частично развернутом космическом сегменте *S*-диапазона¹ (всего

¹СССПС предусматривает прием на наземных СПОИ сигналов в диапазоне $1544,5 \pm 0,5$ МГц (*L*-диапазон). Однако на ранней стадии развития СССПС для оценки возможности системы были использованы единственные имеющиеся на тот момент ретрансляторы на базе спутников GPS с возможностью ретрансляции только в *S*-диапазоне (центральная частота — 2226 МГц). На дальнейших этапах развития СССПС было принято решение о возможности, но не обязательности использования таких ретрансляторов наземным сегментом. Ретрансляторы *S*-диапазона изначально имеют большую рабочую ширину полосы ретрансляции (220 кГц по уровню минус 3 дБ) и, как следствие, ретранслируют рабочую полосу системы и соседние частоты, что приводит к меньшему соотношению сигнал/шум принимаемых на земных станциях сигналов АРБ.

на момент проведения испытаний было доступно 9 спутников-ретрансляторов). 2-й этап был проведен в 2015–2016 гг. (космический сегмент состоял из 16 спутников *S*-диапазона и 3 спутников *L*-диапазона). Активная фаза испытаний 3-го этапа проводилась в 2017–2019 гг. с использованием 16 спутников *L*-диапазона.

На этапе III фазы ДиО проводилась серия технических и эксплуатационных тестов, из них для данной статьи выделены тесты, целью которых являлось независимое определение местоположения аварийных радиобуев (АРБ).

В настоящей статье приведены результаты оценки возможности СОСПОИ решать задачу независимого определения местоположения АРБ, полученные в ходе испытаний СОСПОИ с имитатором сигналов АРБ (тест Т-4) и с реальными АРБ (тест Т-5).

Напомним [2], что к СОСПОИ выдвигаются следующие требования по точности определения местоположения неподвижных АРБ первого поколения [2]:

- погрешность определения местоположения по одной посылке АРБ должна быть не хуже 5 км в 90 % случаев;

- погрешность определения местоположения АРБ за 10-минутный интервал (по 13 посылкам) должна быть не хуже 5 км в 95 % случаев.

Алгоритмы решения задачи определения местоположения были описаны ранее [3], поэтому в контексте настоящей статьи следует лишь напомнить, что навигационными измерениями в такого рода задаче является совокупность измерений времен прихода сигналов АРБ на спутники-ретрансляторы (*TOA* — time of arrival) и их частот (*FOA* — frequency of arrival).

Помимо приведения результатов независимого определения местоположения, в данной статье также проводится сравнение априорных оценок погрешности определения и реальных ошибок определения местоположения (используется ожидаемая горизонтальная ошибка², требования к формированию которой определены в [2]).

²Формулы для расчета горизонтальной ошибки приведены в [4].

Результаты испытаний. Анализ результатов теста Т-4

Данный тест проводился для оценки точностных, вероятностных и временных характеристик СССПС. Основной целью теста была оценка погрешности местоопределения АРБ в 95 % случаев после излучения 1, 2, 3, 5, 7 и 13 посылок [1].

Для излучения аварийных сигналов использовался специально запрограммированный имитатор неподвижных АРБ, расположенный в г. Тулузе во Франции (расстояние до СОСПОИ в г. Москве примерно 2900 км). Во время теста воспроизводилась работа 25 АРБ. Каждый имитируемый АРБ работал на протяжении 10 мин, в течение которых излучал 13 посылок (период повторения посылок равен 50 с). В течение 24 ч имитация работы 25 АРБ была повторена 48 раз (каждое повторение называется слотом, слоты следовали один за другим каждые полчаса). Проведение теста в течение 24 ч позволило оценить результаты работы СОСПОИ при различных взаимных расположениях имитируемых АРБ и спутников-ретрансляторов.

В табл. 1 представлены осредненные за 24 ч результаты проведенного теста. Совместная видимость имитатора АРБ и СОСПОИ в г. Москве

Таблица 1. Осредненные по 47 слотам результаты теста Т-4

| Количество излученных посылок | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 13 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Вероятность с ошибкой <1 км | 0,844 | 0,911 | 0,904 | 0,919 | 0,904 | 0,921 |
| Вероятность с ошибкой <5 км | 0,936 | 0,978 | 0,973 | 0,978 | 0,988 | 0,999 |
| Вероятность с ошибкой <10 км | 0,943 | 0,985 | 0,978 | 0,986 | 1,000 | 1,000 |
| Погрешность местоопределения в 95 % случаев, км | 2,004 | 1,329 | 1,295 | 0,941 | 0,840 | 0,638 |

по крайней мере 3 спутниками-ретрансляторами была обеспечена для 47 из 48 слотов. При количестве спутников-ретрансляторов в совместной зоне видимости менее 3 (1 слот) обработка данных не производилась, так как для определения координат АРБ требуются измерения как минимум от 3 космических аппаратов.

Как видно из представленных в табл. 1 результатов, требования к погрешности местоопределения АРБ были выполнены с большим запасом (0,638 км при требуемых $\leq 5,0$ км в 95 % случаев).

В табл. 2 приведено сравнение погрешностей местоопределения АРБ, полученных на московской СОСПОИ на 2-м и 3-м этапах фазы «Демонстрация и Оценка» СССПС [4], а также сравнение с результатами СОСПОИ других национальных администраций, участвовавших на 3-м этапе [5, 6].

Исходя из продемонстрированных результатов теста Т-4, СОСПОИ в г. Москве улучшило результаты, полученные на 2-м этапе ДиО (погрешность местоопределения уменьшилась в 2,2 раза). По сравнению с зарубежными аналогами достигнута значительно меньшая погрешность местоопределения (для разных СОСПОИ в 8–12 раз).

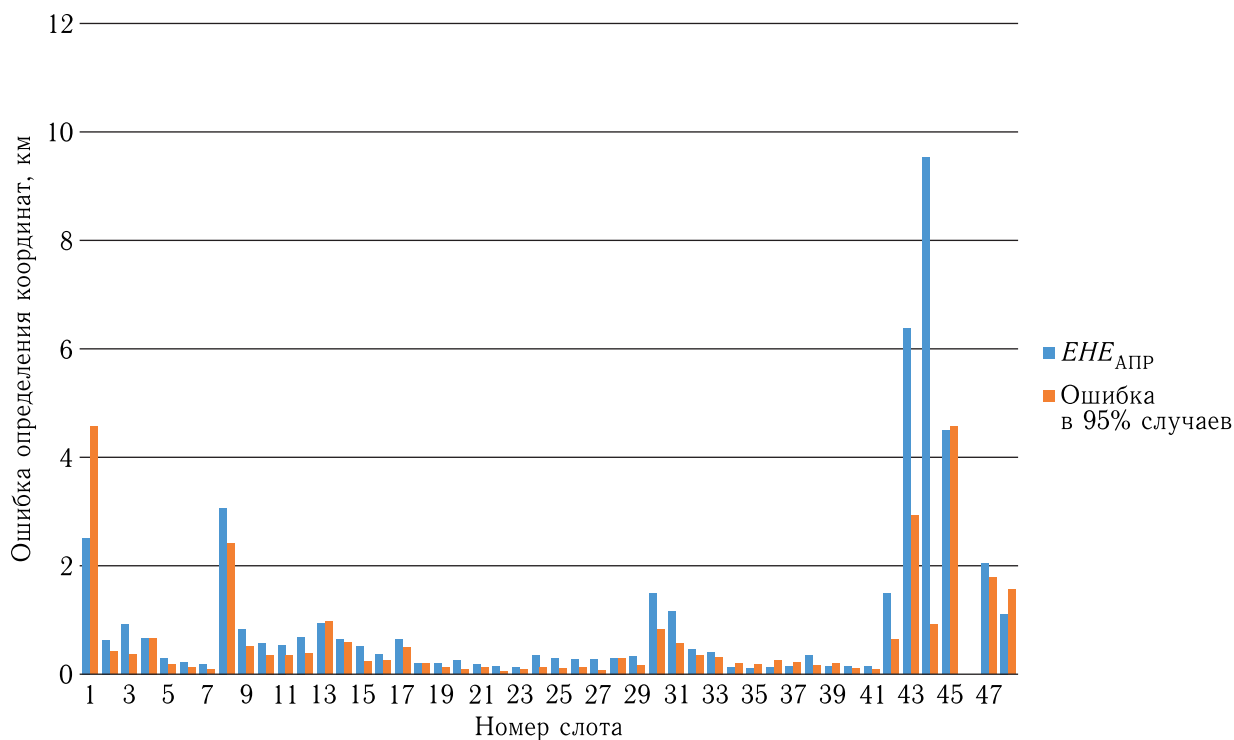
Для контроля результатов, полученных при работе СОСПОИ, задавшись предполагаемым количеством принятых посылок, формируем априорную оценку EHE (expected horizontal error — ожидаемую горизонтальную ошибку), необходимую для описания качества определяемых координат. Обозначим этот показатель $EHE_{АПР}$.

На рис. 1 отображены априорно рассчитанные $EHE_{АПР}$ (голубым цветом) и реальные погрешности местоположения АРБ в каждом слоте (оранжевым цветом).

Из приведенного рисунка видно, что теоретически предсказанное значение $EHE_{АПР}$ соответствует фактически получаемым погрешностям местоопределения АРБ. Некоторые расхождения теоретически предсказанных и реально полученных ошибок объясняются недостаточно большим количеством имитируемых АРБ (25 штук). Также из представленного рисунка видно, что в некоторых слотах наблюдаются выбросы показателя $EHE_{АПР}$, которые объясняются неполным космическим сегментом и невозможностью выбора удачной конфигурации спутников-ретрансляторов. В будущем,

Таблица 2. Сравнение результатов теста ДиО Т-4, полученных различными национальными администрациями

| Местоположение СОСПОИ, этап | СОСПОИ в г. Москве (Россия), 3-й этап | СОСПОИ в г. Москве (Россия), 2-й этап | СОСПОИ в г. Тулузе (Франция), 3-й этап | СОСПОИ в штате Мэрилэнд (США), 3-й этап |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Погрешность местоопределения с вероятностью 95 % за 10 мин | 0,638 км | 1,42 км | 5,0 км | 7,5 км |

Рис. 1. Сравнение E_{NE_APR} и реальных погрешностей местоопределения в каждом слоте

при полностью развернутом космическом сегменте, таких выбросов можно будет полностью избежать.

Анализ результатов теста Т-5

Задачи и критерии оценки теста с аварийными буюми были такими же, как и для теста ДиО Т-4, но вместо использования имитатора задействовались 35 серийных неподвижных АРБ, которые были расположены в разных точках земного шара. В данной статье представлены результаты по 6 АРБ, которые находились на расстоянии не более 3000 км от московской СОСПОИ. В табл. 3 представлены результаты по оценке погрешностей местоопределения АРБ в 95 % случаев в совмест-

ной видимости 3 и более КА после излучения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 13 посылок АРБ.

Как видно из представленных результатов, погрешность местоопределения 6 неподвижных АРБ в 95 % случаев составила 0,46–1,18 км (в среднем 0,82 км), что в 4–10 раз меньше величины погрешности, заданной для СССПС (в 6 раз по отношению к среднему значению).

В табл. 4 приведено сравнение погрешностей местоопределения АРБ на московской СОСПОИ на 2-м и 3-м этапах фазы ДиО СССПС, а также сравнение с результатами СОСПОИ других национальных администраций, участвовавших на 3-м этапе [7–9].

Исходя из полученных результатов теста Т-5, СОСПОИ в г. Москве улучшило результаты,

Таблица 3. Погрешность местоопределения для 6 АРБ в 95 % случаев в совместной видимости 3 и более КА

| № | Идентификатор | Страна | Расстояние от СОСПОИ до АРБ, км | Кол-во односылочных решений | Погрешность местоопределения АРБ в 95 % случаев по N посылкам | | | | | | | |
|---|-----------------|----------|---------------------------------|-----------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | | | | | 1 пос. | 2 пос. | 3 пос. | 4 пос. | 5 пос. | 6 пос. | 7 пос. | 13 пос. |
| 1 | 2065E84560FFBFF | Норвегия | 1758 | 1397 | 3,83 | 3,9 | 2,55 | 2,11 | 2 | 1,52 | 1,68 | 0,84 |
| 2 | 1EFC6A87D0FFBFF | Италия | 2216 | 1234 | 2,95 | 2,7 | 1,88 | 1,59 | 1,46 | 1,37 | 1,28 | 1,18 |
| 3 | 1C7C084B20FFBFF | Франция | 2425 | 1193 | 2,36 | 1,76 | 1,27 | 1,03 | 0,98 | 0,93 | 0,82 | 0,59 |
| 4 | 1C7C8C8880FFBFF | Франция | 2888 | 1065 | 2,05 | 1,83 | 1,48 | 1,27 | 1,07 | 0,95 | 1,05 | 0,8 |
| 5 | 1C7C0CF1E6FFBFF | Франция | 2888 | 1197 | 1,93 | 1,76 | 1,19 | 1,03 | 0,75 | 0,65 | 0,65 | 0,46 |
| 6 | 1C7DF3800CFFBFF | Франция | 2961 | 931 | 4,21 | 3,92 | 3,51 | 2,66 | 2,35 | 2,26 | 2,3 | 1,04 |

Таблица 4. Сравнение результатов теста ДиО Т-5, полученных различными национальными администрациями

| Местоположение СОСПОИ, этап | СОСПОИ в г. Москве (Россия), 3-й этап | СОСПОИ в г. Москве (Россия), 2-й этап | СОСПОИ в г. Тулузе (Франция), 3-й этап | СОСПОИ о. Шпицберген (Норвегия), 3-й этап | СОСПОИ в штате Мэрилэнд (США), 3-й этап |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|---|
| Погрешность местоопределения АРБ с вероятностью более 95 % за 10 мин (13 посылок) | 0,82 км | 2 км | 9 км | 5 км | 27 км |

полученные на 2-м этапе ДиО (погрешность местоопределения уменьшилась в 2,5 раза). По сравнению с зарубежными аналогами достигнута значительно меньшая погрешность местоопределения (для разных СОСПОИ в 6–30 раз).

При оценке качества работы СОСПОИ в тесте ДиО Т-5 так же, как и в тесте ДиО Т-4, в некоторых случаях происходило ухудшение показателя $EHE_{\text{АПР}}$, а вместе с ним — точности определения координат АРБ, что проиллюстрировано для одного из АРБ с номером 1C7C8C8880FFBFF (Франция) на рис. 2 и 3. Кроме того, из приведенных рисунков видно, что теоретически рассчитанные значения $EHE_{\text{АПР}}$ (показанные голубым цветом) достоверно описывают фактически полученные местоопределения АРБ (показанные красными точками).

Анализ полученных результатов

Выполнение требований КОСПАС–САРСАТ (погрешность местоопределения АРБ за 10-ми-

нутный интервал должна быть не более 5 км в 95 % случаев для неподвижных АРБ) было достигнуто московской СОСПОИ уже на 2-м этапе фазы «Демонстрация и Оценка» и подтвердилось на 3-м этапе.

Положительные результаты на 2-м этапе были достигнуты во многом за счет использования специально разработанного алгоритма цифровой обработки сигнала [10], в результате чего была получена малая величина погрешности измерения частоты $SKO_{FOA} = 0,08$ Гц. При этом для зарубежных СОСПОИ при сопоставимой погрешности измерения времени погрешность измерения частоты составляла $SKO_{FOA} = 0,2–0,4$ Гц [7]. Как было показано в исследовании [3], основной вклад в точность определения координат вносят именно измерения частоты.

Для этапа III фазы «Демонстрация и Оценка» аппаратура и алгоритм работы московской СОСПОИ не претерпели изменений. Однако погрешность измерения частоты уменьшилась до $SKO_{FOA} = 0,04$ Гц.

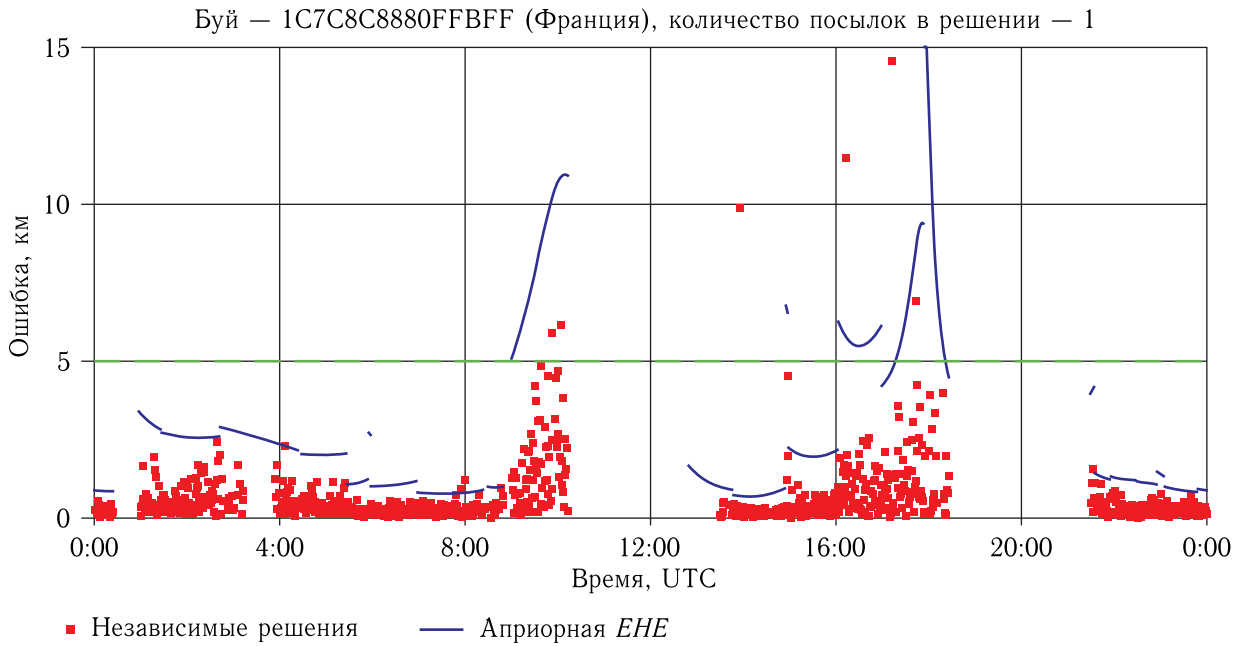


Рис. 2. График сравнения $E_{NE_АПР}$ и реально полученных погрешностей местоопределения АРБ по одной посылке

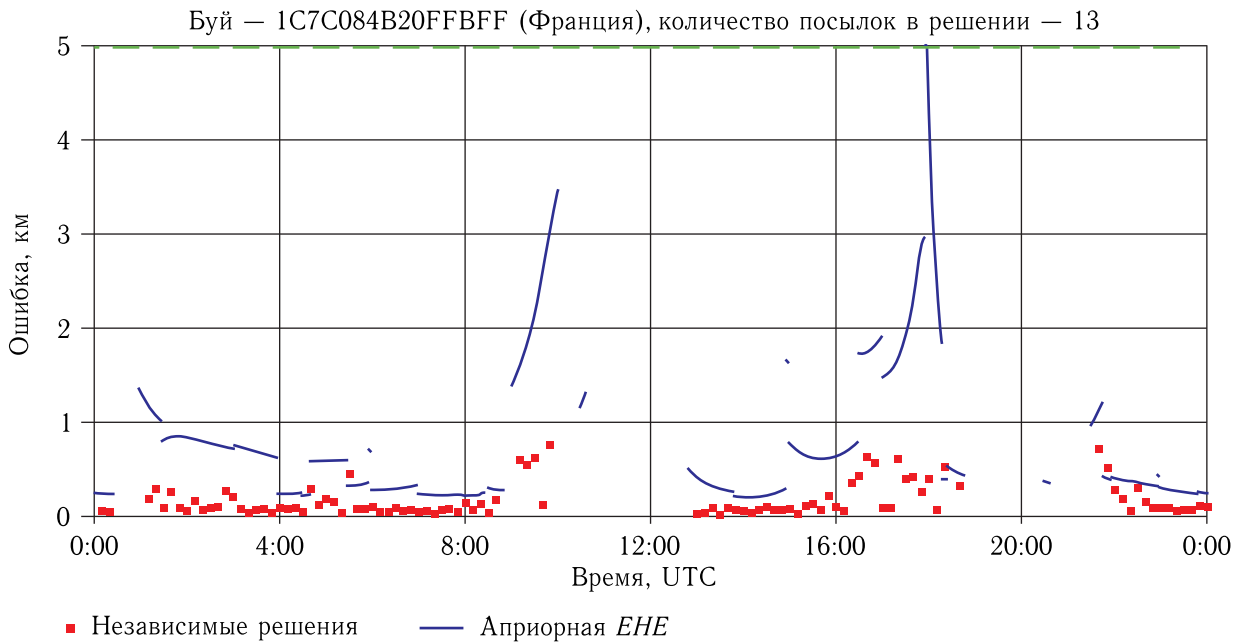


Рис. 3. График сравнения $E_{NE_АПР}$ и реально полученных погрешностей местоопределения АРБ по 13 посылкам

Такой результат свидетельствует об ожидаемо меньшей погрешности местоопределения АРБ при использовании существующих штатных ретрансляторов L -диапазона по сравнению с экспериментальной полезной нагрузкой S -диапазона. Это объясняется тем, что определяющий показатель, влияющий

на отношение сигнала к шуму и, соответственно, на точность измерения координат — G/T , измеренный на орбите на краю зоны обслуживания, для DASS в среднем составляет $-21,46$ дБ/К при требовании $> -17,7$ дБ/К, в то время как для Galileo FOS $> -15,3$ дБ/К и для Глонасс-К $-16,3$ дБ/К [11].

Выводы

На этапе III фазы «Демонстрация и Оценка» проводилась серия технических и эксплуатационных тестов. При проведении испытаний по тестам Т-4 и Т-5 на московской СОСПОИ были достигнуты следующие результаты:

– погрешность определения местоположения АРБ за 10-минутный интервал (по 13 посылкам) в 95 % случаев при использовании штатных спутников с транспондерами *L*-диапазона в тестах Т-4 и Т-5 составила соответственно 0,64 и 0,82 км (в среднем), что подтвердило способность московской СОСПОИ выполнить точностные требования КОСПАС–САРСАТ для данного класса КА (≤ 5 км) и в 2,2–2,5 раза улучшило результаты, достигнутые на этапе II (с использованием спутников с транспондерами *S*-диапазона);

– данные результаты (погрешности местопредопределения) лучше (меньше) результатов, полученных зарубежными аналогами, в 8–12 раз по результатам теста Т-4 и в 6–30 раз по результатам теста Т-5;

– отмечено негативное влияние неполного космического сегмента, которое приводило к значительному увеличению погрешности местоопределения в отдельные интервалы времени.

Список литературы

1. Cospas–Sarsat demonstration and evaluation plan for the 406 MHz MEOSAR System (C/S R.018) // Issue 2. Revision 5. 2018.
2. Cospas–Sarsat MEOLUT performance specification and design guidelines (C/S T.019) // Issue 2. Revision 3. 2019.
3. Антонов Д.В., Архангельский В.А., Белоглазова Н.Ю. Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.
4. Антонов Д.В., Федосеев А.В. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.
5. Meosar D&E test T-4: phase III results from the French MEOLUT. — 2017.
6. COSPAS–SARSAT MEOSAR D&E Phase III Technical Test T-4 Independent 2D, Location Capability USA, Maryland. — 2018.
7. Meosar D&E test T-5: phase III results from the French MEOLUT. — 2017.
8. Meosar D&E test T-5: phase III results from the Spitsbergen European MEOLUT. — 2017.
9. COSPAS–SARSAT MEOSAR D&E Phase III Technical Test T-5 Independent 2D, Location for Operational Beacons USA Maryland. — 2018.
10. Архангельский В.А., Селезнев В.В. Пути повышения точности независимого от ГНСС определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2017, т. 4, № 3. С. 77–78.
11. Description of the 406 MHz payloads used in the Cospas–Sarsat MEOSAR System (C/S T.016) // Issue 1. Revision 4. 2019.