

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 517.977.1

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ МОНИТОРИНГА
КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

© 2023 г. К. Э. Завгородний^{1,*}, А. Е. Привалов¹, Б. А. Данилюк¹

¹Воздушно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Решена задача оценивания эффективности управления орбитальной группировкой (ОГ) мониторинга космической обстановки (МКО). Выявлен показатель эффективности управления ОГ МКО и обоснован критерий его оценивания. Разработаны аналитическая математическая модель показателя эффективности и алгоритм оценивания эффективности управления ОГ МКО, которые с учетом возможностей высокопроизводительных вычислительных комплексов могут быть использованы в структуре цифрового двойника ОГ МКО для обоснования выбора управляющих воздействий в режиме реального времени.

DOI: 10.56304/S2782375X23020171

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное освоение околоземного космического пространства (ОКП) привело к появлению новых проблем, связанных с техногенной засоренностью, так называемым “космическим мусором”. С ростом количества объектов космического мусора (ОКМ) и увеличением численности работающих космических аппаратов (КА) задачи обнаружения ОКМ, моделирования и прогнозирования траектории их полета и предотвращения столкновения КА с ОКМ становятся в настоящее время как никогда актуальными [1, 2]. Для решения данных задач в Российской Федерации под эгидой госкорпорации “Роскосмос” функционирует автоматизированная система предупреждения опасных ситуаций в ОКП (АСПОС), объединяющая информацию об ОКМ с сети наземных средств мониторинга ОКП различных организаций [3]. Вместе с тем возможности наземных средств мониторинга ограничиваются временем суток, зоной обзора и погодными условиями. Данных недостатков лишена орбитальная группировка (ОГ) мониторинга космической обстановки (МКО), состоящая из КА-измерителей (КАИ), осуществляющих наблюдение и измерение параметров движения объектов в ОКП по их изображениям, полученным с помощью бортовых оптико-электронных комплексов (БОЭК).

Анализ работ в области разработки ОГ МКО [4–6] выявляет следующие существенные особенности: во-первых, достижение необходимых уровней глобальности и непрерывности мониторинга возможно только с применением многоспутниковой ОГ; во-вторых, количество объектов мониторинга измеряется в настоящее время десятками тысяч. В связи с этим высокая размерность задачи управления многоспутниковой ОГ МКО по объектам мониторинга, относящейся к классу NP-сложных задач, не позволяет применять традиционные методы ее решения и требует разработки новых алгоритмов управления, основанных на современных технологиях искусственного интеллекта и имитационного моделирования.

С другой стороны, развитие высокопроизводительных вычислительных комплексов и технологий суперкомпьютерного моделирования в последние десятилетия обусловило возникновение новой концепции управления сложными системами, основанной на применении цифровых двойников (ЦД), сопровождающих систему на всех этапах жизненного цикла [7, 8]. Предложен алгоритм оценивания эффективности управления ОГ МКО, который может быть использован в структуре ЦД ОГ МКО для обоснования выбора того или иного алгоритма управления, а также априорного оценивания эффективности управляющего воздействия в режиме реального времени.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Исходные данные:

1. Множество ОКМ:

$$E = \{e_j\}, \quad j = \overline{1, n},$$

где n – количество ОКМ в каталоге.

2. Множество векторов параметров движения ОКМ:

$$O = \{O_j \mid O_j = (\Omega_j, i_j, \omega_j, a_j, p_j, \vartheta_j)\},$$

где Ω_j – долгота восходящего узла орбиты ОКМ, i_j – наклонение орбиты ОКМ, ω_j – аргумент перигея орбиты ОКМ, a_j – большая полуось орбиты ОКМ, p_j – фокальный параметр орбиты ОКМ, ϑ_j – истинная аномалия ОКМ.

3. Множество КАИ в ОГ МКО:

$$C = \{C_k\}, \quad k = \overline{1, m},$$

где m – количество КАИ в ОГ МКО.

4. Множество векторов параметров движения КАИ:

$$V = \{V_k \mid V_k = (\Omega_k, i_k, \omega_k, a_k, p_k, \vartheta_k)\},$$

где Ω_k – долгота восходящего узла орбиты КАИ, i_k – наклонение орбиты КАИ, ω_k – аргумент перигея орбиты КАИ, a_k – большая полуось орбиты КАИ, p_k – фокальный параметр орбиты КАИ, ϑ_k – истинная аномалия КАИ.

5. δ – среднеквадратичная погрешность измерения угловых координат ОКМ средствами БОЭК.

6. ρ – максимальная погрешность определения координат ОКМ.

7. $t_{\text{треб}}$ – требуемое время обнаружения ОКМ.

Выполнить:

1. Выявить показатель эффективности управления ОГ МКО и обосновать критерий его оценивания.

2. Разработать алгоритм оценивания эффективности ОГ МКО.

Допущения и ограничения:

1. Движение КА и ОКМ является невозмущенным и рассматривается в рамках кеплеровской теории.

2. Под информацией об ОКМ понимается только координатная информация.

ПОКАЗАТЕЛЬ И КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Процесс функционирования ОГ МКО представляет собой целенаправленный процесс, характеризующийся операционными свойствами результативности, ресурсоемкости и оперативности. Целью функционирования ОГ МКО является получение информации об ОКМ, следовательно, в соответствии с принципом А.Н. Колмогорова показателем результативности является вероятность успешного получения информации об ОКМ [9]. Под успешным будем понимать получение информации о координатах ОКМ с требуемой точностью, определяемой параметром ρ . Оперативность функционирования ОГ МКО характеризуется временем, а ресурсоемкость – количеством КА, необходимыми для получения информации об ОКМ. Следовательно, цель функционирования ОГ МКО считается достигнутой, если выполнено условие:

$$\begin{cases} p(\rho) \geq p_{\text{треб}}, \\ t \leq t_{\text{треб}}, \\ r \leq r_{\text{треб}}. \end{cases} \quad (1)$$

Показателем эффективности функционирования ОГ МКО является вероятность случайного события

$$\mathcal{E} = P(p(\rho) \geq p_{\text{треб}} \wedge t \leq t_{\text{треб}} \wedge r \leq r_{\text{треб}}). \quad (2)$$

Показателем эффективности управления в соответствии с [10] является степень использования потенциальных возможностей ресурсов ОГ МКО

$$\mathcal{E}_y = \frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_\Pi}, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_Π – потенциально возможная эффективность функционирования ОГ МКО, \mathcal{E}_p – реализуемая с применением системы управления эффективность функционирования ОГ МКО.

Критерий оптимальности управления ОГ МКО формулируется следующим образом:

$$\mathcal{E}_y \rightarrow \max. \quad (4)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОГ МКО

Управляющее воздействие (программу управления) для получения информации об одном ОКМ можно описать множеством

$$U = \{u_k\}.$$

Здесь u_k – управляющее воздействие на k -й КАИ, представляющее собой вектор

$$u_k = (c_k, t_k, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, e_j), \quad (5)$$

где $c_k \in C$ – соответствующий КАИ, t – момент времени измерений, $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ – углы ориентации оси визирования БОЭК относительно осей АГЭСК, e_j – ОКМ, на который направлена ось визирования БОЭК.

Рассмотрим условия достижения цели функционирования ОГ МКО (1). Параметр $r_{\text{треб}}$ ограничивает количество КАИ, используемое для достижения цели имеющимися в составе ОГ. Поскольку в рамках работы отказы бортовых систем КАИ и неготовность их к выполнению задачи не рассматриваются, получение управляющего воздействия для большего, чем есть в ОГ, количества КАИ полагается невозможным. В связи с этим

$$P(r \leq r_{\text{треб}}) = 1. \quad (6)$$

Частотно-временное обеспечение современных КА осуществляется с высокой точностью с применением средств навигационной системы “ГЛОНАСС” [11]. В связи с этим погрешности измерения времени не оказывают существенного влияния на функционирование ОГ МКО, следовательно,

$$P(t = \max\{t_k \mid t_k \in u_k\} \leq t_{\text{треб}}) = \begin{cases} 1, & t \leq t_{\text{треб}}, \\ 0, & t > t_{\text{треб}}. \end{cases} \quad (7)$$

Основой функционирования ОГ МКО является метод космической триангуляции (рис. 1), который предполагает определение координат ОКМ одновременно с двух КАИ, линейное расстояние между которыми (базис) d известно за счет определения координат КАИ с помощью навигационной системы “ГЛОНАСС”, а углы между базисом и направлениями КАИ и ОКМ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ измеряются бортовой оптико-электронной аппаратурой путем привязки к каталожным звездам, координаты которых известны с большой точностью [12]. По известным значениям базиса и двух углов определяются стороны треугольника, в вершинах которого в момент измерений находятся два КАИ и ОКМ, т.е. определяются дальности между КАИ и ОКМ, что в конечном итоге позволяет определить координаты ОКМ в инерциальной системе координат в момент измерений. Координаты КАИ и ОКМ, формирующих измерительный треугольник, определяются исходя из законов Кеплера:

$$\begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} = K(O_j, t), \quad \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = K(V_k, t), \quad (8)$$

где $K(\cdot)$ – функция расчета параметров невозмущенного движения КАИ и ОКМ в рамках кеплеровской теории движения (методика расчета приведена в [13]). Основные элементы измерительного треугольника рассчитываются на основании управляющего воздействия по методике, приведенной в [12]:

$$\begin{pmatrix} d \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix} = W \left(\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix}, u_k \right), \quad (9)$$

где $W(\cdot)$ – функция расчета параметров измерительного треугольника.

Для упрощения расчетов перейдем из АГЭСК в измерительную систему координат (ИСК) $O' x' y' z'$ (рис. 1). Начало координат ИСК O' совпадает с центром масс одного КАИ, ось $O' x'$ направлена на другой КАИ, ось $O' y'$ перпендикулярна оси $O' x'$ и принадлежит плоскости измерительного треугольника, ось $O' z'$ дополняет систему до правой. Переход от АГЭСК в ИСК осуществляется по формуле

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} x - x_k \\ y - y_k \\ z - z_k \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где Q – матрица направляющих косинусов, рассчитываемая по координатам вершин измерительного треугольника (8).

Погрешность определения координат в плоскости измерительного треугольника $O' x' y'$ формирует неправильный (в общем случае) четырехугольник $ABCD$. Погрешность определения координаты z' определяется отрезками $OE = OF$. С использованием теоремы синусов имеем

$$K_1 O = d \frac{\sin \varepsilon_2}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \quad K_2 O = d \frac{\sin \varepsilon_1}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)},$$

следовательно,

$$\begin{aligned} OE = \sigma_z &= \min(K_1 O \cdot \tan \delta, K_2 O \cdot \tan \delta) = \\ &= \min \left(d \frac{\sin \varepsilon_2 \tan \delta}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, d \frac{\sin \varepsilon_1 \tan \delta}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Координаты вершин четырехугольника и ОКМ (точка O):

$$\begin{aligned} (x'_O, y'_O) &= \left(d \frac{\sin \varepsilon_2 \cos \varepsilon_1}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, d \frac{\sin \varepsilon_2 \sin \varepsilon_1}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right), \\ (x'_A, y'_A) &= \left(d \frac{\sin(\varepsilon_2 - \delta) \cos(\varepsilon_1 + \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \right. \\ &\quad \left. d \frac{\sin(\varepsilon_2 - \delta) \sin(\varepsilon_1 + \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right), \end{aligned}$$

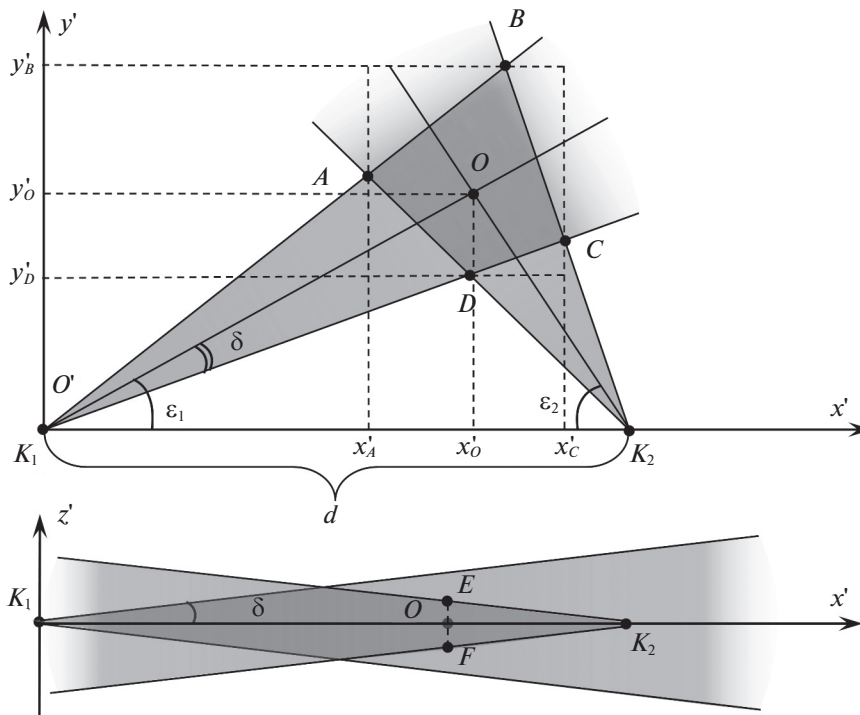


Рис. 1. К расчету погрешностей вычисления координат ОКМ.

$$\begin{aligned} (x'_B, y'_B) &= \left(d \frac{\sin(\varepsilon_2 + \delta) \cos(\varepsilon_1 + \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 2\delta)}, \right. \\ &\quad \left. d \frac{\sin(\varepsilon_2 + \delta) \sin(\varepsilon_1 + \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 2\delta)} \right), \\ (x'_C, y'_C) &= \left(d \frac{\sin(\varepsilon_2 + \delta) \cos(\varepsilon_1 - \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \right. \\ &\quad \left. d \frac{\sin(\varepsilon_2 + \delta) \sin(\varepsilon_1 - \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right), \\ (x'_D, y'_D) &= \left(d \frac{\sin(\varepsilon_2 - \delta) \cos(\varepsilon_1 - \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\delta)}, \right. \\ &\quad \left. d \frac{\sin(\varepsilon_2 - \delta) \sin(\varepsilon_1 - \delta)}{\sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\delta)} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Погрешность определения положения ОКМ ограничивается неправильным многогранником ABCDEF, при этом условные распределения вероятностей по координатам x' и y' являются несимметричными. Введем альтернативное нормальное распределение ошибки по координатам x' и y' с математическим ожиданием в точке O и среднеквадратическим отклонением, равным большему из отклонений соответствующей координаты от точки O . Тогда ввиду того, что СКО не-

симметричного распределения меньше, чем альтернативного, имеет место неравенство

$$P(\Delta x' \leq \rho) \geq P_T(\Delta x' \leq \rho),$$

где $P(\Delta x' \leq \rho)$ – вероятность того, что ошибка по оси x' не превысит ρ , рассчитанная по несимметричному распределению, $P_T(\Delta x' \leq \rho)$ – по альтернативному распределению. В связи с тем, что ошибки по осям $x' y' z'$ в общем случае зависимые, имеют место неравенства

$$\begin{aligned} P(\rho) &\geq P(\Delta x' \leq \rho) \cdot P(\Delta y' \leq \rho) \cdot P(\Delta z' \leq \rho) \geq \\ &\geq P_T(\Delta x' \leq \rho) \cdot P_T(\Delta y' \leq \rho) \cdot P_T(\Delta z' \leq \rho) = P'(\rho). \end{aligned}$$

Следовательно, критерий $P'(\rho) \leq p_{\text{треб}}$ является более жестким, а оценка эффективности применения ОГ МКО имеет методическую погрешность, направленную в сторону занижения результата. Вместе с тем выбор управляющего воздействия, основанный на более жестких требованиях к эффективности, полагается обоснованным.

Исходя из соотношений (12) среднеквадратические погрешности оценивания координат определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_{x'} = \max(|x'_A - x'_O|, |x'_C - x'_O|); \\ \sigma_{y'} = \max(|y'_D - y'_O|, |y'_B - y'_O|). \end{cases} \quad (13)$$

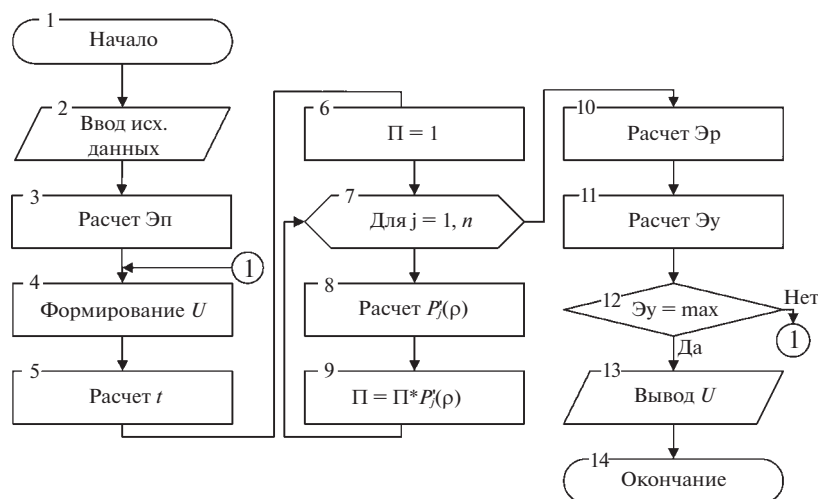


Рис. 2. Алгоритм оценивания эффективности управления ОГ МКО.

С учетом соотношений (11) и (13) и принятом допущении о нормальном законе распределения и независимости ошибок результативность наблюдения одного ОКМ

$$P'(\rho) = 8 \cdot \Phi\left(\frac{\rho}{\sigma_{x'}}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\rho}{\sigma_{y'}}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\rho}{\sigma_{z'}}\right), \quad (14)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа. Результативность наблюдения множества ОКМ

$$P'(\rho) = \prod_{j=1}^n P'_j(\rho). \quad (15)$$

Следовательно, с учетом соотношений (6), (7) и (15)

$$\mathcal{E} = P(t \leq t_{\text{треб}}) \cdot P'(\rho). \quad (16)$$

Для расчета эффективности управления определим потенциально возможную эффективность \mathcal{E}_Π эффективность (16), вычисленную для идеальных условий мониторинга:

$$\begin{cases} P(t \leq t_{\text{треб}}) = 1 \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 45^\circ \\ d = \min \end{cases} \quad (17)$$

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКОЙ

Алгоритм оценивания эффективности управления ОГ МКО состоит из следующих этапов (рис. 2):

1. Ввод исходных данных в соответствии с постановкой задачи (блоки 1–2).

2. Расчет потенциальной эффективности \mathcal{E}_Π по формуле (16) с учетом условий (17) (блок 3).

3. Формирование управляющего воздействия U (блок 4).

5. Расчет оперативности выполнения программы управления t по формуле (7) (блок 5).

4. Расчет результативности функционирования ОГ МКО (блоки 6–9). Для этого используется цикл (блок 7), в котором для каждого ОКМ результативность измерения e_j вычисляется по формулам (8–14). Итоговая результативность (15) вычисляется в блоке 9.

6. Расчет эффективности функционирования ОГ МКО \mathcal{E}_p в соответствии с программой функционирования U по формуле (16) (блок 10).

7. Расчет эффективности управления \mathcal{E}_y ОГ МКО (блок 11).

8. Проверка соответствия \mathcal{E}_y критерию (4) (блок 12). В случае, если критерий выполняется, осуществляется вывод управляющего воздействия (блок 13) и окончание алгоритма (блок 14). В случае несоответствия показателя эффективности \mathcal{E}_y критерию (4) формируется новое управляющее воздействие (блок 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Орбитальная группировка МКО как объект управления представляет собой сложную территориально распределенную систему с динамически изменяющейся структурой. Для решения задач управления подобными системами могут быть использованы различные методы, к числу которых относятся как классические методы исследования операций, так и новые, основанные на технологиях искусственного интеллекта, ней-

ронных сетей и многоагентных технологиях. Предложенный алгоритм оценивания эффективности управления ОГ МКО предназначен для обоснования решений по выбору метода управления, калибровки параметров алгоритмов управления и оперативного оценивания эффективности программы управления. Алгоритм основан на аналитических расчетах, что существенно повышает его быстродействие по сравнению с имитационными моделями. Данная особенность в совокупности с возможностями современных высокопроизводительных вычислительных комплексов и суперкомпьютеров позволяет использовать его в структуре ЦД ОГ МКО для анализа эффективности управляющих воздействий в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калюта А.Н.* // Военная мысль. 2017. № 9. С. 5.
2. *Павлова Е.А., Стрельцов А.И., Еленин Л.В. и др.* // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 23. С. 22. <https://doi.org/10.20948/prepr-2020-23>
3. *Макаров Ю., Симонов М., Яковлев М., Олейников И.* // Воздушно-космическая сфера. 2016. Т. 86. № 1. С. 18.
4. *Фадин И.А., Янов С.В.* // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 248.
5. *Семинихин В.К., Кириченко Д.В., Рыжих А.А., Луттов И.О.* // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. № 646. С. 112.
6. *Клименко Н.Н., Назаров А.Е.* // Радиопромышленность. 2016. № 1. С. 102.
7. *Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С.* // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 3. С. 68. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78>
8. ГОСТ Р 57700.37-2021. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», СПбПУ. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.
9. *Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш., Зубачев А.М.* Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 244 с.
10. *Соловьев И.В., Геков В.В., Доценко С.М. и др.* Современные проблемы управления силами ВМФ: Теория и практика. Состояние и перспективы / Под ред. Куроедова В.И. СПб.: Политехника, 2006. 432 с.
11. *Тюляков А.Е., Белов Л.Я., Паршин П.Н.* // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2018. № 44. С. 126.
12. *Половников В.И., Скунтицкий В.М.* Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. 175 с.
13. *Власов С.А., Кульвиц А.В., Скрипников А.Н.* Теория полета космических аппаратов: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. 412 с.