

УДК 621.396

С.Е. Ломоносов

*Центр контроля космического пространства**Национального центра управления и испытания космических средств, Евпатория*

## АНАЛИЗ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ГРУППИРОВКИ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ МАЛОПУНКТНОЙ СИСТЕМЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*Задача сопровождения разведывательных космических аппаратов (РКА) заключается в оценке параметров их движения по измерениям, полученным в дискретные моменты времени от средств контроля космического пространства (ККП) и прогнозирования движения космических объектов с требуемым уровнем точности на заданном временном интервале. В статье проведен анализ оценки качества сопровождения группировок РКА в зависимости от их целевого назначения и возможностей средств ККП по их сопровождению.*

**Ключевые слова:** космические аппараты, измерительное средство, параметры орбит, критерий, качество сопровождения.

### Введение

В настоящее время для определения параметров движения космических объектов (КО) широко используются высокоточные оптико-электронные средства (ОЭС), которые позволяют значительно повысить точность определения параметров орбит на всем диапазоне высот [1]. Однако существующая в Украине малопунктная сеть измерительных средств ККП накладывает ограничения на численный состав каталогов сопровождаемых объектов и качество координатной информации.

В связи с этим возникает задача рационального распределения ресурсов измерительных и вычислительных средств в процессе определения и прогнозирования параметров орбит РКА.

Основными факторами, стимулирующими решение задачи поиска рационального критерия качества сопровождения РКА, является увеличение на околоземных орбитах количества космических объектов военного и двойного назначения с ограниченным объемом координатной информации и ее сомнительной достоверности в общедоступных источниках. При этом в процессе расчёта планов проходов объектами заданных географических районов, выдаче целеуказаний (ЦУ) и отображении трасс пролёта КА возникает ряд вопросов, связанных с определением факта необходимости уточнения начальных условий (НУ) [1 – 3]. Кроме этого, на выполнение целевой задачи РКА и функционирование средств ККП существенно влияют метеорологические и астрономические условия наблюдения, а также физические процессы, протекающие в самой измерительной и бортовой аппаратуре.

Таким образом, представляется целесообразным разработать подход к оценке качества НУ ос-

нованный на анализе ошибок уточнения параметров орбит, целевых задач КА, а также возможностей системы измерительных средств ККП.

**Анализ вопроса.** Проведенный анализ литературы [1 – 3] показал, что при неизменном составе группировки измерительных средств обеспечить сопровождение всего каталога РКА и при этом выполнить требования потребителей по точности и достоверности информации представляется весьма затруднительно. Решение этой задачи основывается на выборе критерия качества орбитальных параметров для каждого отдельного КА в зависимости от характеристик бортовой аппаратуры (БА) КА его принадлежности и условий выполнения целевых задач.

Целью проведенных исследований является увеличение количества сопровождаемых космических аппаратов военного и двойного назначения без ухудшения качества определения параметров их орбит.

Основная задача сопровождения КО – оценка параметров движения по данным измерений, полученным в дискретные моменты времени от измерительных средств и прогнозирования их с требуемым уровнем точности на заданном временном интервале на выбранные географические районы.

При проведении сеансов наблюдений формируются массивы измерений, статистическая обработка которых позволяет получить оценки параметров орбит РКА в каталоге сопровождаемых КО. Эта информация подлежит периодическому уточнению, так как значения параметров орбит КО отличаются от действительных значений этих параметров, вследствие особенностей орбитального движения, погрешностей измерительной аппаратуры, погодных и астрономических условий наблюдения, так назы-

ваемого устаревания НУ. Точность оценки вектора параметров движения КА должна соответствовать заранее заданным требованиям, которые формируются исходя из целевого назначения и решаемых задач космических систем.

Основными источниками координатной информации являются отдельные радиотехнические узлы (ОРТУ) и оптические наблюдательные средства различных министерств и ведомств. Однако существующая сеть измерительных средств и их технические характеристики зачастую не удовлетворяют требованиям по количеству измерений для качественного уточнения начальных условий.

### Решение задачи

Рассмотрим задачу сопровождения космических объектов средствами ККП.

Пусть задача оптимизации задействования средств ККП решается на интервале  $(0, T)$ . Под выбираемым в процессе оптимизации планом измерений понимают некоторую функцию  $\gamma(t)$ ,  $t \in (0, T)$ , удовлетворяющую условию  $\gamma(t) \in \Gamma$ ,  $\Gamma = \{0, 1\}$ .

Посредством  $\gamma(t)$  осуществляется управление процессом измерений. Причём оговаривается, что если  $\gamma(t) = 1$ , то в момент  $t$  проводится сеанс измерений по сопровождаемому объекту, если  $\gamma(t) = 0$  – измерения не проводятся. Значение  $\gamma(t)$  определяется по всем КО в зависимости от требований к качеству сопровождения, устойчивости самого процесса, достоверности и точности координатной информации.

Параметры орбит КО хранятся в виде вектора контролируемых значений, полученных на момент последнего уточнения со своими точностными характеристиками. При решении прикладных задач обычно вводят допущение о нормальности закона распределения ошибок оценок. В этом случае в качестве характеристики точности вектора контролируемых параметров используется корреляционная матрица [4]. Обозначим через  $\underline{Z}^T$  вектор контролируемых параметров (вектор параметров орбиты). Тогда в результате проведения сеансов наблюдений и обработки полученной информации о КА может быть получена оценка вектора  $\bar{Z}^T$ , которая и заносится в каталог вместе с соответствующей ей корреляционной матрицей  $K(\underline{Z}^T)$ . Ошибкой оценки назовем разность между вектором полученной оценки и истинным значением вектора параметров орбиты

$$\Delta \underline{Z}^T = \underline{Z}^T - \bar{Z}^T. \quad (1)$$

Информация о РКА, хранящаяся в каталогах, должна удовлетворять требованиям достоверности и определяется способностью системы ККП выпол-

нять свои функции с заданными показателями [3]. Под достоверностью оценки  $\bar{Z}^T$ , согласно работ [1], будем понимать, что для каждого КО с параметрами  $\underline{Z}^T$  задана доверительная область  $Z$  соответствующего векторного пространства, за пределы которой ошибка  $\Delta \underline{Z}^T$  не выходит с заданной вероятностью

$$H(Z(\alpha)) = P(\Delta \underline{Z}^T \in Z(\alpha)) H(Z(\alpha)), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – характерный размер области  $Z$ , в которой с заданной надежностью находятся ошибки  $\Delta \underline{Z}^T$ , удовлетворяющие условию:

$$\alpha_1 < \alpha_2 \Leftrightarrow Z(\alpha_1) \in Z(\alpha_2). \quad (3)$$

Выражение (3) означает, что с увеличением  $\alpha$  область  $Z(\alpha)$  будет пропорционально расширяться, а с уменьшением – сжиматься.

Таким образом, для каждого КО, хранящегося в каталоге, задаются требования к качеству (точности) информации в виде достоверности  $H$  оценки  $\bar{Z}^T$ , при выполнении которой обеспечивается решение задач сопровождения объектов или удовлетворяет требованиям потребителя информации. Носителем точности оценки, хранящихся в каталоге данных, является корреляционная матрица ошибок оценки, полученная на момент последнего уточнения  $K(\underline{Z})$ .

Один из путей решения поставленных задач – своевременность проведения сеансов измерений оптических средств ККП, что определяется характеристиками БА КА и техническим возможностям оптико-электронного средства по обнаружению объекта [3].

Для математической формулировки задачи оценки качества сопровождения РКА характеристикой точности НУ выступает корреляционная матрица уточнённых НУ  $[K]$ , соответствующая времени последнего уточнения и записи данных в каталог. С целью определения ошибок на момент входа КА в зону обзора ОЭС осуществим прогноз  $[K]$  на момент выдачи ЦУ  $t_{цв}$  и получим прогнозируемую корреляционную матрицу  $[K_p]$ :

$$[K_p] = [D] * [K] * [D]^T, \quad (4)$$

где  $[D]$  – матрица производных;  $[K]$  – корреляционная матрица уточнённых начальных условий методом наименьших квадратов, причем для орбитальных Кеплеровских параметров матрица размером  $8 \times 8$ .

Формирование массивов матрицы производных производится в процессе работы МНК численным методом (методом конечных разностей):

$$[D_{ij}] = \left| \frac{\Delta x_{jп}}{\Delta x_{iМ}} \right|, \quad (5)$$

где  $\Delta x_{jn}$  – конечное приращение прогнозного параметра, полученное численным методом;  $\Delta x_{im}$  – конечное фиксированное приращение уточняемого орбитального параметра (т.н. «пробный шаг»).

Для прогноза корматрицы Кеплеровских параметров матрица [D] имеет размерность  $8 \times 8$ :

$$[D] = \begin{pmatrix} \frac{dt_p}{dt_M} & \frac{dt_p}{d\omega_M} & \dots & \frac{dt_p}{dp_M} \\ \frac{d\Omega_p}{dt_M} & \frac{d\Omega_p}{d\omega_M} & \dots & \frac{d\Omega_p}{dp_M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dp_p}{dt_M} & \frac{dp_p}{d\omega_M} & \dots & \frac{dp_p}{dp_M} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $t$  – время задания орбитального вектора;  $\Omega$  – долгота восходящего узла;  $p$  – падение периода; индекс (п) означает параметр в точке прогноза; индекс (м) означает параметр в точке минимизации.

Область прогнозируемых ошибок формируется на основании диагональных элементов прогнозируемой корреляционной матрицы:

$$\delta R_i = \sqrt{K_{p_{ii}}}, \quad (7)$$

где  $R_i$  –  $i$ -я компонента прогнозного параметра;  $\delta R_i$  – ошибка  $i$ -й компоненты прогнозного параметра;  $K_{p_{ii}}$  –  $i$ -й диагональный элемент корреляционной матрицы.

В соответствии с (3) соотношение области прогнозируемых ошибок ( $\alpha_1$ ) и области широкого строга обзора ОЭС ( $\alpha_2$ ) позволяет сделать вероятностную оценку успешного проведения сеанса измерений по выбранным РКА, а соответственно и распределить приоритеты между объектами, одновременно находящимися в зоне обзора средства.

Кроме того, точность определения параметров орбиты по аналогичному принципу должна обеспечить возможность съема передачи данных бортовой аппаратурой КА.

## Выводы

Таким образом, при разработке критерия качества сопровождения приоритетных КА военного и двойного назначения, точность оценки вектора параметров орбиты РКА определяется характеристиками БА и техническими возможностями измерительного средства по взятию объекта на сопровождение. Дальнейшее развитие метод может получить в организации планировании сеансов обмена информации с представителями группировок РКА при использовании малопунтных технологий управления РКА

## Список литературы

1. Гусев Л.И. Наземная сеть слежения за космическими аппаратами дальнего космоса и высокоапогейными искусственными спутниками Земли / Л.И. Гусев, Е.П. Молотов // Космический бюллетень. – 1995. – Т. 2, № 1. – С. 11-13.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО МАКВИС, 1998. – 828 с.
3. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / Под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевича, А.А. Коростелева. – М.: Сов. радио, 1969. – 504 с.
4. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Изд. 4-е / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 831 с.
5. Богдановский А.Н. Обработка информации о движении космических аппаратов при малопунтной технологии управления / А.Н. Богдановский, М.Б. Козелкова // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2003. – Вип. 4. – С. 206-209.

Поступила в редколлегию 6.02.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления, Киев.

## АНАЛІЗ КРИТЕРІЯ ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ СУПРОВОДЖЕННЯ УГРУППУВАННЯ РОЗВІДУВАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ АППАРАТІВ ПРИ МАЛОПУНКТНІЙ СИСТЕМІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

С.С. Ломоносов

На основі існуючих критеріїв оцінки якості супроводження космічних об'єктів проведено аналіз можливості їх використання для малопунтної системи контролю космічного простору. Розроблено підхід до планування вимірювань оптико-електронних засобів. Зроблено вивод про ефективність використання розглянутого методу в організації балістико-навігаційного забезпечення управління угруппування РКА.

**Ключові слова:** космічні апарати, вимірювальний засіб, параметри орбіт, критерій, якість супроводу.

## THE ANALYSIS OF THE CRITERIA ESTIMATION OF EXACTNESS ACCOMPANIMENT OF GROUPMENT RECONNAISSANCE SPACE VEHICLES AT THE SMALLPOINTED SYSTEM OF MEASURING CONTROLS SPACE

S.E. Lomonosov

On the basis of existent criteria of estimation of quality of accompaniment of space objects the analysis of possibility of their use for the smallpointed checking system of space is conducted. Approach to planning of bringing of optical-electronic measuring facilities is developed. The conclusion about efficiency of the use of the considered method in organization of the ballistic-navigation providing of management by the RSV groupment is done.

**Keywords:** vehicles of spaces, measuring mean, parameters of orbits, criterion, quality of accompaniment.