

Комбинирование неравноточных измерений параметров движения маневрирующих космических объектов

Е. В. Благодыренко, С. П. Горбенков,
С. М. Царев
Военно-космическая академия
имени А.Ф. Можайского
vka@mail.ru

В. Ю. Шосталь
Университет ИТМО
shostal@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы комбинирования неравноточных измерений радиолокационных и оптико-электронных средств наблюдения за космическими объектами. Необходимость привлечения разнотипных средств вызвана появлением многоспутниковых космических систем с большим количеством маневрирующих космических аппаратов типа Starlink, представляющих потенциальную опасность для космической деятельности других государств.

Ключевые слова: космический объект, измерение, комбинирование

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведущие космические державы – Россия, США и Китай – планируют создание, развертывание и запуск в эксплуатацию многоспутниковых космических систем (МКС) с количеством космических аппаратов (КА) до сотен тысяч, а в среднесрочной перспективе – десятков тысяч КА, размещенных на одной или нескольких рабочих орбитах. К таким системам относится, в частности, реализуемый США проект «Старлинк».

Так на сегодняшний день группировка КА «Старлинк» насчитывает чуть менее 1800 КА, из которых к концу 2021 года более 100 сведены с орбиты или превратились в объекты космического мусора. Из них количество вышедших из строя КА, которые не удалось свести с орбиты, составляет порядка 25 % [1, 2]. Всего группировка «Старлинк» будет насчитывать порядка 4400 функционирующих КА, что существенно увеличит количество КА и объектов космического мусора на рабочих орбитах (рис. 1).

КА системы «Старлинк» изначально планировалось развертывать на орбитах с высотами 1100...1325 км, но впоследствии был выбран диапазон высот орбит 550...560 км с запланированным сходом с орбиты в течение 5 лет в случае выхода КА из строя [1]. При этом развертывание КА на рабочих орбитах осуществляется с использованием промежуточных орбит с высотами 280...290 км, «время жизни» на которых составляет порядка 100 суток [1, 2]. В дальнейшем повышение орбиты до рабочей обеспечивается ионными двигателями самих КА. Это потенциально уменьшает засоренность рабочего «слоя» с высокой заселенностью.

Неизбежность выхода из строя КА, составляющих МКС, а также стохастический характер отказов отдельных КА, порождает риск в десятки раз более активного, чем сейчас, засорения околоземного космического пространства (ОКП). Объектами

космического мусора также будут являться фрагменты, образующиеся в результате выведения КА, а также последствия их разрушения.

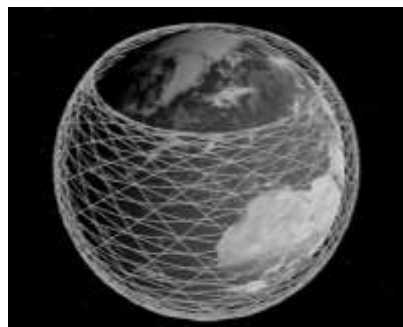


Рис. 1. Расположение плоскостей орбит группировки КА «Старлинк» по состоянию на июнь 2021 года

Кроме проблем с эксплуатацией самих МКС, построенных по типу «орбитального слоя», существует проблема, связанная с осуществлением космической деятельности на более высоких орбитах, для которых существует необходимость пролета сквозь «слой» на этапе выведения КА.

На сегодняшний день для Российской Федерации (РФ) одной из основных задач для обеспечения безопасности космической деятельности и беспрепятственного доступа в ОКП выступает выявление угроз для пилотируемой космонавтики [3], а в перспективе – в задачу предотвращения любых инцидентов в ОКП [4].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Проблема недопущения орбитальных инцидентов формулирует две основные задачи, связанные с наблюдениями и информационным обеспечением безопасности космической деятельности [4]:

1. повышение достоверности и оперативности контроля космической обстановки, включая обнаружение, распознавание, оценивание технического состояния и уточнения параметров орбит всех объектов в ОКП;
2. повышение достоверности и полноты «космической ситуационной осведомленности» («SSA» – Space Situational Awareness) как совокупности знаний о каждом КО как источнике угроз возникновения инцидентов для космической деятельности в целом [3, 4].

Таким образом, задача недопущения орбитальных инцидентов требует, прежде всего, обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит МКС с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого космического объекта (КО), движущегося как по баллистическим траекториям, так и по более сложным, при включении ионных двигателей.

III. АНАЛИЗ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ И СТРУКТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ НА УГРОЗЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Парирование угроз космической деятельности должно осуществляться специализированной информационной системой (СИС). В качестве прототипа и возможной основы создания и развития СИС в РФ может выступать российская автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС) в ОКП, эксплуатируемая госкорпорацией «Роскосмос» [3, 4].

Создание и развитие СИС должно быть направлено на обеспечение полноты и достоверности контроля параметров как отдельных КО, так и космических систем, прежде всего иностранной принадлежности.

Информационное обеспечение СИС, как исторически сложилось с 60-х годов XX века, будет осуществляться информационными средствами контроля космического пространства, в состав которых входят оптические средства (ОС) и радиолокационные станции (РЛС) [3, 4].

В основу парирования угроз в ОКП положен принцип сравнения данных каталога КО на предмет прогнозирования возможных коллизий (столкновений, пересечений траекторий) с учетом неопределенности ТНП каждого каталогизированного объекта. Сравнение данных ведется на основе построения прогноза параметров движения всех каталогизированных КО с привязкой по времени. Уточнение данных каталога производится по результатам сеансов измерений ТНП КО информационными средствами, перечисленных выше типов, и заключается в получении новых векторов ТНП с соответствующими значениями погрешностей.

Появление МКС существенно усложняет решение данной задачи. При значительно возрастающем потоке измерений, получаемых РЛС, их точности зачастую оказывается недостаточно для определения ТНП КА с учетом совершения ими орбитального маневра с использованием двигателей малой тяги, работающих на всем протяжении сеанса наблюдения и после его завершения. Такие двигатели, в частности, используют КА, входящие в систему «Старлинк», для довыведения на рабочую орбиту после отделения от ракеты-носителя. При этом информационные возможности ОС ограничены по потоку измерений, хотя их точности достаточно для определения ТНП маневрирующего КА.

Основную проблему представляет совместная обработка измерений, полученных от РЛС и ОС, величины погрешностей которых могут различаться до 5 порядков, то есть являются существенно неравноточными. Таким образом, может возникнуть ситуация, когда расчетная траектория (орбита) КО, полученная более грубой РЛС, не попадет в интервал погрешности измерений ОС, что затрудняет в дальнейшем проведение их совместной обработки и

каталогизации в СИС. Отсюда вытекает и другая проблема – проблема разработки алгоритмов расчета ТНП КА и получения их прогнозных значений.

Проблема совместной обработки измерений ТНП КО, полученных существенно неравноточными средствами, заключается в несовпадении средневыборочных значений измеряемых параметров с их математическими ожиданиями. В литературе [6] данная проблема описана математически на основе комбинаторики.

В связи с этим требуется новый подход к распознаванию (идентификации) КО, основанный на вариативном учете измерений, получаемых существенно неравноточными средствами [3, 4, 6].

IV. ПРАВИЛО КОМБИНИРОВАНИЯ ТНП КО ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ В РАМКАХ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ НА УГРОЗЫ В ОКП

Минимизацию погрешностей ТНП в каталоге КО должна обеспечить новая информационно-управляющая система, реализующая принципы вариативного подхода к формированию заявок на проведение измерений ТНП КО с учетом погодных и других условий в пунктах наблюдения с последующей комбинированной обработкой полученных результатов [3]. В этом случае задача получения оценок ТНП КО может быть сформулирована следующим образом [5, 6].

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

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

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

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

$$\vec{\sigma} = [\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_{V_x}, \delta_{V_y}, \delta_{V_z}, \delta_t]^T, \quad (2)$$

где $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_{V_x}, \delta_{V_y}, \delta_{V_z}$ – среднеквадратические отклонения соответствующих компонент вектора \vec{X} ; δ_t – СКО привязки к шкале времени.

Фактически, комплексной характеристикой движения КО в любой фиксированный момент времени t будет являться совокупность векторов \vec{X} и $\vec{\sigma}$.

При наличии результатов измерений $(\vec{X}_n, \vec{\sigma}_n)$ и прогноза $(\vec{X}_n, \vec{\sigma}_n)$ ТНП КО, полученных на момент времени t , очевидно, требуется их обобщение. Будем называть совместную обработку результатов измерения и прогноза ТНП КО – комплексированием, а целенаправленный выбор одного результата в качестве

основного (единственного) вне зависимости от обработки – комбинированием.

Сформулируем правило комбинирования измеренных и спрогнозированных ТНП КО на момент времени t .

Пусть $\vec{X}_И$ – вектор измеренных ТНП КО в текущем сеансе, приведенный к моменту времени t , $\vec{X}_П$ – вектор спрогнозированных ТНП КО на тот же момент времени t , а $\vec{\delta}_И$ и $\vec{\delta}_П$ – соответствующие им вектора погрешностей (СКО) измерений и прогноза. Тогда правило их комбинирования для определения итогового вектора ТНП КО \vec{X}_Σ можно представить в виде условия:

$$\vec{X}_\Sigma = \begin{cases} \vec{X}_И, & \text{если КО сманивировал,} \\ \vec{X}_И, & \text{если } |\vec{\delta}_И| < \varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\delta}_И) \\ \vec{X}_П, & \text{если } |\vec{\delta}_П| < \varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\delta}_П) \\ F(\vec{X}_И, \vec{X}_П), & \text{если } |\vec{\delta}_И| \geq \varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\delta}_И) \vee |\vec{\delta}_П| \geq \varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\delta}_П) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\delta}_И)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\delta}_И$; $\varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\delta}_П)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\delta}_П$; $F(\vec{X}_И, \vec{X}_П)$ – функциональная зависимость комплексирования векторов, измеренных и спрогнозированных ТНП КО при соизмеримых погрешностях измерений и прогноза.

По аналогии запишется правило комбинирования итогового вектора погрешностей $\vec{\delta}_\Sigma$:

$$\vec{\delta}_\Sigma = \begin{cases} \vec{\delta}_И, & \text{если КО сманивировал,} \\ \vec{\delta}_И, & \text{если } |\vec{\delta}_И| < \varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\delta}_И) \\ \vec{\delta}_П, & \text{если } |\vec{\delta}_П| < \varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\delta}_П) \\ G(\vec{\delta}_И, \vec{\delta}_П), & \text{если } |\vec{\delta}_И| \geq \varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\delta}_И) \vee |\vec{\delta}_П| \geq \varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\delta}_П) \end{cases}, \quad (4)$$

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

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. при выявлении отклонений в ТНП КО, свидетельствующих о совершении им орбитального маневра, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП используются данные последних измерений ТНП, содержащие актуальные параметры движения КО, вне

зависимости от их точности (верхняя строчка выражения (4));

2. при наличии неравноточных измерений и данных прогноза ТНП КО, 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 КО, погрешности которых отличаются менее чем на порядок, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП проводится их совместная обработка, то есть комплексирование (нижняя строчка выражения (4)).

Это позволит реализовать описанное решающее правило для комбинирования и принятия решения на использование выбранных на его основе данных:

- для ведения каталога и последующего прогноза ТНП КО – при выявлении маневра КО с выдачей заявки на применение высокоточных средств измерений, под которыми понимаются ОС;
- для исключения «грубых» данных из обработки – при идентификации опорной орбиты (отсутствии орбитального маневра) низкоточными средствами измерения или устаревшими данными прогноза ТНП КО.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Глобальная спутниковая система Starlink [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Starlink>. (Дата обращения: 01.02.2022).
- [2] Статистика Starlink [Электронный ресурс]. – URL: <https://planet4589.org/space/stats/star/starstats.html>. (Дата обращения: 01.02.2022).
- [3] Суханов С.А., Шаргородский В.Д., Шилин В.Д. Система контроля космического пространства. М.: Правда, 2011. 206 с.
- [4] Калюта А.Н. Глобальный мониторинг космической обстановки – важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере // Военная мысль. М., 2017. Вып. № 9. С. 5-11.
- [5] Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор): Сб. науч. тр. М.: Космосинформ, 1995. 322 с.
- [6] Благодырченко 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.