

УДК 621.396:621.38  
doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-12

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОМБИНИРОВАНИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ

С. В. Логунов<sup>1</sup>, Е. В. Благодыренко<sup>2</sup>, И. С. Герасименко<sup>3</sup>, Н. А. Куприянов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков  
имени Героя Советского Союза А. К. Серова, Краснодар-5, Россия

<sup>1</sup> skobarik83@rambler.ru, <sup>2</sup> blagodyrenroev@mail.ru, <sup>3</sup> iger60@mail.ru, <sup>4</sup> sektor-ussr@rambler.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Задача недопущения орбитальных инцидентов требует обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых космических систем с высокоточным определением текущих навигационных параметров каждого наблюдаемого спутника как с учетом движения объектов по круговым орбитам, так и маневрирующих с включенными ионными двигателями. Используемые для наблюдения спутников разнотипные средства (оптические и радиолокационные) обладают взаимодополняющими характеристиками, обобщение которых позволило бы проводить всесуточные всепогодные измерения текущих навигационных параметров маневрирующих спутников и вести их каталог с точностями, соответствующими разбросу по координатам в пределах десятков сантиметров. При обобщении результатов существенно неравноточных измерений возникает противоречие между методами формирования опорной орбиты спутника, полученной по результатам измерений радиолокационными средствами, и необходимым условием попадания опорной орбиты в область разброса оценок текущих навигационных параметров при проведении сеанса измерений оптическими средствами для их совместной обработки. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи авторы предлагают комбинирование и комплексирование неравноточных измерений, которые, в свою очередь, требуют определить пороговые значения погрешностей измерений. Выбор пороговых значений погрешностей измерений связан с самим понятием существенно неравноточных измерений текущих навигационных параметров. Показано, что порог, при котором происходит переход от комбинирования к комплексированию неравноточных измерений, будет определяться соотношением величин среднеквадратического отклонения различных средств измерений. Учтено, что размер доверительного интервала в точке скачкообразного изменения доверительного интервала оцениваемых текущих навигационных параметров спутника со стороны участка прогноза определяется величинами среднеквадратического отклонения прогноза, а размер доверительного интервала со стороны участка измерений определяется инструментальной погрешностью оптического средства. Это позволило рассматривать область инструментальной погрешности оптического средства по каждому измерению как новую границу доверительного интервала случайной величины, имеющей распределение с параметрами, соответствующими окончанию участка прогноза. Затем, используя известные положения теории вероятностей, были определены пороговые значения погрешностей. *Результаты.* Установлена зависимость между пороговой величиной доверительной вероятности и соответствующим значением гарантийного коэффициента. Получены значения векторов пороговых значений погрешностей для оценок текущих навигационных параметров спутников, которые формируются при переходе с одного участка измерений или прогноза на другой при известных векторах оценок погрешностей текущих навигационных параметров. Это позволяет рассчитывать значения векторов пороговых значений погрешностей для оценок текущих навигационных параметров спутников, в том числе маневрирующих, на любой момент времени. *Выводы.* Реализация предложенного подхода позволит обеспечить выполнение требований по недопущению орбитальных инцидентов в космосе по точности и оперативности за счет комбинирования информации о космической обстановке от разнотипных измерительных средств. Установлено, что существует предел по достоверности для соотношения погрешностей величин при их совместной обработке, выше которого результат комплексирования становится гарантированно недостоверным. В статье величина данного предела определена для случая нормального распределения.

**Ключевые слова:** искусственный спутник Земли, объект космического мусора, наземная оптическая система, квантово-оптическая система, радиолокационная станция дальнего обнаружения

**Благодарности:** авторский коллектив благодарит доктора технических наук, профессора, начальника комплексного отдела, заместителя генерального конструктора АО «РТИ» Тимошенко Александра Васильевича за значимые замечания и важнейшие советы при проведении исследований и обсуждении их результатов.

**Для цитирования:** Логунов С. В., Благодыренко Е. В., Герасименко И. С., Куприянов Н. А. Определение пороговых значений погрешностей для применения метода комбинирования неравноточных измерений параметров движения маневрирующих спутников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 103–115. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-12

## DETERMINATION THRESHOLD ERRORS FOR THE APPLICATION OF THE METHOD OF COMBINING NON-PRECISION MOTION PARAMETERS MEASUREMENTS MANEUVERING SATELLITES

S.V. Logunov<sup>1</sup>, E.V. Blagodyrenko<sup>2</sup>, I.S. Gerasimenko<sup>3</sup>, N.A. Kupriyanov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov, Krasnodar-5, Russia

<sup>1</sup> skobarik83@rambler.ru, <sup>2</sup> blagodyrenroev@mail.ru, <sup>3</sup> iger60@mail.ru, <sup>4</sup> sektor-ussr@rambler.ru

**Abstract.** *Background.* The task of preventing orbital incidents requires monitoring the occupancy of the working and intermediate orbits of multi-satellite space systems with high-precision determination of the current navigation parameters of each observed satellite, both taking into account the movement of objects in circular orbits and maneuvering with ion engines turned on. The various types of means used for satellite observation (optical and radar) have complementary characteristics, the generalization of which would allow for daily all-weather measurements of the current navigation parameters of maneuvering satellites and to maintain their catalog with accuracy corresponding to the coordinate spread within tens of centimeters. When summarizing the results of significantly uneven measurements, a contradiction arises between the methods of forming the satellite reference orbit obtained from radar measurements and the necessary condition for the reference orbit to fall into the range of estimates of current navigation parameters during a measurement session with optical means for their joint processing. *Materials and methods.* To solve this problem, the authors propose the combination and integration of non-precision measurements, which, in turn, requires determining the threshold values of measurement errors. The choice of measurement error thresholds is related to the very concept of significantly uneven measurements of current navigation parameters. It is shown that the threshold at which the transition from combination to integration of non-precision measurements takes place will be determined by the ratio of the values of the COE of various measuring instruments. It is taken into account that the size of the confidence interval at the point of abrupt change in the confidence interval of the estimated current navigation parameters of the satellite from the forecast area is determined by the values of the forecast time interval, and the size of the confidence interval from the measurement area is determined by the instrumental error of the optical means. This made it possible to consider the area of instrumental error of the optical means for each measurement as a new boundary of the confidence interval of a random variable having a distribution with parameters corresponding to the end of the forecast section. Then, using the known provisions of probability theory, the error thresholds were determined. *Results.* The dependence between the threshold value of the confidence probability and the corresponding value of the guarantee coefficient has been established. The values of the error threshold vectors for estimates of the current navigation parameters of satellites are obtained, which are formed during the transition from one measurement site or forecast to another with known error estimation vectors of the current navigation parameters. This makes it possible to calculate the values of the error threshold vectors for estimating the current navigation parameters of satellites, including maneuvering ones, at any given time. *Conclusions.* The implementation of the proposed approach will ensure compliance with the requirements for preventing orbital incidents in space in terms of accuracy and efficiency by combining information about the space situation from different types of measuring instruments. It is established that there is a confidence limit for the ratio of errors of quantities during their joint processing, above which the result of aggregation becomes guaranteed unreliable. In the article, the value of this limit is determined for the case of a normal distribution.

**Keywords:** artificial earth satellite, space debris object, ground-based optical system, quantum optical system, long-range detection radar

**Acknowledgements:** the team of authors thanks Alexander Timoshenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Complex Department, Deputy General Designer of JSC RTI, for significant comments and important advice when conducting research and discussing their results.

**For citation:** Logunov S.V., Blagodyrenko E.V., Gerasimenko I.S., Kupriyanov N.A. Determination threshold errors for the application of the method of combining non-precision motion parameters measurements maneuvering satellites. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):103–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-12

### *Введение*

Влияние атмосферы и гравитационного поля Земли обеспечивает гарантированное «очищение» космоса от объектов космического мусора (ОКМ) с высотами орбит менее 1 000 км в течение времени от 3 месяцев до 30 лет в зависимости от высоты их орбиты, что необходимо учитывать при создании многоспутниковых космических систем (КС) [1, 2]. Например, в настоящее время группировка искусственных спутников Земли (ИСЗ) «Старлинк», запущенных с мая 2019 г., насчитывает более 2 000 шт., из которых многие к концу 2023 г. были сведены с орбиты или превратились в ОКМ [3]. При этом количество вышедших из строя ИСЗ, которые не удалось свести с орбиты, составляет порядка 25 % [4]. Всего группировка ИСЗ «Старлинк» будет насчитывать порядка 4 400 функционирующих спутников (а в перспективе – порядка 12 000 шт.), что существенно увеличит количество ИСЗ и ОКМ на рабочих орбитах и орбитах выведения уже в ближайшие годы (рис. 1).

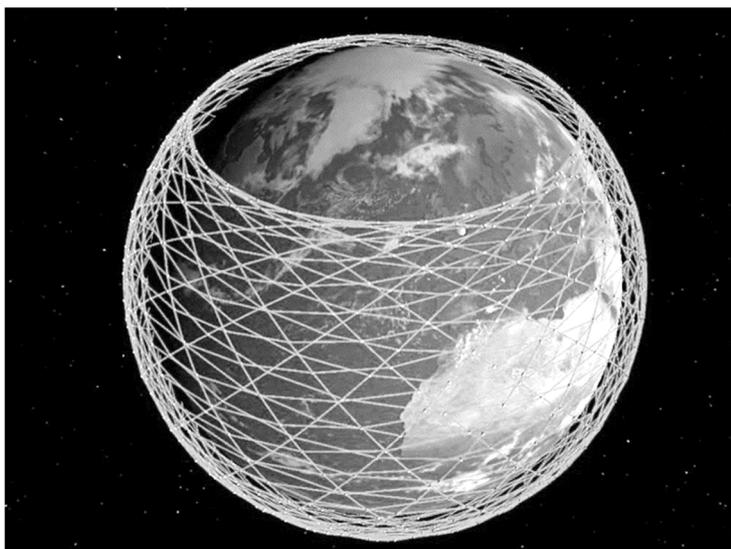


Рис. 1. Расположение плоскостей орбит группировки ИСЗ «Старлинк»

Группировку ИСЗ «Старлинк» изначально планировалось развертывать на орбитах с высотами 1 100...1 325 км, но впоследствии был выбран диапазон высот орбит 550...560 км с запланированным сходом с орбиты в течение 5 лет в случае выхода спутника из строя [5]. При этом развертывание группировки ИСЗ на рабочих орбитах осуществляется с использованием промежуточных орбит с высотами 280...290 км, время баллистического существования которых составляет порядка 100 суток [6]. В дальнейшем повышение орбиты до рабочей обеспечивается ионными двигателями самих ИСЗ. Это потенциально уменьшает засоренность рабочего «слоя» с высокой заселенностью.

Координатная и некоординатная информация о многоспутниковых КС так же, как и обо всех космических объектах в целом, поступает от множества разнотипных средств наблюдения, рассмотренных ниже.

### *Источники информации об обстановке в околоземном космическом пространстве*

Задача недопущения орбитальных инцидентов требует обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых КС с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого спутника как с учетом движения ИСЗ и ОКМ по круговым орбитам, так и более сложных, с точки зрения наблюдения спутников, движущихся с включенными ионными двигателями [7]. Эта задача должна решаться специально предназначенными для этого системами, например, существующими NASA и NORAD, Европейского космического агентства, а также средствами российской системы контроля космического пространства и создаваемой государственной корпорацией «Роскосмос» автоматизированной системой предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС) в ОКП [8, 9]. Перечисленные системы функционируют длительное время, однако создание многоспутниковых КС ужесточает требования к качеству их работы, информационным возможностям,

точности и достоверности циркулирующей в них информации, что предопределяет необходимость совершенствования способов получения и обработки информации о наблюдаемых объектах [10, 11]. Обобщение полученных данных осуществляется их сведением в каталоги ИСЗ, функционирующих как автоматизированные системы управления базами данных, работающих в режиме прогноза с его уточнением по результатам измерений параметров движения ИСЗ и ОКМ.

Такое взаимодействие налажено между ведущими странами в рамках контроля стратегических вооружений и пилотируемой космической деятельности, однако развертывание группировки ИСЗ «Старлинк» с остальными космическими державами в полной мере согласовано не было, несмотря на появление очевидной новой угрозы безопасности космической деятельности на орбитах с высотами от 500 км и более [3].

В нашей стране источниками информации об обстановке в ОКП выступают организации, осуществляющие космическую деятельность, а также подразделения Российской академии наук и Министерства обороны России, имеющие необходимые информационные средства наблюдения за ИСЗ. Эти разнотипные средства территориально расположены как на территории России, так и за ее пределами.

Парирование угроз и опасных ситуаций в космосе должно осуществляться специализированной системой, например, системой оперативного реагирования на угрозы в космосе (СОРУК). В качестве прототипа возможной основы создания и развития СОРУК в России может выступать российская АСПОС ОКП, получающая информацию от разнотипных средств наблюдения. Так, основным достоинством наземных оптических средств (НОС) и квантово-оптических средств (КОС) является прецизионная точность измерений ТНП ИСЗ по сравнению с радиолокационными станциями дальнего обнаружения (РЛС ДО) [12, 13]. Недостатками НОС и КОС являются [14]:

- метеозависимость и ограничение благоприятным для наблюдений временем суток, что существенно ограничивает их возможности по контролю заданных ИСЗ и потоку измерений;
- узкопольность оптических систем, что делает для них основным режим работы по целеказанию.

Очевидными достоинствами РЛС ДО являются:

- широкий сектор обзора пространства, что обеспечивает существенные поисковые возможности в части ИСЗ;
- всепогодность и всесуточность получения измерений.

К недостаткам РЛС ДО можно отнести сравнительно низкую точность измерений ТНП ИСЗ по сравнению с НОС и КОС (среднеквадратического отклонение (СКО) в десятки и сотни метров).

Таким образом, средства рассматриваемых типов обладают взаимодополняющими характеристиками, обобщение которых позволило бы проводить всесуточные всепогодные измерения ТНП неманеврирующих ИСЗ и вести их каталог с точностями, соответствующими разбросу по координатам в пределах десятков сантиметров. При этом РЛС ДО обладают возможностями по оперативному выявлению орбитальных маневров низкоорбитальных ИСЗ, что необходимо для функционирования СОРУК.

Измерения, погрешности которых отличаются более чем на порядок, будем называть существенно неравноточными. Так, НОС и КОС обладают прецизионной точностью измерений, которая по величине СКО превосходит точность РЛС ДО от двух до пяти порядков. При обобщении результатов существенно неравноточных измерений возникает противоречие между методами формирования опорной орбиты ИСЗ, полученной по результатам измерений РЛС ДО, и необходимым условием попадания опорной орбиты в область разброса оценок ТНП при проведении сеанса измерений НОС (КОС) для их совместной обработки. Данное противоречие проиллюстрировано на рис. 2.

Штриховыми линиями показаны расчетные орбиты, полученные по результатам измерений в первом и втором сеансах, которые в общем случае не пересекаются и не совпадают с истинной орбитой ИСЗ (сплошная линия).

Для дальнейших вычислений введем понятия комбинирования и комплексирования неравноточных измерений. Под комбинированием неравноточных измерений будем понимать обобщение результатов измерений одной величины или совокупности нескольких взаимосвязанных величин, проводимых разными по точности или применяемым методам или средствам измерений, а также измерений, разнесенных по времени проведения, если они не формируют

статистику (многократное повторение опыта в одинаковых условиях). Комбинирование основано на сочетании разных методов или принципов работы на базе установленного метода. Под комплексированием неравноточных измерений будем понимать обобщение результатов всех полученных измерений одной и той же величины, полученных разными средствами. Целью комплексирования является объединение различных датчиков в единый комплекс, обладающий существенно более высокими характеристиками точности, помехоустойчивости и надежности измерений по сравнению с отдельными измерителями [15, 16].

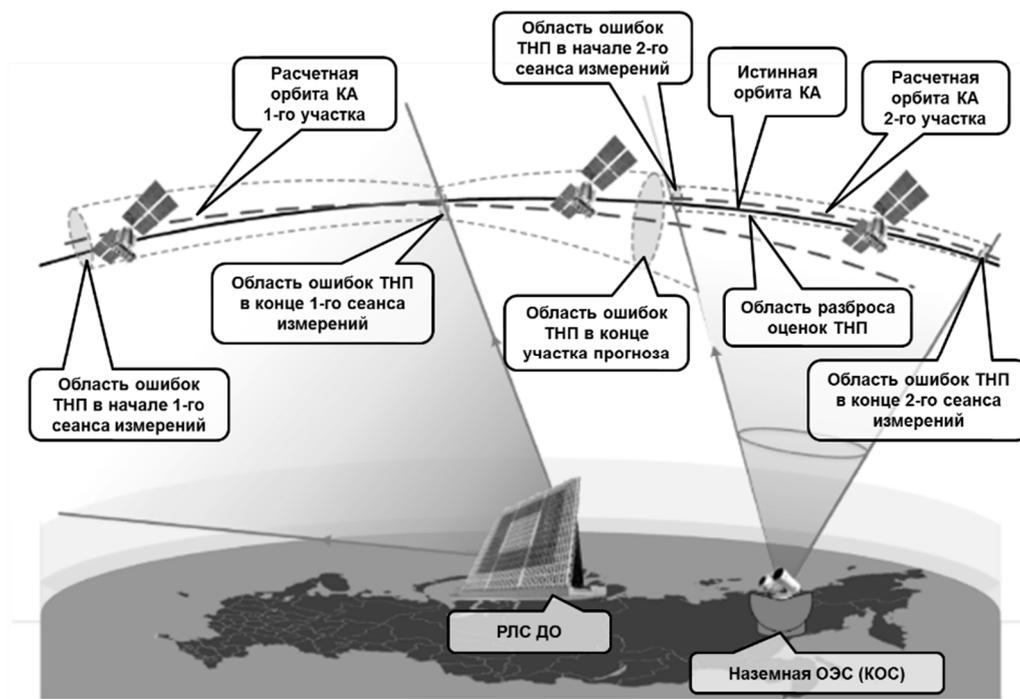


Рис. 2. Схема формирования полей ошибок и прогнозов ТНП ИСЗ при проведении разнесенных по времени неравноточных измерений ТНП ИСЗ с привлечением РЛС ДО и НОС (КОС)

В этом случае отличие комбинирования от комплексирования заключается в том, что при комплексировании в итоговом результате обязательно учитываются все полученные результаты измерений одних и тех же величин, а при комбинировании производится выборочный учет результатов измерений на основе принятого метода.

Далее показано, что для применения метода комбинирования необходимо определить пороговые значения погрешностей измерений.

#### ***Определение пороговых значений погрешностей для применения метода комбинирования текущих навигационных параметров спутников***

Выбор пороговых значений связан с самим понятием существенно неравноточных измерений ТНП ИСЗ. Фактически порог, при котором происходит переход от комбинирования к комплексированию неравноточных измерений, будет определяться соотношением величин СКО различных средств измерений.

Для установления величины порога используем известные положения теории вероятностей [17, 18]. Характеристикой, позволяющей считать событие практически достоверным, т.е. имеющим высокую вероятность наступления, является доверительная вероятность  $\beta$ . Считается, что случайная величина (в нашем случае – результаты сеанса измерений или прогноза ТНП ИСЗ на момент времени  $t$ ) попадает в определенный ей доверительный интервал значений, совместимый с опытными данными и не противоречащий им, с соответствующей доверительной вероятностью. В качестве нижнего порогового значения доверительной вероятности обычно принимают величину  $\beta_{\text{пор}} = 0,9$ . Величина доверительной вероятности для требуемой точности и надежности оценок ТНП ИСЗ определяется выбранным размером доверительного интервала.

Таким образом, в качестве порогового значения вероятности непопадания случайной величины в пределы доверительного интервала будет  $(1 - \beta_{\text{пор}})$ , в нашем случае 0,1. Эта величина является вероятностью события, при наступлении которого измерения ТНП ИСЗ можно считать недостоверными, поэтому в некоторых источниках именно эту величину считают уровнем значимости или порогом достоверности опытных данных.

На рис. 2 изображен момент начала участка измерений НОС (КОС) (второго сеанса измерений), на котором происходит скачкообразное изменение доверительного интервала оцениваемых ТНП ИСЗ. Размер доверительного интервала в этой точке со стороны участка прогноза определяется величинами СКО прогноза, а размер доверительного интервала со стороны участка измерений определяется инструментальной погрешностью НОС (КОС). При этом подлежат оценке одни и те же случайные величины – ТНП ИСЗ в рассматриваемой точке. Это позволяет рассматривать область инструментальной погрешности НОС (КОС) по каждому ТНП ИСЗ как новую границу доверительного интервала случайной величины, имеющей распределение с параметрами, соответствующими окончанию участка прогноза. Тогда характеристикой достоверности прогноза ТНП ИСЗ в этой точке будет доверительная вероятность попадания ТНП ИСЗ в доверительный интервал, ограниченный областью инструментальной погрешности НОС (КОС). Очевидно, что если рассматриваемая доверительная вероятность будет меньше величины  $(1 - \beta_{\text{пор}})$ , то с этого момента можно считать данные прогноза недостоверными. Это позволяет при совместной обработке результатов полностью исключить эти данные из рассмотрения, так как комплексирование достоверных данных с недостоверными не имеет смысла.

Применим данный подход для определения порогов  $\varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_n)$  и  $\varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_i)$ . Считая оценки ТНП ИСЗ распределенными по нормальному закону, границы доверительного интервала для каждого элемента вектора ТНП ИСЗ

$$\vec{X} = [x, y, z, V_x, V_y, V_z, t]^T, \quad (1)$$

где  $V_x, V_y, V_z$  – текущие компоненты вектора мгновенной скорости ИСЗ в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК);  $x, y, z$  – текущие компоненты радиус-вектора ИСЗ в АГЭСК;  $t$  – момент времени по шкале UTC, на который получен данный вектор  $\vec{X}$ .

С учетом вектора погрешностей

$$\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}, \sigma_t]^T, \quad (2)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}, \sigma_t$  – СКО соответствующих компонент вектора  $\vec{X}$ , включая СКО привязки к шкале времени  $\sigma_t$ ; можно представить в виде [19]

$$I_\beta = (\tilde{m} - t_\beta \sigma_{\tilde{m}}; \tilde{m} + t_\beta \sigma_{\tilde{m}}), \quad (3)$$

где  $I_\beta$  – ширина доверительного интервала для оценки рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ;  $\tilde{m}$  – усредненная оценка математического ожидания (МО) рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ;  $\sigma_{\tilde{m}}$  – СКО рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ;  $t_\beta$  – гарантийный коэффициент.

Гарантийный коэффициент  $t_\beta$  показывает количество раз, которое необходимо отложить СКО рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ  $\sigma_{\tilde{m}}$  вправо и влево от  $\tilde{m}$  для того, чтобы вероятность его попадания в интервал  $I_\beta$  равнялась  $\beta$ .

Значение гарантийного коэффициента  $t_\beta$  в точке начала участка измерений НОС (КОС) (рис. 2) для параметров распределения оценок ТНП ИСЗ на участке прогноза определяется выражением

$$t_\beta = \frac{\sigma_{\tilde{m}1}}{\sigma_{\tilde{m}2}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\tilde{m}1}$  – СКО оценки ТНП ИСЗ на участке прогноза;  $\sigma_{\tilde{m}2}$  – СКО оценки ТНП ИСЗ на участке измерения.

Для определения порогов  $\varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_n)$  и  $\varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_i)$  необходимо определить некоторое пороговое значение  $t_{\beta_{\text{пор}}}$ , соответствующее границе доверительной вероятности  $\beta_{\text{пор}}$  и порога достоверности  $(1 - \beta_{\text{пор}})$  в качестве аргумента нормальной функции распределения  $\Phi^*$ . Очевидно, что

значение  $t_{\beta\text{пор}}$  не зависит от параметров распределения оценки ТНП ИСЗ ( $\tilde{m}, \sigma_{\tilde{m}}$ ), а определяется величиной установленного порога доверительной вероятности ( $1 - \beta_{\text{пор}}$ ) и положением границ доверительного интервала (рис. 3).

Таким образом, вычисление пороговых значений погрешностей  $\vec{\varepsilon}_{\text{пор}1,2}$  для применения метода комбинирования ТНП ИСЗ сводится к определению порогового значения гарантийного коэффициента  $t_{\beta\text{пор}}$ , при котором оценки параметров ТНП ИСЗ можно считать недостоверными.

Для нормальной функции распределения вычислены значения гарантийного коэффициента, соответствующие наиболее востребованным величинам доверительной вероятности (например: 0,9; 0,95; 0,997). Они встречаются в литературе в табличной форме.

Если оценки МО, полученные на участках прогноза и измерения, совпадают ( $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$ ), а дисперсии отличаются на порядок, то даже в этом случае значение доверительной вероятности распределения ТНП ИСЗ в рассматриваемой точке скачкообразно уменьшается с 0,9 до 0,135 для  $t_{\beta} = 1$  (на интервале  $\pm 1 \sigma_{\tilde{m}}$ ) и с 0,997 до 0,236 для  $t_{\beta} = 3$  (на интервале  $\pm 3 \sigma_{\tilde{m}}$ ).

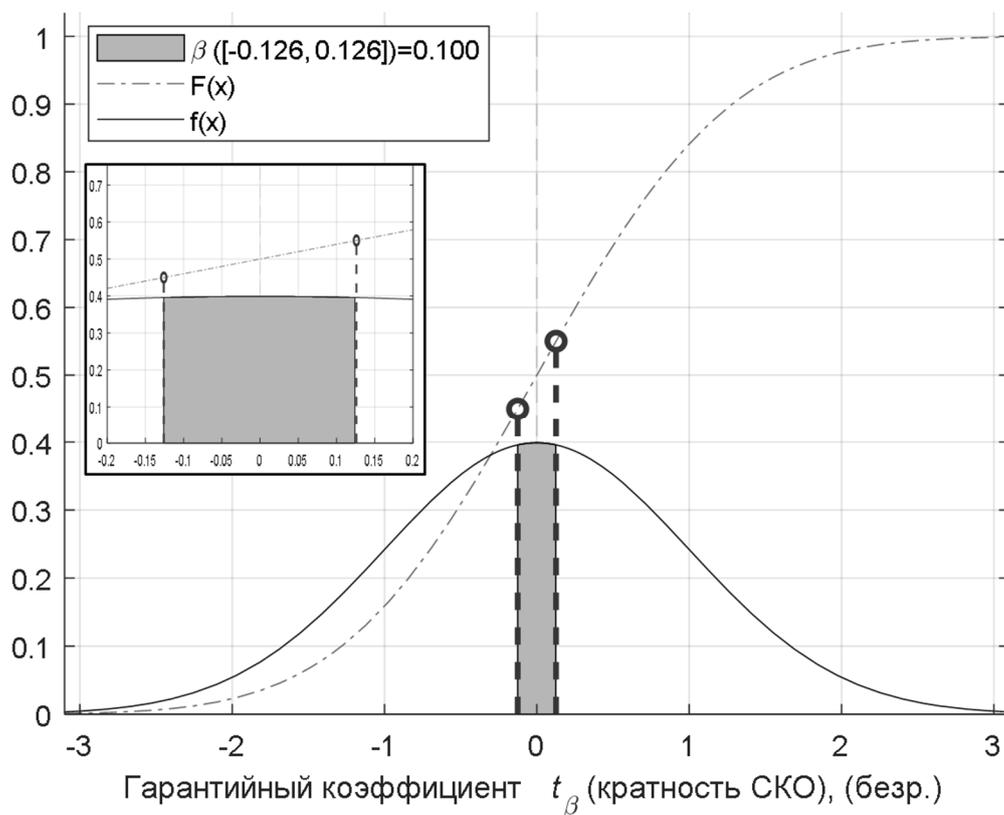


Рис. 3. Зависимость доверительной вероятности от гарантийного коэффициента для нормального закона распределения

В случае, если границы интервала вероятности, ограниченного величинами СКО измерений НОС (КОС), в точке начала участка измерений НОС (КОС) не покрывают оценку МО  $\tilde{m}_1$ , соответствующего окончанию участка прогноза ТНП ИСЗ, то, как было показано ранее, такая оценка считается недостоверной по определению. Так, на рис. 3 оценка МО  $\tilde{m}_1$  участка прогноза ТНП ИСЗ (левая штриховая линия) в точке начала участка измерений НОС (КОС) не попадает в границы интервала, ограниченного величинами СКО измерений НОС (КОС). Очевидно, что для всех случаев, когда МО  $\tilde{m}_1$  участка прогноза ТНП ИСЗ не совпадает с МО  $\tilde{m}_2$  участка измерения ТНП ИСЗ, вероятность попадания оценки ( $\tilde{m}_1; \sigma_{\tilde{m}1}$ ) прогноза ТНП ИСЗ в интервал погрешностей измерений НОС (КОС) ( $\tilde{m}_2 - t_{\beta}\sigma_{\tilde{m}2}; \tilde{m}_2 + t_{\beta}\sigma_{\tilde{m}2}$ ), не симметричный относительно  $\tilde{m}_1$ , будет меньше, чем для случая  $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$ , что снижает достоверность таких прогнозов. Качественно изменение вероятности события при смещении центра интервала вычисления вероятности относительно МО показано на рис. 4.

Таким образом, описанную ранее пороговую доверительную вероятность  $(1 - \beta_{\text{пор}})$ , введенную для случая  $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$ , можно считать наименее достоверной при совместной обработке результатов неравноточных измерений. Во всех остальных случаях по критерию достоверности выбраковка оценок ТНП ИСЗ, полученных разными средствами, будет иметь более высокую вероятность наступления, чем для случая  $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$ , что позволяет рассматривать в качестве порогового именно этот случай. Следовательно, значение  $t_{\beta_{\text{пор}}}$  будем искать применительно к условию  $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$  для заданного уровня пороговой доверительной вероятности  $(1 - \beta_{\text{пор}})$ .

Выражение для нахождения  $t_{\beta}(\beta)$  через нормальную функцию имеет вид

$$t_{\beta} = \arg \Phi^* \left( \frac{1 + \beta}{2} \right), \quad (5)$$

где  $\arg \Phi^*(x)$  – функция, обратная  $\Phi^*(x)$ , т.е. такое значение аргумента, при котором нормальная функция распределения равна  $x$ .

Современные средства компьютерного моделирования позволяют получить зависимость  $t_{\beta}(\beta)$  как в аналитической, так и в табличной форме для любых значений  $\beta$ . Для нахождения порогового значения  $t_{\beta_{\text{пор}}}$  может быть использован любой из предложенных подходов, а также подбор значений. На рис. 4 показан результат получения оценки гарантийного коэффициента для доверительной вероятности, равной 0,1, на основе рассмотрения нормальной функции и плотности вероятности путем подбора значений.

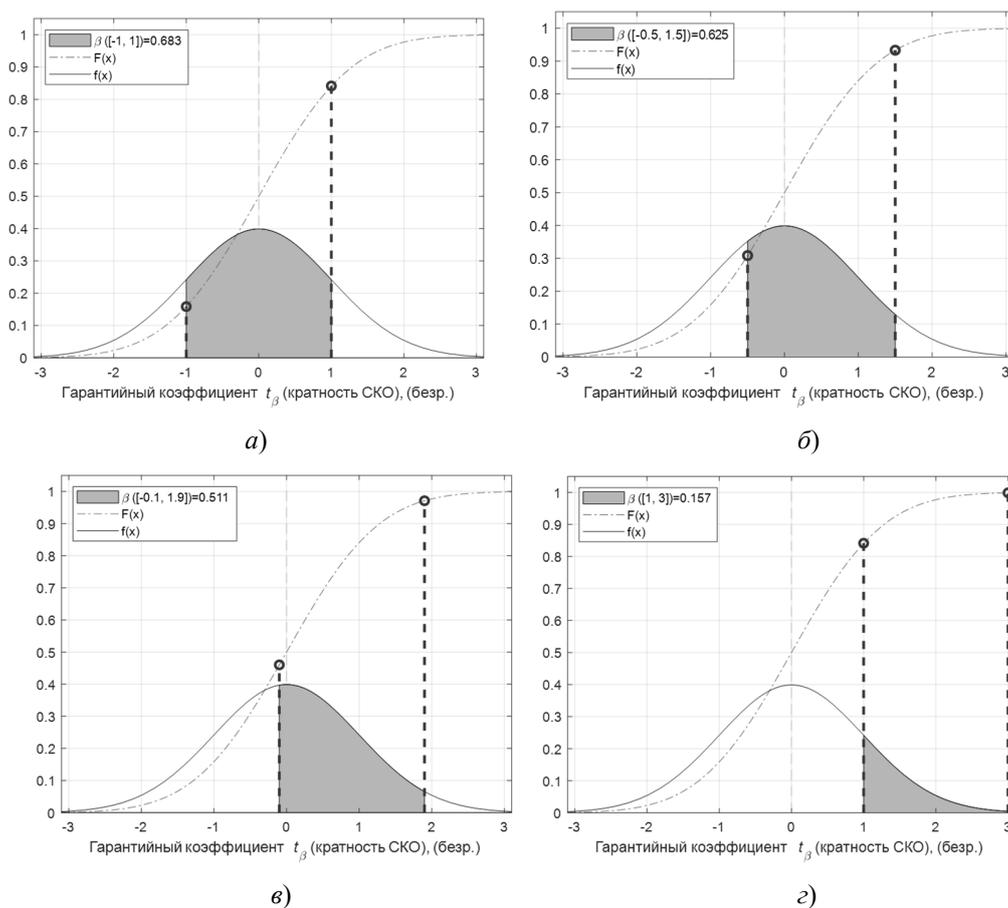


Рис. 4. Изменение вероятности события при смещении центра интервала вычисления вероятности относительно МО:

а – без смещения; б – смещение центра на 0,5; в – смещение центра на 0,9; г – смещение центра на 2

График функции  $t_{\beta}(\beta)$ , обратной интегральной функции Лапласа и устанавливающей зависимость гарантийного коэффициента от величины доверительной вероятности, приведен на рис. 5 (сплошная линия). Зависимость получена путем кусочно-линейной аппроксимации на основе вычисленных значений функции  $\beta(t_{\beta})$ , отложенных по осям абсцисс и ординат

для функции  $t_\beta(\beta)$ . Для сравнения, на этом же рисунке приведены графики функций вида  $f(x) = -\ln(-x)$  (штриховая линия) и  $f(x) = |(-x)^{-\alpha}|$  (штрих-пунктирная линия), с помощью которых получить аппроксимацию функции  $t_\beta = \arg \Phi^*(\beta)$  на рассматриваемом интервале с приемлемым качеством не удастся. По графику также можно оценить пороговое значение  $t_{\beta_{\text{пор}}} = 0,126$  для требуемого уровня значимости  $(1 - \beta_{\text{пор}}) = 0,1$ , которое совпадает с приведенным на рис. 5.

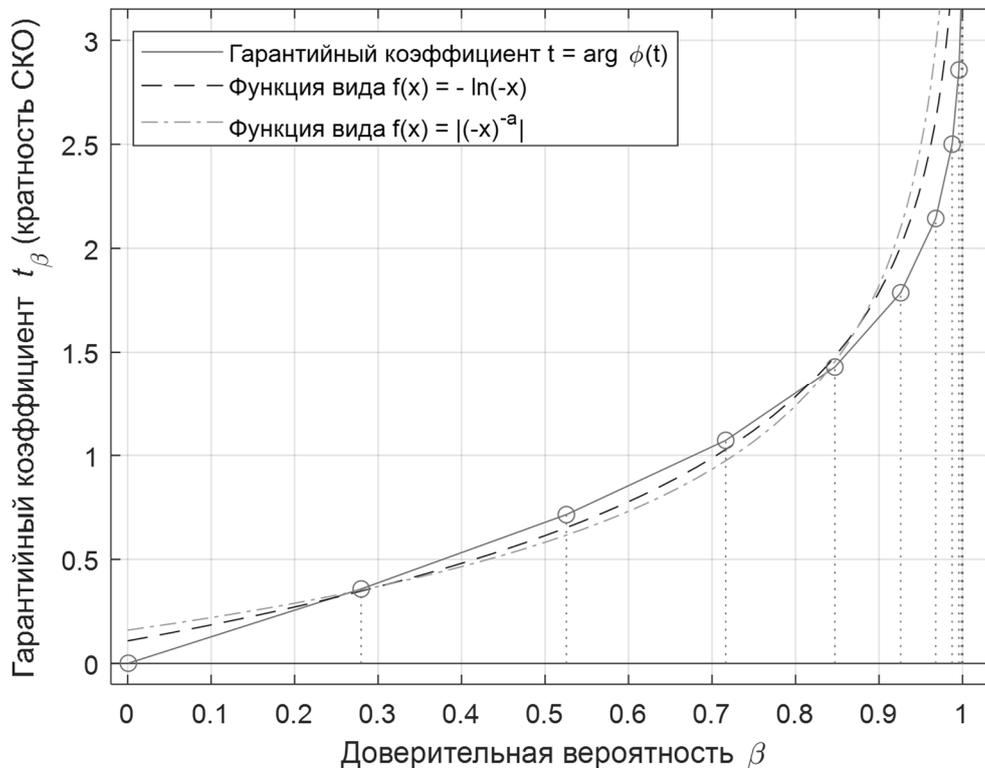


Рис. 5. Зависимость гарантийного коэффициента от величины доверительной вероятности в виде кусочно-линейной аппроксимации функции  $t_\beta = \arg \Phi^*(\beta)$  и функций вида  $f(x) = -\ln(-x)$  (штриховая линия) и  $f(x) = |(-x)^{-\alpha}|$  (штрих-пунктирная линия)

С помощью аппроксимации функции  $t_\beta = \arg \Phi^*(\beta)$  можно составить таблицу значений гарантийного коэффициента в зависимости от доверительной вероятности или уровня значимости (порога достоверности) с произвольным шагом. Нахождение аналитического выражения непосредственно для функции  $t_\beta(\beta)$  не является целью данной работы.

Таким образом, установлена зависимость между пороговой величиной доверительной вероятности  $\beta_{\text{пор}}$  (или значения  $(1 - \beta_{\text{пор}})$ ) и соответствующим значением гарантийного коэффициента  $t_{\beta_{\text{пор}}}$ . Используя выражение (4), можно получить значения векторов пороговых значений погрешностей  $\vec{\epsilon}_{\text{пор}1,2}$  для оценок ТНП ИСЗ, которые формируются при переходе с одного участка формирования опорной орбиты (участка измерений или прогноза) на другой при известных векторах оценок погрешностей ТНП ИСЗ  $\vec{\sigma}_и$  и  $\vec{\sigma}_п$ . Вектора оценок погрешностей ТНП ИСЗ  $\vec{\sigma}_и$  и  $\vec{\sigma}_п$  формируются на основе модели движения спутника для участков прогноза и на основе точностных характеристик средств измерений (РЛС или НОС (КОС)) для участков измерений, поэтому могут считаться априорно известными. Это позволяет рассчитывать значения векторов пороговых значений погрешностей  $\vec{\epsilon}_{\text{пор}1,2}$  для оценок ТНП ИСЗ на любой момент времени  $t$  на основе априорных данных, используя выражение (4) для каждой компоненты вектора погрешностей.

Если считать уровень значимости  $(1 - \beta)$  доверительной вероятностью события, заключающегося в непопадании оценки ТНП ИСЗ в пределы вновь установленного доверительного интервала на границе участков измерений и прогноза, то ему также может быть поставлено в соответствие значение гарантийного коэффициента с использованием приведенных зависимостей.

Для выбора порогового значения  $\beta_{\text{пор}}$  по достоверности в табл. 1 приведены некоторые значения доверительной вероятности  $\beta$ , ширины доверительного интервала  $I_\beta$ , а также уровня значимости  $(1 - \beta)$  и значения гарантийного коэффициента  $t_\beta$ , соответствующие уровню значимости.

Таблица 1

$\beta$	0,5	0,9	0,95	0,997
$I_\beta$	1,35 $\sigma$ ( $\pm 0,675\sigma$ )	3,286 $\sigma$ ( $\pm 1,643\sigma$ )	3,92 $\sigma$ ( $\pm 1,96\sigma$ )	6 $\sigma$ ( $\pm 3\sigma$ )
$1 - \beta$	0,5	0,1	0,05	0,003
$t_\beta$	0,675	0,126	0,063	0,004

В табл. 1 представлены значения доверительной вероятности  $\beta$ , ширины доверительного интервала  $I_\beta$ , уровня значимости  $(1 - \beta)$  и соответствующие ему значения гарантийного коэффициента  $t_\beta$ . Серым цветом выделено значение доверительной вероятности 0,9, выбранного ранее в качестве примера. Очевидно, что если отношение СКО  $\vec{\sigma}_и$  и  $\vec{\sigma}_п$  (4) меньше порогового значения  $t_\beta = 0,126$ , то согласно методу комбинирования

$$\vec{X}_\Sigma = \begin{cases} \vec{X}_и, & \text{если ИСЗ сманеврировал;} \\ \vec{X}_и, & \text{если } |\vec{\sigma}_и| < \vec{\varepsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п); \\ \vec{X}_п, & \text{если } |\vec{\sigma}_п| < \vec{\varepsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и); \\ F(\vec{X}_и, \vec{X}_п), & \text{если } |\vec{\sigma}_и| \geq \vec{\varepsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п) \vee |\vec{\sigma}_п| \geq \vec{\varepsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и), \end{cases} \quad (6)$$

где  $\vec{\varepsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п)$  – пороговое значение, зависящее от  $\vec{\sigma}_п$ ;  $\vec{\varepsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и)$  – пороговое значение, зависящее от  $\vec{\sigma}_и$ ;  $F(\vec{X}_и, \vec{X}_п)$  – функциональная зависимость комплексирования векторов измеренных и спрогнозированных ТНП ИСЗ при соизмеримых величинах погрешностей измерений и прогноза;

$$\vec{\sigma}_\Sigma = \begin{cases} \vec{\sigma}_и, & \text{если ИСЗ сманеврировал;} \\ \vec{\sigma}_и, & \text{если } |\vec{\sigma}_и| < \vec{\varepsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п); \\ \vec{\sigma}_п, & \text{если } |\vec{\sigma}_п| < \vec{\varepsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и); \\ G(\vec{\sigma}_и, \vec{\sigma}_п), & \text{если } |\vec{\sigma}_и| \geq \vec{\varepsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п) \vee |\vec{\sigma}_п| \geq \vec{\varepsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и), \end{cases} \quad (7)$$

где  $G(\vec{X}_и, \vec{X}_п)$  – функциональная зависимость комплексирования векторов погрешностей измерений и прогноза ТНП ИСЗ при соизмеримых величинах погрешностей измерений и прогноза.

В качестве результирующего значения ТНП ИСЗ выбирается наиболее точное, т.е. то, которому соответствует наименьшая величина оценки погрешности  $\vec{\sigma}_{\text{min}}$ .

Если результат вычисления выражения (4) больше или равен пороговому значению  $t_\beta = 0,126$ , то, согласно методу комбинирования (6) и (7), требуется выполнить комплексирование оценок результатов измерений  $\vec{\sigma}_и$  и прогноза  $\vec{\sigma}_п$  ТНП ИСЗ с использованием известных методов совместной обработки, самым распространенным из которых является метод наименьших квадратов [3, 6].

Для рассматриваемого случая  $\beta_{\text{пор}} = 0,9$  можно сделать вывод, что комплексирование оценок ТНП ИСЗ выполняется только в случае, когда погрешности оценок ТНП ИСЗ  $\vec{\sigma}_и$  и  $\vec{\sigma}_п$  различаются не более чем на порядок ( $t_{\beta_{\text{пор}}} \approx 0,1$ ). При ужесточении порогового значения доверительной вероятности  $\beta_{\text{пор}} = 0,997$  эти погрешности должны различаться не более чем на три порядка ( $t_{\beta_{\text{пор}}} = 0,004$ ). При невыполнении данных условий применение комплексирования для обобщения несопоставимых по точности оценок ТНП ИСЗ гарантированно приводит к получению недостоверных результатов.

Изменение требований по пороговому значению  $t_{\beta_{\text{пор}}}$  объясняется соответствующим изменением доверительного интервала  $I_\beta$ : чем шире доверительный интервал, тем менее жесткие требования предъявляются к пороговому критерию для комплексирования.

### Заключение

При невыполнении условий (6) и (7) с учетом порога, полученного с использованием выражения (4), применение комплексирования для обобщения несопоставимых по точности оценок ТНП ИСЗ гарантированно приводит к получению недостоверных результатов.

Реализация данного подхода в СОРУК позволит обеспечить выполнение требований, предъявляемых к информационному обеспечению системы оперативного реагирования на опасные ситуации в ОКП, по точности и оперативности за счет комбинирования информации о космической обстановке с низкоточных измерительных средств, обладающих более высокой оперативностью и дающих большой поток измерений, и высокоточных средств, обладающих при этом существенно более низкой пропускной способностью.

Кроме того, установлено, что существует предел по достоверности для соотношения погрешностей величин при их совместной обработке, выше которого результат комплексирования становится гарантированно недостоверным. В статье величина данного предела определена для случая нормального распределения.

### Список литературы

1. Калюта А. Н. Глобальный мониторинг космической обстановки – важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере // Военная мысль. 2017. № 9. С. 5–11. EDN: ZHTPCB
2. Солнцев А. М., Ключня А. Ю. Применение противоспутникового оружия: международно-правовые проблемы // Обозреватель. 2013. № 3. С. 57–73. EDN: PVYRNT
3. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255. doi: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255 EDN: QMOLDV
4. Barkova M. E., Zhukov A. O., Kartsan I. N. [et al.] Designing a Robotic Vehicle for Recycling Space Debris // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53, № 2. P. 157–163. doi: 10.1134/S105261882402002X EDN: GDSNFZ
5. Ключников В. Ю. Синдром Кесслера: будет ли закрыта дорога в космос? // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 32–43. doi: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-32-43 EDN: XVTKLR
6. Агапов В. М., Головкин А. В., Емельянов В. А. [и др.]. Космический мусор. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. М. : Физматлит, 2014. 245 с. EDN: UGLCWD
7. Левин К. Л., Рябконов Д. В., Мартынов В. А. [и др.]. Расчет орбиты летательного аппарата с использованием функции Лагранжа для решения упрощенных задач орбитальной механики при рассмотрении двигателя постоянной тяги // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Естественные и физико-математические науки. 2022. Т. 15, № 3. С. 60–68. EDN: BWLTX
8. Олейников И. И., Архипов С. А., Тунгушпаев А. Т. Перспективная космическая система наблюдения космических объектов в околоземном космическом пространстве оптико-электронными средствами // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 4. С. 14–20. doi: 10.18127/j00338486-202303-03 EDN: GTLNTL
9. Коблов С. В., Макаров Ю. Н., Ступак Г. Г. Пути развития Российской автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 232–237. EDN: OUWGGW
10. Макаренко В. В., Какаев В. В., Степенко А. С. Определение состояния космического объекта в многопозиционной информационной системе на основе решения задачи Радона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. Т. 27, № 5. С. 57–64. doi: 10.18127/j5604128-202205-08 EDN: AUMQHN
11. Кущенко К. И., Железняков Ю. В., Волощук А. В. [и др.]. Применение нейронной сети в решении задач распознавания и классификации космических аппаратов по их оптическим изображениям // Космические аппараты и технологии. 2023. Т. 7, № 1. С. 51–59. doi: 10.26732/j.st.2023.1.06 EDN: WNREKS
12. Логунов С. В., Куприянов Н. А. Методика ранжирования каталогизированных космических объектов, используемых для повышения точности определения координат объектов радиолокационной станции дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. № 1. С. 75–84. EDN: ZBNECD
13. Куприянов Н. А., Логунов С. В., Хегай Д. К. [и др.]. Модель оценивания информативности высокоширотного траекторного измерительного комплекса // Научные технологии. 2021. Т. 22, № 3. С. 89–97. doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL
14. Благодыренко Е. В., Куприянов Н. А., Логунов С. В. [и др.]. Метод комбинирования неравноточных измерений параметров движения маневрирующих спутников с целью достижения наилучших точности и достоверности их прогноза // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 14–24. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2 EDN: BXDCMS

15. Благодыренко Е. В., Горбенков С. П., Царев С. М., Шосталь В. Ю. Комбинирование неравноточных измерений параметров движения маневрирующих космических объектов // СПБНТОРЭС : тр. ежегодной науч.-техн. конф. 2022. № 1. С. 56–58. EDN: DPTFXG
16. Кондыбаев Н. С., Куприянов Н. А., Куракин С. З. Алгоритм тракторной обработки информации радиолокационных измерительных комплексов на основе кластеризации методом K-MEANS // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12, № 6. С. 4–10. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. 10-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2006. 575 с.
18. Орлов А. И. Прикладной статистический анализ : учебник. М. : Ай Пи Ар Медиа, 2022. 812 с. EDN: EFUDYT
19. Благодыренко Е. В., Шосталь В. Ю. Исследование парадокса закона больших чисел при совместной обработке существенно неравноточных измерений // СПБНТОРЭС : тр. ежегодной науч.-техн. конф. 2021. № 1. С. 98–101. EDN: OCZNWW

### References

1. Kalyuta A.N. Global monitoring of the space situation is the most important area of ensuring the military security of the Russian Federation in the aerospace sphere. *Voennaya mysl' = Military Thought*. 2017;(9): 5–11. (In Russ.). EDN: ZHTPCB
2. Solntsev A.M., Klyunya A.Yu. The use of anti-satellite weapons: international legal problems. *Obzrevatel' = Observer*. 2013;(3):57–73. (In Russ.). EDN: PVYRNT
3. Pekhterev S.V., Makarenko S.I., Koval'skiy A.A. Descriptive model of the Starlink satellite communication system. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, communications and security systems*. 2022;(4):190–255. (In Russ.). doi: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255 EDN: QMOLDV
4. Barkova M.E., Zhukov A.O., Kartsan I.N. et al. Designing a Robotic Vehicle for Recycling Space Debris *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024;53(2):157–163. doi: 10.1134/S105261882402002X EDN: GDSNFZ
5. Klyushnikov V.Yu. Kessler syndrome: will the road to space be closed? *Vozdushno-kosmicheskaya sfera = The aerospace sphere*. 2021;(4):32–43. (In Russ.). doi: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-32-43 EDN: XVTKLR
6. Agapov V.M., Golovko A.V., Emel'yanov V.A. et al. *Kosmicheskii musor. Kn. 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora = Space debris. Book 1. Observation methods and models of space debris*. Moscow: Fizmatlit, 2014:245. (In Russ.). EDN: UGLCWD
7. Levin K.L., Ryabokon' D.V., Martynov V.A. et al. Calculation of the orbit of an aircraft using the Lagrange function to solve simplified problems of orbital mechanics when considering a constant thrust engine. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin of Pskov State University. Ser.: Natural and physico-mathematical Sciences*. 2022;15(3):60–68. (In Russ.). EDN: BWLTXS
8. Oleynikov I.I., Arkhipov S.A., Tungushpaev A.T. A promising space system for observing space objects in near-Earth space by optical and electronic means. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 2023;87(4): 14–20. (In Russ.). doi: 10.18127/j00338486-202303-03 EDN: GTLNTL
9. Koblov S.V., Makarov Yu.N., Stupak G.G. Ways of developing the Russian automated warning system for dangerous situations in near-Earth space. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*. 2022;(683):232–237. (In Russ.). EDN: OUWGGW
10. Makarenkov V.V., Kakaev V.V., Stepenko A.S. Determination of the state of a space object in a multi-position information system based on solving the Radon problem. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic waves and electronic systems*. 2022;27(5):57–64. (In Russ.). doi: 10.18127/j5604128-202205-08 EDN: AUMQHN
11. Kushchenko K.I., Zheleznyakov Yu.V., Voloshchuk A.V. et al. Application of a neural network in solving problems of recognition and classification of spacecraft by their optical images. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii = Spacecraft and technologies*. 2023;7(1):51–59. (In Russ.). doi: 10.26732/j.st.2023.1.06 EDN: WNREKS
12. Logunov S.V., Kupriyanov N.A. Ranking methodology for cataloged space objects used to improve the accuracy of determining the coordinates of objects by a long-range radar station. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika teledeniya = Radio electronics issues. Ser.: Television technology*. 2019;(1):75–84. (In Russ.). EDN: ZBNECD
13. Kupriyanov N.A., Logunov S.V., Khegay D.K. et al. A model for evaluating the informativeness of a high-latitude trajectory measuring complex. *Naukoemkie tekhnologii = Science-intensive technologies*. 2021;22(3):89–97. (In Russ.). doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL
14. Blagodyrenko E.V., Kupriyanov N.A., Logunov S.V. et al. A method for combining non-precision measurements of motion parameters of maneuvering satellites in order to achieve the best accuracy and reliability of their forecast. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Monitoring. Management. Control*. 2024;(2):14–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2 EDN: BXDCMS

15. Blagodyrenko E.V., Gorbenkov S.P., Tsarev S.M., Shostal' V.Yu. Combining non-precision measurements of motion parameters of maneuvering space objects. *SPbNTORES: tr. ezhegodnoy nauch.-tekhn. konf. = SPbNTORES: proceedings of annual scientific and techn. conf.* 2022;(1):56–58. (In Russ.). EDN: DPTFXG
16. Kondybaev N.S., Kupriyanov N.A., Kurakin S.Z. Algorithm of trajectory information processing of radar measuring complexes based on clustering by K-MEANS method. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High-tech technologies in space exploration of the Earth.* 2020;12(6):4–10. (In Russ.). doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
17. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey: ucheb. dlya vuzov. 10-e izd., ster. = Probability theory : textbook. for universities. 10th ed., ster.* Moscow: Vyssh. shk., 2006:575. (In Russ.)
18. Orlov A.I. *Prikladnoy statisticheskiy analiz: uchebnyk = Applied statistical analysis : textbook.* Moscow: Ay Pi Ar Media, 2022:812. (In Russ.). EDN: EFUDYT
19. Blagodyrenko E.V., Shostal' V.Yu. Investigation of the paradox of the law of large numbers in the joint processing of significantly uneven measurements. *SPbNTORES: tr. ezhegodnoy nauch.-tekhn. konf. = SPbNTORES : proceedings of annual scientific and techn. conf.* 2021;(1):98–101. (In Russ.). EDN: OCZNWW

#### *Информация об авторах / Information about the authors*

##### **Сергей Владимирович Логунов**

кандидат технических наук, докторант,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: skobarik83@rambler.ru

##### **Sergey V. Logunov**

Candidate of technical sciences,  
doctoral student,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

##### **Евгений Васильевич Благодыренко**

кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры космической  
радиолокации и радионавигации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: blagodyrenroev@mail.ru

##### **Evgeny V. Blagodyrenko**

Candidate of technical sciences,  
senior lecturer of the sub-department  
of space radar and radio navigation,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

##### **Игорь Станиславович Герасименко**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры космической  
радиолокации и радионавигации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: iger60@mail.ru

##### **Igor S. Gerasimenko**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of space radar and radio navigation,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

##### **Николай Александрович Куприянов**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструкции  
и эксплуатации авиационной техники,  
Краснодарское высшее военное авиационное  
училище летчиков имени Героя Советского  
Союза А. К. Серова  
(Россия, Краснодарский край, г. Краснодар-5)  
E-mail: sektor-ussr@rambler.ru

##### **Nikolay A. Kupriyanov**

Candidate of technical sciences, associate professor  
of the sub-department of aviation engineering design  
and operation,  
Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots  
named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov  
(Krasnodar-5, Krasnodar Region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 23.06.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 15.07.2024**

**Принята к публикации / Accepted 05.08.2024**