

МЕТОД КОМБИНИРОВАНИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ИХ ПРОГНОЗА

Е. А. Благодыренко¹, Н. А. Куприянов², С. В. Логунов³,
В. Ю. Шосталь⁴, В. А. Шуняков⁵

^{1,3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

² Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова, Краснодар-5, Краснодарский край, Россия

⁴ Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Войсковая часть 17204, Коломна-1, Московская обл., Россия

¹ blagodyrenroev@mail.ru, ² sektor-ussr@rambler.ru, ³ skobarik83@rambler.ru,

⁴ shostal@mail.ru, ⁵ vase-lek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рост числа космических объектов техногенного происхождения в космосе, уменьшение их размера, выведение на околоземные орбиты многоспутниковых космических систем и все более широкое использование маневрирующих спутников негативно влияют на осуществление космической деятельности вследствие возрастания вероятности столкновений в космосе. Следовательно, актуальной научной задачей является исследование путей совершенствования информационного обеспечения безопасности космической деятельности с учетом новых вызовов, имеющей целью недопущение орбитальных инцидентов. *Материалы и методы.* Решение задачи предлагается путем повышения качества контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых космических систем с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого спутника. Для этого разработан метод комбинирования существенно неравноточных измерений, получаемых от различных средств наблюдения, который может быть использован для составления и ведения каталога потенциально опасных объектов в космосе. *Результаты.* Задача комбинирования измерений и построения прогноза ТНП для каждого спутника сводится к реализации следующего решающего метода: 1) при выявлении отклонений в ТНП спутника, свидетельствующих о совершении им орбитального маневра, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП используются данные последних измерений ТНП, содержащие актуальные параметры движения спутника, вне зависимости от их точности; 2) при наличии неравноточных измерений и данных прогноза ТНП спутника, погрешности которых превышают установленный порог (отличаются более чем на порядок), для последующего прогноза ТНП используются более точные данные; 3) при наличии измерений или данных прогноза ТНП спутника, погрешности которых отличаются менее чем на порядок, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП проводится их совместная обработка. *Выводы.* Предложенный в рамках статьи подход позволяет реализовать ведение каталога и последующего прогноза ТНП при выявлении маневра спутника с выдачей заявки на применение высокоточных средств измерений, а также исключать «грубые» данные из обработки при идентификации опорной орбиты (отсутствии орбитального маневра) низкоточными средствами измерения или устаревшими данными прогноза ТНП спутника.

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

Для цитирования: Благодыренко Е. А., Куприянов Н. А., Логунов С. В., Шосталь В. Ю., Шуняков В. А. 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

A METHOD OF COMBINING NON-PRECISION MEASUREMENTS OF THE MANEUVERING SATELLITES MOTION PARAMETERS IN ORDER TO ACHIEVE THE BEST ACCURACY AND RELIABILITY OF THEIR FORECAST

E.A. Blagodyrenko¹, N.A. Kupriyanov², S.V. Logunov³,
V.Yu. Shostal⁴, V.A. Shunyakov⁵

^{1,3} Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

² Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots

named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov, Krasnodar-5, Krasnodar region, Russia

⁴ State Scientific Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg, Russia

⁵ Military Unit 17204 of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Kolomna-1, Moscow region, Russia

¹ blagodyrenroev@mail.ru, ² sektor-ussr@rambler.ru, ³ skobarik83@rambler.ru,

⁴ shostal@mail.ru, ⁵ vase-lek@yandex.ru

Abstract. *Background.* The growing number of man-made space objects in space, the decrease in their size, the launch of multi-satellite space systems into near-earth orbits and the increasing use of maneuvering satellites negatively affect the implementation of space activities due to the increasing likelihood of collisions in space. Therefore, an urgent scientific task is to study ways to improve the information security of space activities, taking into account new challenges, with the aim of preventing orbital incidents. *Materials and methods.* The solution to the problem is proposed by improving the quality of population control of the working and intermediate orbits of multi-satellite space systems with high-precision determination of the current navigation parameters (CNP) of each observed satellite. For this purpose, a method for combining significantly uneven measurements obtained from various means of observation has been developed, which can be used to compile and maintain a catalog of potentially dangerous objects in space. *Results.* The task of combining measurements and building a CNP forecast for each satellite is reduced to the implementation of the following decisive method: 1) when detecting deviations in the satellite's CNP, indicating that it has performed an orbital maneuver, data from recent CNP measurements containing current satellite motion parameters, regardless of their accuracy, are used to maintain a catalog and subsequent CNP forecast; 2) in the presence of non-precision measurements and satellite CNP forecast data, the errors of which exceed the established threshold (differ by more than an order of magnitude), more accurate data are used for the subsequent CNP forecast; 3) in the presence of measurements or data from the satellite's CNP forecast, the errors of which differ by less than an order of magnitude, their joint processing is carried out to maintain the catalog and subsequent CNP forecast. *Conclusions.* The approach proposed in the framework of the article makes it possible to maintain a catalog and subsequent CNP forecast when detecting a satellite maneuver with an application for the use of high-precision measuring instruments, as well as exclude «rough» data from processing when identifying the reference orbit (absence of an orbital maneuver) with low-precision measuring instruments or outdated satellite CNP forecast data.

Keywords: artificial Earth satellite, space debris object, optoelectronic system, quantum optical system, long-range detection radar

For citation: Blagodyrenko E.A., Kupriyanov N.A., Logunov S.V., Shostal V.Yu., Shunyakov V.A. A method of combining non-precision measurements of the maneuvering satellites motion parameters in order to achieve the best accuracy and reliability of their forecast. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):14–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2

Введение

В настоящее время ведущие космические державы планируют создание, развертывание и запуск в эксплуатацию многоспутниковых космических систем (КС) с количеством искусственных спутников Земли (ИСЗ) вплоть до сотен или тысяч, а в среднесрочной перспективе – до десятков тысяч, размещенных в одной или нескольких орбитальных плоскостях, а также на промежуточных орбитах после кластерных запусков. Конфигурация такой КС может быть охарактеризована понятием «орбитальный слой» (ОС). В качестве примера можно привести реализуемый США проект «Старлинк» [1, 2] и российский проект «Сфера» [3]. Неизбежность выхода из строя ИСЗ, составляющих многоспутниковые системы, а также стохастический характер отказов отдельных спутников порождают риск в десятки раз более активного, чем сейчас, засорения околоземного космического пространства (ОКП). К ОКМ в настоящее время принято относить фрагменты, образующиеся в процессе выведения ИСЗ в ОКП, в том числе отработавшие

пиротехнические и механические устройства, а также фрагменты, появившиеся в результате разрушения ИСЗ.

Подобная эволюция формирования ОКМ может уже в среднесрочной перспективе привести к возникновению эффекта Кesslera в отдельно взятом ОС [4, 5]. Кроме трудностей с эксплуатацией самих многоспутниковых систем, построенных по типу ОС, существует проблема, связанная с осуществлением космической деятельности на более высоких орбитах, для которых существует необходимость или пролета сквозь ОС на этапе выведения на более высокие орбиты, или функционирования ИСЗ на высокоэллиптических орбитах. В сложившихся условиях задачи наблюдения за обстановкой в ОКП, контроля заселенности орбит и предупреждения опасных инцидентов, связанных со столкновениями ИСЗ или их повреждением ОКМ, приобретают особую актуальность, особенно в части пилотируемого космоса [5].

Задачи перспективной системы оперативного реагирования на опасные ситуации в околоземном космическом пространстве

Проблема недопущения орбитальных инцидентов формулирует две основные задачи, связанные с наблюдениями и информационным обеспечением безопасности космической деятельности [6]:

1) повышение достоверности и оперативности контроля космической обстановки как обязательного вида обеспечения космической деятельности ближайшего будущего, включающего обнаружение, распознавание, оценивание технического состояния и уточнение параметров орбит всех объектов в ОКП;

2) повышение достоверности и полноты «космической ситуационной осведомленности» как совокупности знаний о каждом спутнике в качестве источника возникновения возможных опасностей для космической деятельности в целом.

Таким образом, задача недопущения орбитальных инцидентов (столкновений ИСЗ друг с другом) требует обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых КС с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого спутника. При этом необходимо учитывать как движение ИСЗ и ОКМ по баллистическим траекториям, так и более сложное, с точки зрения наблюдения спутников, маневрирование ИСЗ с двигателями малой тяги.

Важным фактором обеспечения полноты и достоверности наблюдения за обстановкой в ОКП является необходимость информационного взаимодействия между системами различной государственной принадлежности, выполнения обязательств по обмену эфемеридной и другой информацией о сопровождаемых ИСЗ и планах развертывания многоспутниковых КС, а также учет взаимных интересов и возможных угроз, исходящих от развертывания многоспутниковых систем каждой из стран.

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 автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в ОКП (АСПОС ОКП), эксплуатируемая госкорпорацией «Роскосмос» [7].

Целью создания СОРУК является обеспечение полноты и достоверности контроля ТНП ИСЗ и ОКМ, прежде всего иностранной принадлежности, по которым существует априорная неопределенность. Информационное обеспечение СОРУК предлагается осуществлять наземными оптическими средствами (НОС), квантово-оптическими средствами (КОС) и радиолокационными станциями дальнего обнаружения (РЛС ДО).

В качестве дополнительных источников информационного обеспечения СОРУК предлагается возможным использовать данные от средств взаимодействующих информационных систем и привлекаемых средств организаций Российской академии наук.

Проведение разнесенных по времени неравноточных измерений текущих навигационных параметров спутников с привлечением разнородных средств наблюдения

В настоящее время в основу выявления опасных ситуаций космической деятельности положен принцип сравнения данных каталога ИСЗ на предмет прогнозирования возможных инцидентов (столкновений, пересечений траекторий) с учетом неопределенности ТНП каждого каталогизированного спутника. Сравнение данных ведется на основе прогнозирования

параметров движения всех каталогизированных ИСЗ с привязкой по времени. Уточнение данных каталога производится по результатам сеансов измерений ТНП ИСЗ информационными средствами перечисленных выше типов и заключается в получении новых векторов оценок ТНП с соответствующими им векторами оценок погрешностей [8].

Пусть \vec{X} – вектор ТНП ИСЗ в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК):

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

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

Соответствующий ему вектор оценок погрешностей определения ТНП ИСЗ $\vec{\sigma}$, компонентами которого являются среднеквадратические отклонения (СКО), можно представить в виде

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

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 σ_t .

Фактически комплексной характеристикой движения спутника в любой фиксированный момент времени t будет являться совокупность векторов \vec{X} и $\vec{\sigma}$. При этом векторы погрешностей измерений ТНП определяются в ходе сеанса измерений, исходя из точностных характеристик средства измерения и условий проведения сеанса. Величины погрешностей в основном зависят от типа средства измерения и могут различаться на несколько порядков.

В качестве примера на рис. 1 показана схема проведения разнесенных во времени сеансов оптических измерений ТНП ИСЗ, по результатам каждого из которых получена опорная траектория движения наблюдаемого спутника. Область ошибок ТНП в начале 1-го сеанса измерений формируется за счет погрешности средства измерения (инструментальной погрешности) НОС (КОС) № 1. Аналогично формируется область ошибок ТНП в начале 2-го сеанса измерений. За счет фильтрации измерений на участке наблюдения ИСЗ влияние данной погрешности на оценки ТНП может быть уменьшено, что показано на схеме в виде сужения области разброса. Таким образом, размеры областей ошибок ТНП в конце 1-го и 2-го сеансов измерений будут зависеть от погрешности средств измерений и длин участков наблюдения ИСЗ с пунктов № 1 и 2 соответственно.

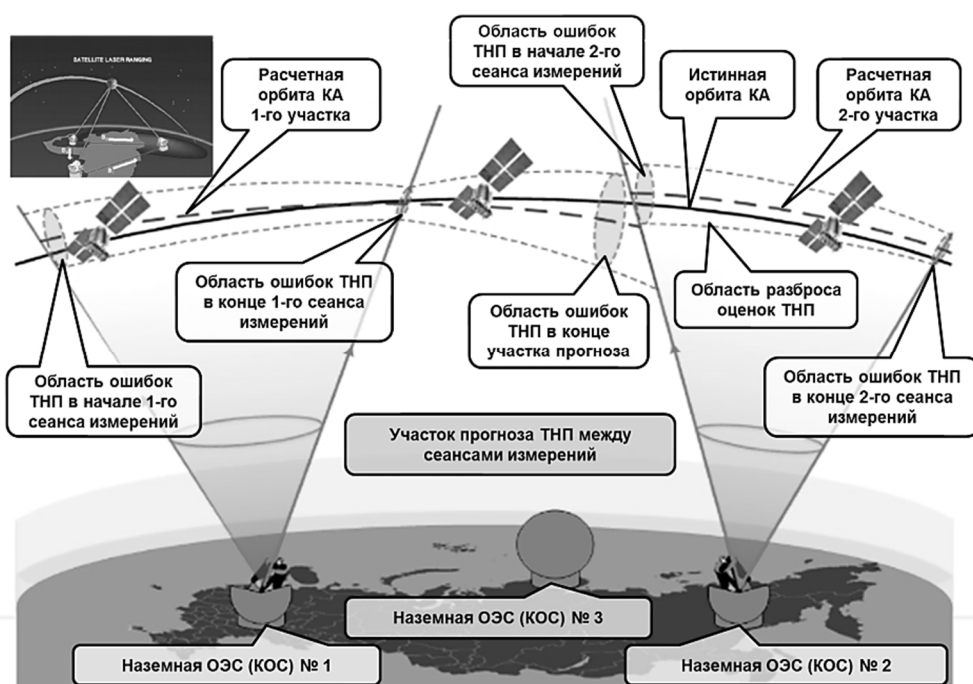


Рис. 1. Схема проведения оптических измерений ТНП ИСЗ и формирования опорных траекторий

По окончании сеанса измерения производится апостериорная обработка результатов и формируется расчетная (опорная) орбита ИСЗ. Вследствие влияния ошибок измерений полученные орбиты будут различаться. На рис. 2 штриховыми линиями показаны расчетные орбиты, полученные по результатам измерений в 1-м и 2-м сеансах, которые в общем случае не пересекаются и не совпадают с истинной орбитой ИСЗ (сплошная линия). Расчетная орбита спутника, полученная в результате обработки измерений на первом участке, становится опорной орбитой спутника на участке прогноза ТНП между измерениями. Область ошибок ТНП в конце 1-го сеанса измерений одновременно является областью ошибок начала участка прогноза орбиты ИСЗ между сеансами измерений.

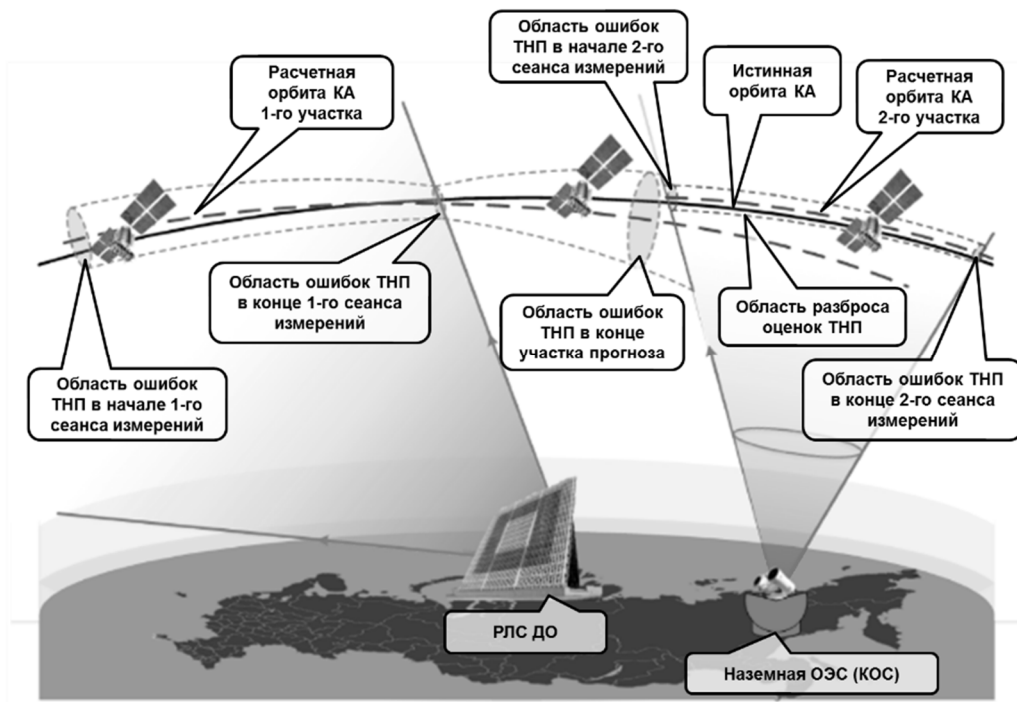


Рис. 2. Схема формирования полей ошибок и прогнозов ТНП ИСЗ при проведении разнесенных по времени неравноточных измерений ТНП ИСЗ с привлечением РЛС ДО и НОС (КОС)

Участок прогноза орбиты ИСЗ между сеансами измерений также имеет область разброса оценок ТНП, которая формируется наличием неопределенностей модели движения ИСЗ, вызванных возмущениями различной природы. Обработка измерений на 2-м участке позволяет построить новые расчетную орбиту и область ошибок определения ТНП ИСЗ. Пересчет поправок к орбите на момент начала 2-го участка дает скачкообразную коррекцию опорной орбиты, а также формирует относительно нее новую область ошибок ТНП, начальный размер которой фактически определяется инструментальной погрешностью НОС (КОС) № 2. При этом в случае корректного выбора моделей движения ИСЗ и формирования области разброса истинная орбита должна оставаться в пределах области разброса оценок ТНП, иначе не будут выполняться требования к полноте и достоверности информации, циркулирующей в СОРУК. Аналогично формируется схема проведения разнесенных во времени сеансов измерений ТНП ИСЗ с использованием РЛС ДО, учитывающая временные и энергетические ограничения по сопровождению ИСЗ [9].

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, проявляющихся в невязке измерений их местоположения [10], что необходимо для функционирования СОРУК.

Появление многоспутниковых систем существенно усложняет решение данной задачи. При значительно возрастающем потоке измерений, получаемых РЛС ДО, их точности зачастую оказывается недостаточно для определения ТНП ИСЗ с учетом совершения ими орбитального

маневра с использованием двигателей малой тяги, работающих на всем протяжении сеанса наблюдения. Такие двигатели, в частности, используют спутники, входящие в систему «Старлинк», для довыведения на рабочую орбиту после отделения от ракеты-носителя. При этом информационные возможности НОС (КОС), обеспечивающие необходимую точность определения ТНП маневрирующего спутника, ограничены по потоку измерений.

НОС и КОС обладают прецизионной точностью измерений, которая по величине СКО превосходит точность РЛС ДО от двух до пяти порядков. На рис. 3. штриховыми линиями показаны расчетные орбиты, полученные по результатам измерений в 1-м и 2-м сеансах, которые в общем случае не пересекаются и не совпадают с истинной орбитой ИСЗ (сплошная линия). При этом расчетная орбита ИСЗ, полученная по результатам обработки измерений РЛС ДО на первом участке, будет существенно отличаться от истинной орбиты ИСЗ и не попадает в область ошибок измерений НОС (КОС) в начале второго участка. Таким образом, она не может использоваться в качестве опорной орбиты спутника, хотя на снижение информативности самой РЛС ДО это не влияет [11].

Это приводит либо к «выбраковке» всех предыдущих измерений и построению новой опорной орбиты, либо к необходимости «загрубления» измерений НОС (КОС) для последующей совместной обработки.

В случае, если сеанс измерений РЛС ДО следует после сеанса измерений НОС (КОС), то совместная обработка их результатов может существенно повлиять на точность построения новой опорной орбиты по сравнению с результатами измерения, полученными только РЛС ДО. При этом поток измерений, всепогодность и всеуточность РЛС ДО не позволяют отказаться от их использования и перейти только к измерениям НОС (КОС), а с учетом необходимости оперативного выявления фактов совершения ИСЗ орбитальных маневров потенциальный вклад РЛС ДО еще больше возрастает.

Описанное противоречие позволяет сформулировать основную проблему каталогизации низкоорбитальных маневрирующих спутников на основе совместной обработки измерений ТНП (1), полученных от РЛС ДО и НОС (КОС) на разных участках (рис. 1), величины погрешностей которых (2) могут различаться по величине до пяти порядков, т.е. являются существенно неравноточными. Это приводит к ситуации, когда расчетная орбита спутника (штриховая линия 1-го участка), полученная более грубой РЛС ДО, может не попасть в интервал погрешности измерений НОС (КОС) (пунктирная линия 2-го участка), что сделает невозможной их совместную обработку статистическими методами, используемыми при ведении каталога ИСЗ в СОРУК. Иными словами, совместная обработка существенно неравноточных измерений методами теории вероятностей в общем случае нереализуема, а при наличии актуальных высокоточных измерений грубые измерения вообще можно исключить из рассмотрения.

Описанная проблема требует выработки особого подхода к решению задачи совместной обработки существенно неравноточных измерений. Подобная задача в рассматриваемой постановке в других системах измерений и областях техники не встречается.

Ограничения при решении данной задачи обусловлены возможностями СОРУК по контролю низкоорбитальных маневрирующих ИСЗ с учетом значительного увеличения их количества при развертывании многоспутниковых КС. Эти ограничения характеризуются потоками измерений, существенно различающимися для РЛС ДО и НОС (КОС), а также требованиями к погрешностям ТНП (2), которые могут оказаться невыполненными в результате проведения сеанса измерений РЛС ДО.

Данная задача в аналогичных системах, где отсутствовали жесткие требования по точности измерения ТНП, решалась путем «загрубления» более точных измерений (назначением погрешности НОС, соизмеримой с погрешностью РЛС ДО). При этом в существовавших ранее навигационных спутниковых системах на основе низкоорбитальных ИСЗ, где требовалась высокая точность измерения ТНП, информация от РЛС ДО вообще не использовалась.

С точки зрения теории вероятностей проблема совместной обработки измерений ТНП ИСЗ, полученных существенно неравноточными средствами, заключается в несовпадении средневыборочных значений измеряемых параметров с их математическими ожиданиями. В литературе данная проблема описана математически на основе комбинаторики. Это, в свою очередь, приводит к недостоверной интерпретации измерительной информации. В связи с этим для обработки существенно неравноточных измерений требуется новый подход, основанный на вариативном учете измерений, получаемых существенно неравноточными средствами, т.е. на их комбинировании [8].

Постановка задачи комбинирования неравноточных измерений

Будем полагать, что точность РЛС ДО характеризуется величиной погрешности $\bar{\sigma}_{x,y,z,1}$, порядка 100 м, а точность НОС (КОС) – $\bar{\sigma}_{x,y,z,2}$ порядка 0,1 м, т.е. погрешности РЛС ДО и НОС различаются на три порядка.

Для ведения каталога маневрирующих низкоорбитальных ИСЗ в СОРУК требуется задать точность измерения ТНП $\bar{\sigma}_{x,y,z,3}$ не хуже 50 м, а по некоторым спутникам – не хуже 10 м.

При этом к оставшимся компонентам вектора погрешностей (2) на данном этапе требований предъявлять не будем. Следовательно, в этих условиях измерений с использованием только РЛС ДО для ведения каталога низкоорбитальных ИСЗ будет недостаточно.

Таким образом, возникает необходимость разработки методики совместной обработки результатов существенно неравноточных измерений, получаемых РЛС ДО и НОС (КОС) по одному и тому же низкоорбитальному ИСЗ на основе их комбинирования и метода для ее реализации.

На рис. 3 схематично показано соотношение полей ошибок и прогнозов орбиты низкоорбитальных ИСЗ в зоне действия измерительных средств при совместной обработке результатов существенно неравноточных измерений РЛС ДО и НОС (КОС).

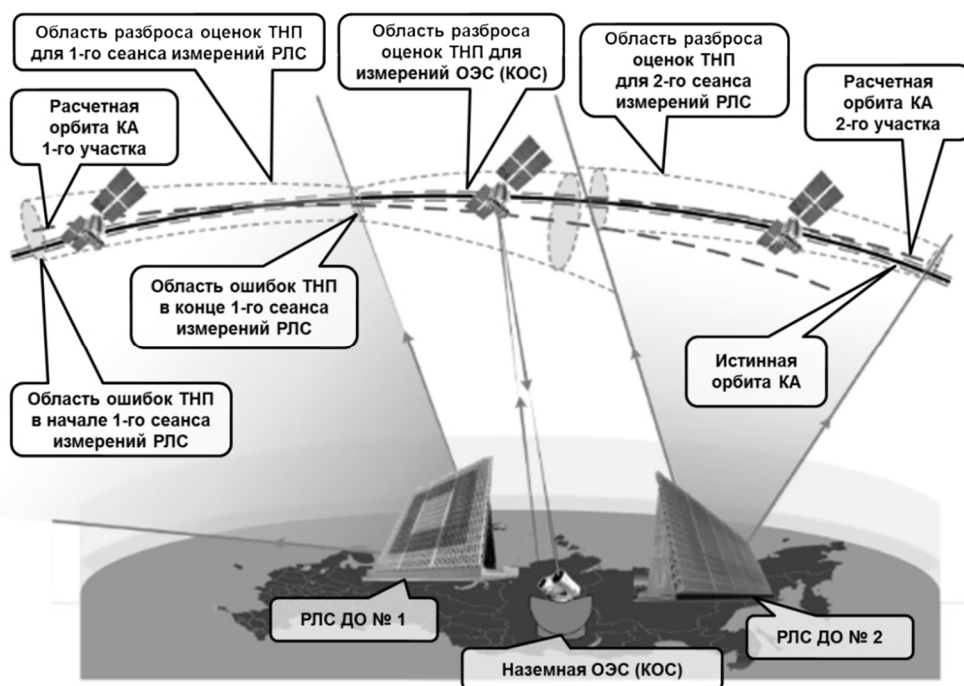


Рис. 3. Соотношение полей ошибок и прогнозов траектории низкоорбитальных ИСЗ при совместной обработке результатов существенно неравноточных измерений РЛС ДО и НОС (КОС)

В этом случае задача минимизации погрешностей ТНП в каталоге ИСЗ или обеспечения требуемых величин погрешностей может быть сформулирована следующим образом [4].

Пусть $\vec{X}_и$ – вектор оценок ТНП ИСЗ, полученный по результатам измерений в текущем сеансе и приведенный к моменту времени t , $\vec{X}_п$ – вектор спрогнозированных ТНП ИСЗ на тот же момент времени t , а $\bar{\sigma}_и$ и $\bar{\sigma}_п$ – соответствующие им вектора погрешностей (СКО) измерений и прогноза.

В этом случае прогноз траектории движения ИСЗ в пределах участка измерений будет характеризоваться массивом $(\vec{X}_п, \bar{\sigma}_п)$, включающим величины ТНП ИСЗ и погрешности их прогноза. Этому участку также соответствует массив результатов измерений $(\vec{X}_и, \bar{\sigma}_и)$, сформированный после обработки результатов сеанса измерений с привязкой по времени.

Решение данной задачи будет основано на разработке метода комбинирования неравноточных измерений ТНП ИСЗ при их совместной обработке в интересах СОРУК.

Метод комбинирования измерений текущих навигационных параметров спутников для их совместной обработки в интересах системы оперативного реагирования на опасные ситуации в космосе

При наличии измерений ТНП ИСЗ и их прогноза требуется их обобщение, которое может быть реализовано на основе сравнения величин их погрешностей. Сформулируем условия комбинирования измеренных и спрогнозированных ТНП ИСЗ:

– если погрешности прогноза ТНП ИСЗ будут существенно меньше соответствующих погрешностей измерений (для случая РЛС ДО), то обобщение будет сводиться к проверке совпадения данных прогноза с данными измерений без корректировки массива $(\vec{X}_П, \vec{\sigma}_П)$;

– если погрешности измерений ТНП ИСЗ будут существенно меньше соответствующих погрешностей прогноза (для случая НОС и КОС), то требуется изменение прогноза $(\vec{X}_П, \vec{\sigma}_П)$ на основе данных измерений $(\vec{X}_И, \vec{\sigma}_И)$;

– если погрешности прогноза и измерений ТНП ИСЗ будут одного порядка, то целесообразно проводить их комплексирование с получением усредненных оценок, которые в дальнейшем целесообразно рассматривать в качестве уточненного прогноза ТНП ИСЗ.

Данная совокупность условий подходит для любых неманеврирующих ИСЗ, у которых в прогноз орбиты попадает область разброса (поле ошибок) результатов измерений ТНП. Однако если спутник за счет собственной двигательной установки совершает орбитальный маневр, его новая орбита существенно изменится и за короткое время выйдет за пределы поля ошибок полученного ранее прогноза. Поэтому предлагается дополнить обобщение ТНП ИСЗ условием, что если измерения ТНП ИСЗ, полученные в новом сеансе, будут существенно отличаться от прогноза, имеющегося на основе предыдущих сеансов измерений, то новый прогноз должен строиться только на основе результатов новых измерений $(\vec{X}_И, \vec{\sigma}_И)$, какой бы точностью они не характеризовались.

Обобщая вышеизложенное с учетом (1) и (2), можно составить выражение для нахождения итогового вектора ТНП ИСЗ \vec{X}_Σ на момент времени t получения обобщенного результата произвольного сеанса измерений в виде метода комбинирования ТНП:

$$\vec{X}_\Sigma = \begin{cases} \vec{X}_И, & \text{если ИСЗ сманеврировал,} \\ \vec{X}_И, & \text{если } |\vec{\sigma}_И| < \bar{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_П), \\ \vec{X}_П, & \text{если } |\vec{\sigma}_П| < \bar{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_И), \\ F(\vec{X}_И, \vec{X}_П), & \text{если } |\vec{\sigma}_И| \geq \bar{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_П) \vee |\vec{\sigma}_П| \geq \bar{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_И), \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_П)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\sigma}_П$; $\bar{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_И)$ – 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.

По аналогии запишется метод комбинирования итогового вектора погрешностей $\vec{\sigma}_\Sigma$:

$$\vec{\sigma}_\Sigma = \begin{cases} \vec{\sigma}_И, & \text{если ИСЗ сманеврировал,} \\ \vec{\sigma}_И, & \text{если } |\vec{\sigma}_И| < \bar{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_П), \\ \vec{\sigma}_П, & \text{если } |\vec{\sigma}_П| < \bar{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_И), \\ G(\vec{\delta}_И, \vec{\delta}_П), & \text{если } |\vec{\sigma}_И| \geq \bar{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_П) \vee |\vec{\sigma}_П| \geq \bar{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_И), \end{cases} \quad (4)$$

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

Последние выражения в условиях (3) и (4) фактически соответствуют случаю невыполнения первых трех условий и представляют собой результат комплексирования измеренного и спрогнозированного значений.

Заключение

Таким образом, задача комбинирования измерений и построения прогноза ТНП для каждого спутника будет сводиться к реализации следующего решающего метода:

1) при выявлении отклонений в ТНП ИСЗ, свидетельствующих о совершении им орбитального маневра, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП используются данные последних измерений ТНП, содержащие актуальные параметры движения ИСЗ, вне зависимости от их точности (верхняя строчка выражения (4));

2) при наличии неравноточных измерений и данных прогноза ТНП ИСЗ, погрешности которых превышают установленный порог (отличаются более чем на порядок), для последующего прогноза ТНП используются более точные данные (условия (2) и (3) выражения (4));

3) при наличии измерений или данных прогноза ТНП ИСЗ, погрешности которых отличаются менее чем на порядок, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП проводится их совместная обработка, т.е. комплексирование (нижняя строчка выражения (4)).

Это позволит реализовать описанный решающий метод для комбинирования и принятия решения на использование выбранных на его основе данных:

– для ведения каталога и последующего прогноза ТНП КО – при выявлении маневра ИСЗ с выдачей заявки на применение высокоточных средств измерений, под которыми понимаются ОЭС (КОС);

– для исключения «грубых» данных из обработки – при идентификации опорной орбиты (отсутствии орбитального маневра) низкоточными средствами измерения или устаревшими данными прогноза ТНП ИСЗ.

Список литературы

1. Ключников, В.Ю. Синдром Кesslerа: будет ли закрыта дорога в космос? // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 32–43.
2. Цыгикало Н.А. Группировка Starlink – система орбитального перехвата принципиально нового типа // Naked science. URL: <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat> (дата обращения: 01.03.2024).
3. Суханов С. А., Шаргородский В. Д., Шилин В. Д. Система контроля космического пространства. М.: Правда, 2011. 206 с.
4. Благодыренко Е. В., Горбенков С. П., Царев С. М., Шосталь В. Ю. Комбинирование неравноточных измерений параметров движения маневрирующих космических объектов // 77-я НТК СПб НТОРЭС. СПб., 2022. С. 56–58.
5. 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.
6. Благодыренко Е. В., Шосталь В. Ю. Исследование парадокса закона больших чисел при совместной обработке существенно неравноточных измерений // 76-я НТК СПб НТОРЭС. СПб., 2021. С. 98–100.
7. Солнцев А. М., Ключня А. Ю. Применение противоспутникового оружия: международно-правовые проблемы // Обозреватель-Observer. 2013. № 3. С. 57–74.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 10-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
9. Логунов С. В., Куприянов Н. А. Методика ранжирования каталогизированных космических объектов, используемых для повышения точности определения координат объектов радиолокационной станцией дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. № 1. С. 75–84. EDN: ZBNECD
10. Кондыбаев Н. С., Куприянов Н. А., Куракин С. З. Алгоритм траекторной обработки информации радиолокационных измерительных комплексов на основе кластеризации методом K-MEANS // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12, № 6. С. 4–10. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
11. 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

References

1. Klyushnikov V.Yu. Kessler syndrome: will the road to space be closed? *Vozdushno-kosmicheskaya sfera = The aerospace sphere*. 2021;(4):32–43. (In Russ.)
2. Tsygikalo N.A. Starlink grouping – an orbital interception system of a fundamentally new type. *Naked science*. (In Russ.). Available at: <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat> (accessed 01.03.2024).

3. Sukhanov S.A., Shargorodskiy V.D., Shilin V.D. *Sistema kontrolya kosmicheskogo prostranstva = Space control system*. Moscow: Pravda, 2011:206. (In Russ.)
4. Blagodyrenko E.V., Gorbenkov S.P., Tsarev S.M., Shostal' V.Yu. Combining non-precision measurements of motion parameters of maneuvering space objects. *77-ya NTK SPb NTORES = 77th STK SPb NTORES*. Saint Petersburg, 2022:56–58. (In Russ.)
5. Kalyuta A.N. Global monitoring of the space situation – the most important direction of ensuring military security of the Russian Federation in the aerospace sphere. *Voennaya mysl' = Military Thought*. 2017;(9): 5–11. (In Russ.)
6. Blagodyrenko E.V., Shostal' V.Yu. Investigation of the paradox of the law of large numbers in the joint processing of substantially non-precision measurements. *76-ya NTK SPb NTORES = 76th STK SPb NTORES*. Saint Petersburg, 2021:98–100. (In Russ.)
7. Solntsev A.M., Klyunya A.Yu. The use of anti-satellite weapons: international legal problems. *Obozrevatel'-Observer*. 2013;(3):57–74. (In Russ.)
8. 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.)
9. Logunov S.V., Kupriyanov N.A. Methodology for ranking cataloged space objects used to improve the accuracy of determining the coordinates of objects by a long-range radar station. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya = Radio electronics issues. Ser.: Television technology*. 2019;(1):75–84. (In Russ.). EDN: ZBNECD
10. Kondybaev N.S., Kupriyanov N.A., Kurakin S.Z. Algorithm of trajectory information processing of radar measuring complexes based on clustering by the 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
11. 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 = High-tech technologies*. 2021;22(3): 89–97. (In Russ.). doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Александрович 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 A. Blagodyrenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department
of space radar and radio navigation,
Mozhaisky Military Space Academy
(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, ул. Дзержинского, 135)
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
(135 Dzerzhinskiy street, Krasnodar-5,
Krasnodar region, Russia)

Сергей Владимирович Логунов

кандидат технических наук,
докторант кафедры космической
радиолокации и радионавигации,
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 of the sub-department
of space radar and radio navigation,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Вячеслав Юрьевич Шосталь

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Государственный научно-исследовательский
институт прикладных проблем
(Россия, г. Санкт-Петербург,
набережная Обводного канала, 29)
E-mail: shostal@mail.ru

Vyacheslav Yu. Shostal

Candidate of technical sciences, research associate,
State Scientific Research Institute
of Applied Problems
(29 Embankment of the Obvodny Canal,
St. Petersburg, Russia)

Василий Александрович Шуняков

инженер отдела боевого управления,
Войсковая часть 17204
Министерства обороны Российской Федерации
(Россия, Московская область, г. Коломна-1)
E-mail: vase-lek@yandex.ru

Vasily A. Shunyakov

Engineer of the combat control department,
Military Unit 17204 of the Ministry of Defense
of the Russian Federation
(Kolomna-1, Moscow region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 22.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2024

Принята к публикации/Accepted 13.05.2024