

Научная статья
УДК 519.87
DOI: [10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВЫМИ ОРБИТАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

Евгений Петрович Минаков¹, Александр Евгеньевич Привалов²,
Павел Юрьевич Бугайченко³✉

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

vka@mil.ru✉

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной задачи оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами. Введены определения орбитальной системы (ОС), многоспутниковой ОС (МС), системы управления МС (СУ МС). На основании анализа структуры типовой СУ МС выявлен показатель эффективности управления МС и разработана его математическая модель. Разработана марковская модель оценивания эффективности управления многоспутниковой системой (МС) на основе анализа агрегированных характеристик системы управления МС (СУ МС), характеризующих ее в целом и не зависящих от текущего состояния СУ МС и входного воздействия. Представлены результаты оценивания эффективности управления на примере перспективной МС

дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе космических аппаратов «Беркут» при различных ограничениях на множество управляемых параметров. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых методов, алгоритмов и методик управления МС для их отработки, верификации, калибровки, оптимизации, оценивания влияния их показателей качества на эффективность управления МС.

Ключевые слова: многоспутниковая орбитальная система, система управления, марковская модель, эффективность управления

Для цитирования: Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)

Original article

A MODEL FOR EVALUATING THE CONTROL EFFICIENCY OF MULTI-SATELLITE ORBITAL SYSTEMS

Evgenii P. Minakov¹, Aleksandr E. Privalov², Pavel Yu. Bugaichenko³✉

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

vka@mil.ru✉

Abstract. The article is devoted to solving the important problem of evaluating the control efficiency of multi-satellite orbital systems. The article introduces definitions of an orbital system (OS), a multi-satellite OS (MS), and an control system of OS. The relevance of the problem of evaluating the control efficiency of MS by stochastic modeling is substantiated.

Based on the principle of A.N.Kolmogorov, the MS control efficiency indicator has been identified and its mathematical model has been developed. The mathematical formulation of the problem of evaluating the control efficiency of MS, which consists in determining the efficiency coefficient of management, expressing the degree of achieving optimal efficiency at the current values of the controlled parameters, is realised. A model for evaluating the efficiency of MS management in the form of a continuous Markov chain has been developed. With the application of the developed model, the evaluation of the control efficiency of a perspective MS of remote sensing the Earth based on the Berkut spacecrafts, which is being developed within the framework of the Sphere program, has been carried out. The dependences of the control efficiency on the quality indicators of the control system for solving various remote sensing tasks has been obtained. The developed model can be used at the stage of development of methods, techniques and algorithms of MS control for their elaboration, verification, calibration, optimization, evaluation of the impact of their quality indicators on the control efficiency of MS, and also for justification of requirements for them and confirmation of compliance with the declared requirements.

Keywords: multi-satellite orbital systems, control system, Markov model, control efficiency

For citation: Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaichenko P.Yu. A model for evaluating the control efficiency of multi-satellite orbital systems. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI:

[10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)

Введение

Характерными чертами современного этапа освоения околоземного космического пространства (ОКП) являются развитие технологий серийного производства космических аппаратов (КА), уменьшение их массогабаритных характеристик, и, как следствие, стоимости производства и выведения на орбиту. Эти особенности в совокупности с развитием технологий высокоскоростной межспутниковой связи приводят к созданию орбитальных группировок (ОГ) различного целевого назначения, состоящих из большого количества взаимодействующих между собой КА. Кроме того, прослеживается тенденция к переходу от управления отдельными КА к управлению ОГ в целом [1].

В соответствии с ГОСТ Р 53802-2010 [2], под орбитальной группировкой КА понимается совокупность КА, расположенных на орбитах в соответствии с баллистической структурой и объединенных общностью решаемых задач в составе космической системы или комплекса. Исходя из данного определения, ОГ является элементом космической системы или комплекса. Вместе с тем, из вышеперечисленных особенностей следует, что современные и перспективные ОГ представляют собой целеустремленную техническую систему [3]. В связи с этим, в рамках проводимых исследований полагается целесообразным введение термина *орбитальная система (ОС)*, под которой понимается совокупность КА и линий межспутниковой связи, предназначенная для решения целевых задач в ОКП. *Система управления орбитальной системы* представляет собой совокупность взаимосвязанных технических средств бортовых комплексов управления

космических аппаратов с программным обеспечением, предназначенных для управления ОС.

Внешнее проектирование современных ОС осуществляется с учетом достаточно высоких требований к показателям глобальности, непрерывности, оперативности и массовости оказания услуг [4]. Для некоторых ОС (особенно низкоорбитальных) статистическую устойчивость этих показателей во времени возможно обеспечить только большим количеством КА. Такие ОС называются *многоспутниковыми орбитальными системами* (МС). Подавляющее большинство исследований по оцениванию эффективности применения МС базируется на методах теории полетов КА и не в полной мере учитывает характеристики системы управления МС (СУ МС) [5,6]. При этом исследования в области управления МС, как правило, направлены на оценивание эффективности функционирования наземного комплекса управления [7,8]. Как следствие этого оценивание эффективности управления МС путем стохастического моделирования и анализа характеристик их управления, обеспечивающее принятие решений на различных этапах жизненного цикла существующих и перспективных СУ МС является актуальной задачей.

В статье предложена марковская модель оценивания эффективности управления МС на основе анализа агрегированных характеристик СУ МС, характеризующих ее в целом и не зависящих от текущего состояния СУ МС и входного воздействия. Новизна модели заключается в использовании при ее построении характеристик всех функций управления МС, что позволяет применять

ее для обоснования принятия решений на различных стадиях жизненного цикла перспективных автоматических СУ МС.

Анализ процесса функционирования систем управления многоспутниковых орбитальных систем

Для выявления показателя эффективности (ПЭ) управления МС необходимо использовать принцип А.Н. Колмогорова, который состоит в установлении строгого соответствия между ним и целью управления МС [5]. Для этого типовая СУ МС может быть представлена как совокупность объектов: 1 – объект управления – МС; 2 – система управления МС; T – множество моментов времени; X – множество входных воздействий; Y – множество выходных воздействий – результат функционирования МС; Z – множество состояний МС, которое на верхнем уровне абстрагирования характеризуется местоположением КА, ориентацией осей визирования бортовых оптико-электронных комплексов, режимами работы бортовой аппаратуры; U – множество управляющих воздействий – множество команд, изменяющих состояние МС; G – множество заявок на выполнение целевых задач, R – множество решений об отработке заявок, $\varphi, \psi, \xi, \vartheta$ – функции переходов, выходов, планирования и контроля соответственно (рис.1).

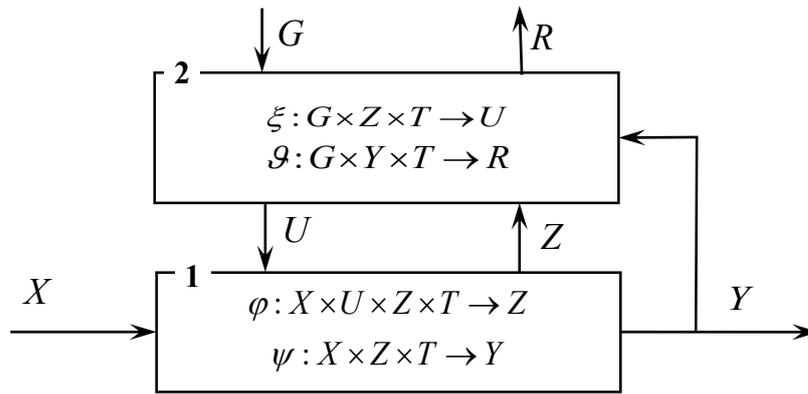


Рис. 1. Структура типовой СУ МС

Функционирование МС с целью выполнения заявки $g \in G$ (т.е. получения за время $t \leq \tau_g$ требуемого выхода y_g при условии, что на вход поступает входной сигнал x_g) называется *операцией*. В качестве критерия ее выполнения может выступать критерий пригодности [5]:

$$y = \psi(x_g, z, t) = y_g \mid t \leq \tau_g, \quad (1)$$

Здесь следует отметить, что функция выходов МС не зависит от управляющего воздействия, которое направлено только на изменение состояния объекта управления. Следовательно, реализация управляющего воздействия осуществляется с целью перехода МС в одно из целевых состояний множества $Z_g \subset Z$, при которых выполняется операция (т.е. справедливо равенство (1)). В формализованном виде критерием реализации управляющего воздействия при выполнении заявки является правило:

$$z \in Z_g = \left\{ z_g = \varphi(x_g, u, z, t) \mid y = y_g \wedge t \leq \tau_g \right\}, \quad (2)$$

Так как МС в ходе функционирования должна переводиться из одного состояния в другое при помощи управляющих воздействий $U_g \subset U$, то определение

такого воздействия, которое переводит систему в одно из целевых состояний $z \in Z_g$ должно удовлетворять критерию:

$$u \in U_g = \left\{ u_g = \xi(g, z, t) \mid z \in Z_g \wedge t \leq \tau_g \right\}. \quad (3)$$

Задача контроля заключается в оценивании качества полученного результата функционирования и принятия решения выполнении заявки. Следовательно, множество решений можно представить в виде $R = \{r_g^+, r_g^-\}$, где r_g^+ – решение о выполнении заявки, r_g^- – решение о невыполнении заявки.

Тогда выполнение задачи контроля определяется критерием

$$r = \vartheta(g, y, t) = \begin{cases} r_g^+ & | y = y_g \wedge t \leq \tau_g \\ r_g^- & | y \neq y_g \wedge t \leq \tau_g \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, процесс функционирования СУ МС заключается в выполнении функций планирования, управления и контроля. Конечным желаемым результатом процесса функционирования СУ МС – *целью функционирования* – является обеспечение желаемого состояния выходов МС в результате управления ею. Критерием достижения цели функционирования является принятие правильного решения о выполнении заявки

$$r = r_g^+ \mid y = y_g \wedge t \leq \tau_g \quad (5)$$

В связи с тем, что на процесс функционирования СУ МС воздействует множество внутренних и внешних случайных факторов различной природы. Следовательно, наиболее представительным показателем эффективности

функционирования СУ МС выступает вероятность достижения цели (5) процесса функционирования [4]

$$\mathcal{E} = P\left(r = r_g^+ \mid y = y_g \wedge t \leq \tau_g\right) \quad (6)$$

Исходя из проведенного анализа, эффективность процесса функционирования СУ МС зависит от вероятностных характеристик функций φ , ψ , ξ , ϑ , а также от длительности выполнения этих функций, что позволяет дать стохастическую трактовку задаче оценивания эффективности управления МС, что дает возможность осуществить математическую постановку задачи.

Постановка задачи оценивания эффективности управления многоспутниковой системы

Выше было отмечено, что характеристики процесса функционирования СУ МС обладают устойчивостью во времени, т.е. зависят не от текущего момента времени, а только от параметров самой МС. Исходя из анализа процесса функционирования СУ МС можно выделить следующие его характеристики:

$$W = \left\{ \tau_g, \tau_\xi, \tau_\varphi, \tau_u, K, \tau_\psi, \tau_\vartheta, P_\xi, P_\varphi, P_\psi, P_\alpha, P_\beta \right\}.$$

Элементами множества W являются:

1. τ_g – требуемое время выполнения заявки.
2. τ_ξ – среднее время выполнения функции планирования.

3. τ_φ – среднее время перевода МС из произвольного состояния $z_1 \in Z$ в произвольное состояние $z_2 \in Z$.

4. τ_u – среднее суммарное время обработки предшествующих заявок.

5. κ – коэффициент напряженности циклограммы функционирования МС, представляющий собой отношение суммарного времени выполнения операций, входящих в циклограмму, к ее общей длительности. Эта характеристика определяет относительную длительность нецелевого функционирования бортового оборудования (к ним относятся «простои», зарядка аккумуляторных батарей и т.д.), и отражает качество циклограммы.

4. τ_ψ – среднее время выполнения целевой задачи МС.

5. τ_g – среднее время выполнения функции контроля.

6. p_ξ – вероятность успешного выполнения функции планирования $P(u \in U_g)$, характеризующая качество методического и программно-алгоритмического обеспечения СУ МС.

7. p_φ – вероятность успешной реализации управления $P(z \in Z_g)$, характеризующая способность МС перейти в плановое состояние z под действием управления u .

8. p_ψ – вероятность выполнения целевой задачи МС $P(y = y_g)$, характеризующая приспособленность МС к выполнению целевых задач при нахождении её в одном из целевых состояний $z \in Z_g$.

9. p_α – вероятность ошибки первого рода $P(r = r_g^- | y = y_g)$.

10. p_β – вероятность ошибки второго рода $P(r = r_g^+ | y \neq y_g)$.

Каждый из этих параметров зависит от баллистической, технической, технологической структуры МС, а также от структуры вычислительных средств и программно-математического обеспечения, на изменение которых направлено управление МС.

Управляемыми параметрами называется множество $W_y \subset W$ параметров, которые зависят от управляющего воздействия. Состав этих параметров может варьироваться в зависимости от возможностей СУ МС (например, возможность изменения баллистической структуры, выбора последовательности операций, выбора того или иного алгоритма управления или контроля и т.д.). Тогда множество W может быть представлено в виде $W = \langle W_y, W_{\bar{y}} | W_{\bar{y}} = W \setminus W_y \rangle$.

Потенциальной эффективностью функционирования СУ ОС \mathcal{E}_Π является эффективность (6), достигаемая при некоторых оптимальных значениях управляемых параметров W_y^{OPT} , под которыми понимаются значения, обеспечивающие при текущих значениях неуправляемых параметров оптимальную эффективность

$$W_y^{OPT} = \arg \max_{W_y} \mathcal{E}(W_y, W_{\bar{y}}) \quad (7)$$

Задача оценивания эффективности управления МС заключается в определении коэффициента эффективности управления k_y , выражающего степень достижения оптимальной эффективности при текущих значениях управляемых параметров

$$k_v = \frac{\partial}{\partial \pi} = \frac{\partial(W_v, W_{\bar{v}})}{\partial(W_v^{OPT}, W_{\bar{v}})} \quad (8)$$

Ввиду массовости происходящих процессов и устойчивости характеристик во времени принято допущение о том, что поток событий изменения состояний СУ МС стационарный пуассоновский.

Модель оценивания эффективности управления многоспутниковой орбитальной системой

Процесс функционирования СУ МС представляет собой случайный процесс, в котором можно выделить отдельные дискретные состояния, соответствующие началу и окончанию выполнения функций ϕ , ψ , ξ , ϑ . При этом, длительность выполнения отдельных функций также является случайным числом, распределенным по экспоненциальному закону. Динамика таких систем описывается непрерывно-стохастическими моделями [9,10,11].

Процесс функционирования МС при обработке заявки представляет собой последовательность событий изменения дискретных состояний в случайные моменты времени. МС может находиться в одном из семи состояний (рис. 2): S_1 – заявка g поступила в МС; S_2 – выработано управляющее воздействие $u_g \in U$; S_3 – МС переведена в состояние $z_g \in Z$; S_4 – заявка g отработана; S_5 – заявка g не отработана; S_6 – цель функционирования СУ МС достигнута; S_7 – цель функционирования СУ МС не достигнута. Описание переходов между состояниями представлено в

таблице 1. Поскольку процесс функционирования СУ МС рассматривается как марковский, в таблице символ t применяется для обозначения времени, прошедшего с момента перехода МС в исходное состояние.

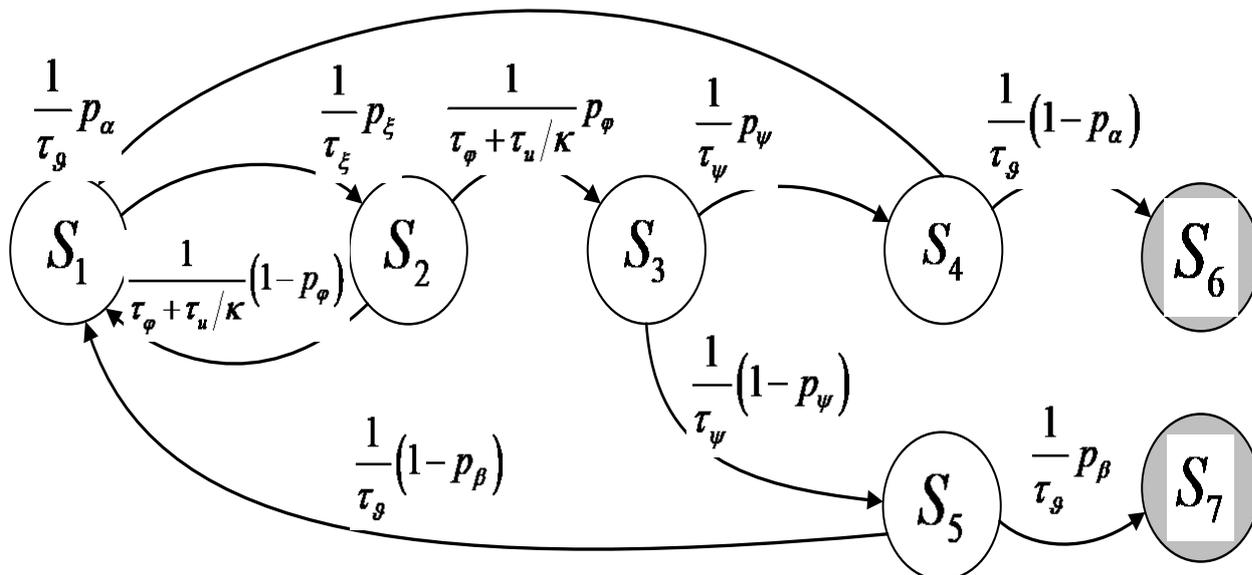


Рис. 2. Граф состояний СУ МС при обработке заявки

Таблица 1

Описание переходов между состояниями

Переход	Интенсивность перехода	Условие перехода
$S_1 - S_2$	$\frac{1}{\tau_\xi} p_\xi$	Отыскание управляющего воздействия $u \in U_g$ функцией планирования ξ за время τ_ξ
$S_2 - S_3$	$\frac{1}{\tau_\phi + \tau_u/k} p_\phi$	Перевод МС в целевое состояние $z \in Z_g$ функцией переходов ϕ за время $\tau_\phi + \tau_u/k \leq t$
$S_2 - S_1$	$\frac{1}{\tau_\phi + \tau_u/k} (1 - p_\phi)$	Перевод МС функцией переходов ϕ в состояние $z \notin Z_g$, отличное от целевого за время $\tau_\phi + \tau_u/k \leq t$
$S_3 - S_4$	$\frac{1}{\tau_\psi} p_\psi$	Получение функцией выходов ψ требуемого результата выполнения целевой задачи $y = y_g$ за время τ_ψ
$S_3 - S_5$	$\frac{1}{\tau_\psi} (1 - p_\psi)$	Получение функцией выходов ψ результата выполнения целевой задачи $y \neq y_g$, отличного от требуемого, за время τ_ψ

Переход	Интенсивность перехода	Условие перехода
$S_4 - S_6$	$\frac{1}{\tau_g}(1 - p_\alpha)$	Принятие функцией контроля σ правильного решения о выполнении целевой задачи $r = r_g^+ y = y_g$, за время τ_σ
$S_4 - S_1$	$\frac{1}{\tau_g} p_\alpha$	Принятие функцией контроля σ ошибочного решения о невыполнении целевой задачи $r = r_g^- y = y_g$, за время τ_σ
$S_5 - S_7$	$\frac{1}{\tau_g} p_\beta$	Принятие функцией контроля σ ошибочного решения о выполнении целевой задачи $r = r_g^+ y \neq y_g$, за время τ_σ
$S_5 - S_1$	$\frac{1}{\tau_g}(1 - p_\beta)$	Принятие функцией контроля σ правильного решения о невыполнении целевой задачи $r = r_g^- y \neq y_g$, за время τ_σ

Динамика изменения вероятностей состояний МС определяется решением системы дифференциальных уравнений (8), составленных по графу на рис.2 по правилу А.Н. Колмогорова [12]:

$$\begin{cases}
 \dot{i}_1 = \frac{1}{\tau_\varphi + \tau_u/\kappa} p_2(1 - p_\varphi) + \frac{1}{\tau_g} p_4 p_\alpha + \frac{1}{\tau_g} p_5(1 - p_\beta) - \frac{1}{\tau_\xi} p_1 p_\xi \\
 \dot{i}_2 = \frac{1}{\tau_\xi} p_1 - p_2 \left(\frac{1}{\tau_\varphi + \tau_u/\kappa} (1 - p_\varphi) + \frac{1}{\tau_\varphi + \tau_u/\kappa} p_\varphi \right) \\
 \dot{i}_3 = \frac{1}{\tau_\varphi + \tau_u/\kappa} p_\varphi p_2 - p_3 \left(\frac{1}{\tau_\psi} (1 - p_\psi) + \frac{1}{\tau_\psi} p_\psi \right) \\
 \dot{i}_4 = \frac{1}{\tau_\psi} p_3 - p_4 \left(\frac{1}{\tau_g} (1 - p_\alpha) + \frac{1}{\tau_g} p_\alpha \right) \\
 \dot{i}_5 = \frac{1}{\tau_\psi} (1 - p_\psi) p_3 - p_5 \left(\frac{1}{\tau_g} (1 - p_\beta) + \frac{1}{\tau_g} p_\beta \right) \\
 \dot{i}_6 = \frac{1}{\tau_g} (1 - p_\alpha) p_4 \\
 \dot{i}_7 = \frac{1}{\tau_g} p_\beta
 \end{cases} \quad (8)$$

Исходным является состояние S_1 , в котором находится МС при поступлении заявки. Цель процесса функционирования СУ МС заключается в переходе МС в

невозвратное состояние S_6 за время τ_σ . Следовательно, коэффициент управления определяется выражением

$$k_V = \frac{p_6(W_Y, W_{\bar{Y}}, t)}{p_6(W_Y^{опт}, W_{\bar{Y}}, t)} \Big|_{t = \tau_\sigma} \quad (9)$$

Вероятность p_6 определяется путем решения системы (8) при заданных значениях $W_Y, W_{\bar{Y}}$ для времени $t = \tau_\sigma$. Для решения системы могут быть использованы известные методы численного интегрирования или специализированные программные комплексы.

$$\mathcal{E}_\phi = p_6(W, t | t \rightarrow \infty).$$

Результаты моделирования

Рассмотрим применение разработанной модели на примере МС дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе КА «Беркут», разрабатываемой в рамках программы «Сфера» [13]. Определение множеств модели представлено в таблице 2.

Таблица 2

Описание множеств модели МС ДЗЗ на базе КА «Беркут»

Множество		Элемент	
Обозн.	Определение	Обозн.	Возможные характеристики элемента
X	Множество объектов зондирования	x	Координаты объекта
			Линейный размер...
Y	Множество блоков информации об объекте (фотоснимков, радиолокационных изображений...)	y	Время получения изображения
			Координаты привязки изображения...
	Множество состояний МС		Координаты КА

Множество		Элемент	
Обозн.	Определение	Обозн.	Возможные характеристики элемента
Z		z	Углы ориентации целевой аппаратуры
			Режимы работы бортовых систем
			Техническое состояние бортовых систем
G	Множество заявок на проведение дистанционного зондирования	τ_g	Время, за которое должна быть выполнена заявка
		x_g	Объект зондирования, информацию о котором требуется получить
		y_g	Информация, которую необходимо получить об объекте
U	Множество управляющих воздействий	u	План (циклограмма) операций по изменению состояния МС

Среднее требуемое время выполнения заявок τ_g определяется исходя из требований к получению данных ДЗЗ: для мониторинга районов возникновения чрезвычайных ситуаций: 0.5 ч. [14,15], для мониторинга последствий нештатных ситуаций: 3 ч. [14], для мониторинга морских разливов нефти: 24 ч. [16], для мониторинга сельскохозяйственных культур: 72 ч. [14].

Среднее время выработки управляющего воздействия τ_ξ включает в себя время ожидания, время планирования выполнения заявки и время передачи плана на борт КА. Существующая технология планирования применения космических систем ДЗЗ обеспечивает достаточно низкую оперативность (до нескольких суток). Поэтому принимается одна из перспективных автоматических технологий [17,18], обеспечивающих ожидаемую оперативность решения задачи управления $\tau_\xi \approx 0.1$ ч.

Среднее время перевода МС τ_φ включает в себя время достижения района зондирования и время перестроения МС в требуемое угловое положение. Т.к. в составе ОС планируется включить более 200 КА [13], обеспечивается практически

непрерывный обзор земной поверхности, время ограничивается временем углового маневра для малых КА $\tau_\phi = 0.01$ ч. [19].

Среднее суммарное время обработки предшествующих заявок напрямую характеризует интенсивность входного потока. В ходе моделирования исследуются несколько значений времени ожидания: $\tau_u = 0.1, 0.5, 1, 10$ ч.

Среднее время выполнения целевой задачи МС τ_ψ включает время съемки и время передачи результатов потребителю. С учетом развития средств космической связи и ретрансляции принято допущение о наличии непрерывного канала связи КА с потребителем. Тогда при пропускной способности канала 100 Мбит/с и средним размером кадра 5 Гб $\tau_\psi \approx 0.11$ ч.

Среднее время контроля выполнения заявки в настоящее время определяется оперативностью функционирования ЕТРИС ДЗЗ одним из принципов построения которой является полная автоматизация технологических процессов, участвующих в обработке информации [20]. В связи с этим, определим время контроля сопоставимым с временем обработки изображений с применением автоматизированных систем $\tau_g \approx 0.1$ ч.

Вероятностные характеристики зависят от множества случайных факторов, их оценивание требует применения отдельных моделей. В рамках статьи приняты гипотетические значения вероятностей $p_\xi = p_\phi = p_\psi = 0.95$, $p_\alpha = p_\beta = 0.05$.

Динамика изменения вероятностей состояний МС ДЗЗ (рис. 3) получена путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (8) с

использованием библиотеки *odeint* пакета *scipy.integrate*. Вычисления проводились в среде научных исследований *Spyder* на языке программирования *Python 3.8*. На графике отмечено значение эффективности функционирования СУ МС для различных значений τ_g .

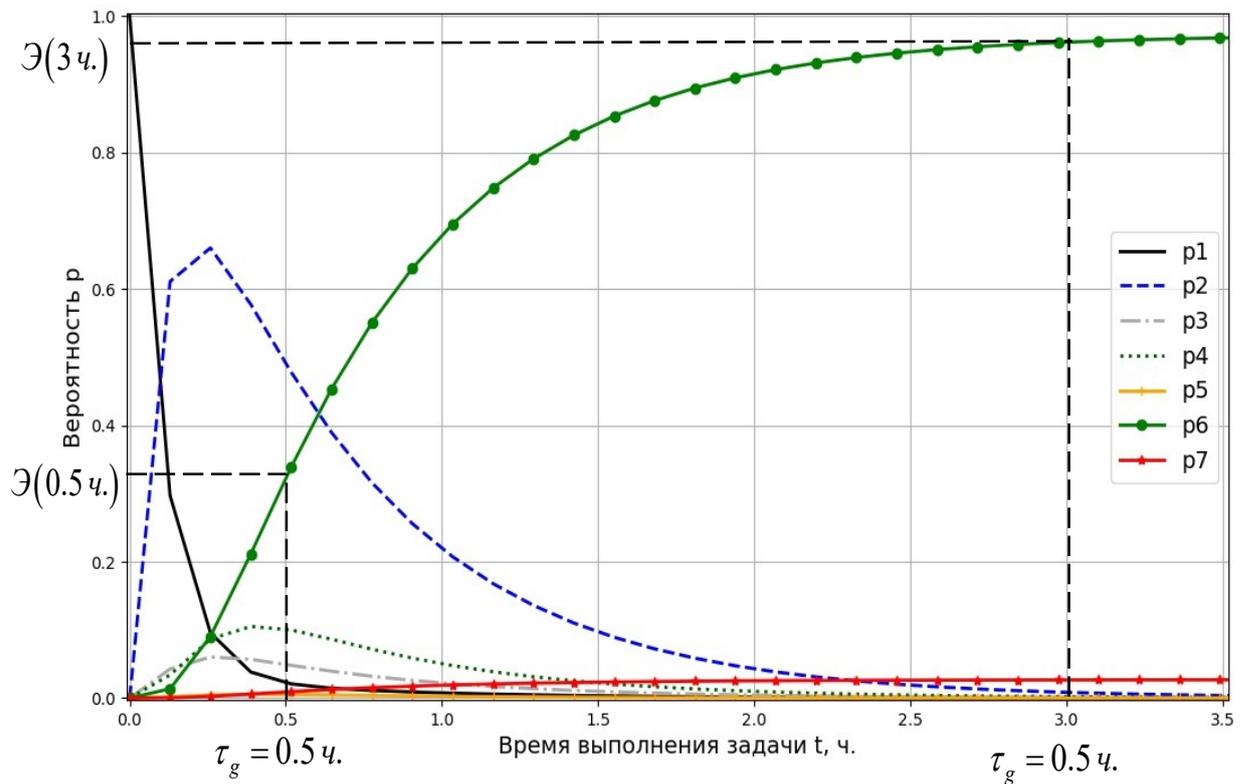


Рис. 3. Динамика изменения вероятностей состояний МС

Пусть множество управляемых параметров ограничено коэффициентом напряженности ($W_y = \kappa$), который характеризует качество планирования применения МС.

Оптимальным значением коэффициента напряженности, при котором все заявки обрабатываются друг за другом без перерывов, является $\kappa = 1$. Графики зависимости эффективности управления k_y , рассчитанной по формуле (9), от параметра κ для различных значений τ_g и τ_u представлены на рис. 4. В скобках для

каждого графика представлено значение потенциальной эффективности функционирования МС.

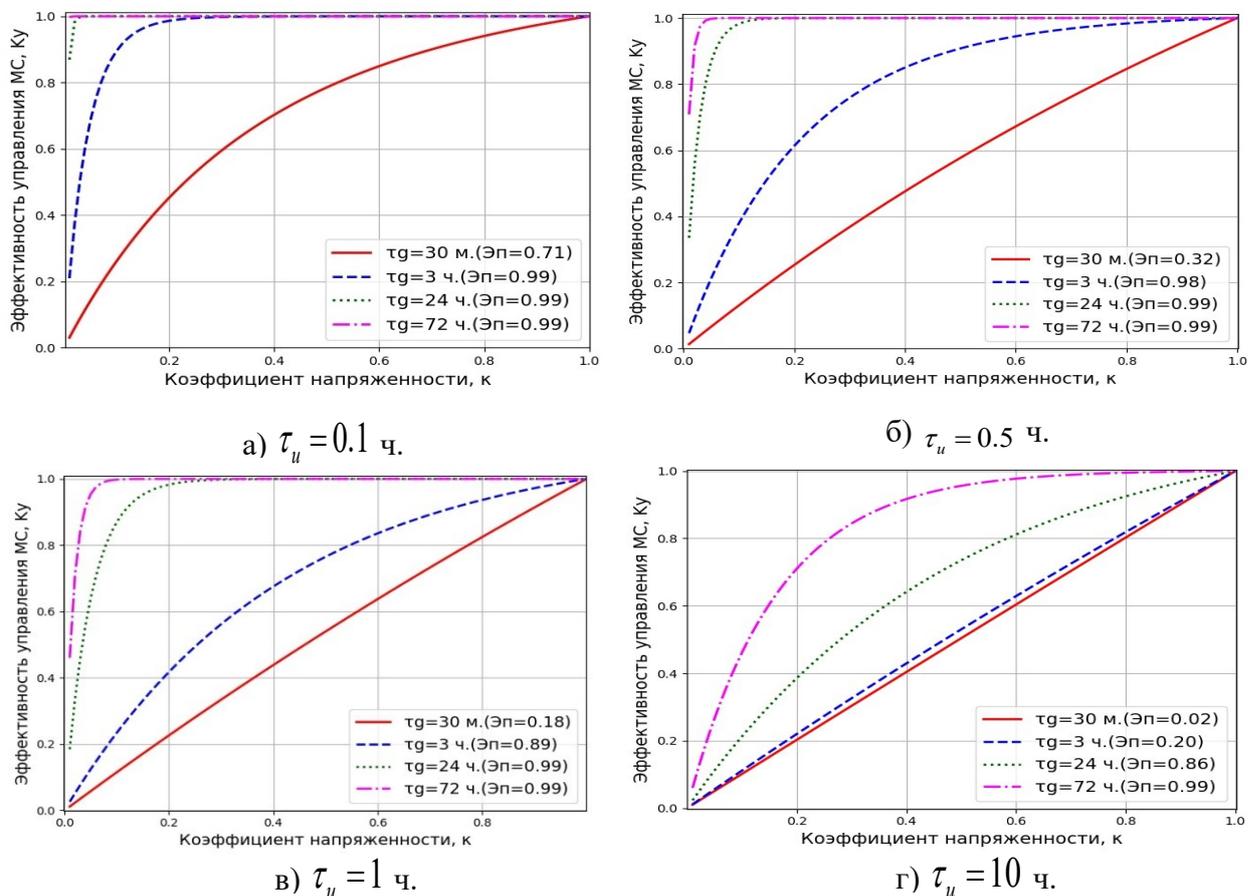


Рис. 4. Зависимости эффективности управления от параметра κ для различных значений τ_g и τ_u)

Заключение

Применение многоспутниковых орбитальных систем позволяет осуществить качественный скачок в оперативности получения предоставляемых ими услуг, потенциальным пределом которой становится режим реального времени. Необходимым условием достижения этих показателей является соизмеримая оперативность управления МС с одновременным поддержанием высоких показателей

результативности. В связи с этим, в настоящее время активно ведутся работы по разработке новых методов, алгоритмов и методик автоматического управления МС, основанных на современных технологиях искусственного интеллекта, нейронных сетей и многоагентных систем. В контексте данных разработок, представленная в статье модель оценивания эффективности управления МС может быть использована для решения следующих задач:

- оценивание влияния отдельных показателей качества разрабатываемых алгоритмов, методов или методик управления на эффективность управления МС;
- отработка разрабатываемого научно-методического аппарата (включая задачи верификации, калибровки и оптимизации);
- обоснование требований к показателям качества разрабатываемого научно-методического аппарата на этапе формирования технического задания, а также подтверждение их соответствия предъявляемым требованиям на этапе приемки.

Список источников

1. Потюпкин А.Ю., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. № 3. С. 61–70. DOI: [10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70](https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70)
2. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2019. - 34 с.

3. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. - М.: АСТ, 2006. – 504 с.
4. Галькевич А.И., Потюпкин А.Ю. О постановке задачи научного обоснования методического аппарата формирования облика перспективной глобальной космической информационной системы // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 4 (65). С. 159–164.
5. Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш., Зубачев А.М. Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. - 244 с.
6. Минаков Е.П., Воложинский А.О., Александров М.А. Модель оценивания покрытия пространственно-временных областей на поверхности Земли полосами обзора космических аппаратов дистанционного зондирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 7. С. 129-135.
7. Колпин М.А., Проценко П.А., Слащев А.В. Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77144>
8. Минаков Е.П., Бугайченко П.Ю. Семантические аспекты оценивания эксплуатационно-технических эффектов функционирования пунктов управления // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2014. № 645. С. 167–170.

9. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. - М.: Издательство Юрайт, 2012. -343 с.
10. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Осипов Н.А. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 671. С. 303–313.
11. Ананьев А.В., Иванников К.С. Динамическая модель оценки эффективности сценариев ведения воздушной разведки интегрированным пространственно-распределенным разведывательным авиационным комплексом // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=164268>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)
12. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Изд-во Юнити-Дана, 2004. – 573 с.
13. Афанасьев И. «Сфера» общих интересов // Русский космос. 2020. № 8. С. 8–19. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/russianspace/rk2020-08-single.pdf>
14. Исследование путей повышения эффективности промышленного и инновационного сотрудничества государств-членов евразийского экономического союза в сфере создания и использования космических и геоинформационных технологий, продвижения космических продуктов и услуг на мировой рынок. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/NIR/Lists/List/Attachments/312>
15. Проценко П.А., Хуббиев Р.В. Методика ранжирования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с целью оперативного мониторинга

- чрезвычайных ситуаций // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159796>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-18)
16. Спутниковое дистанционное зондирование морских разливов нефти. 2016. URL: https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/satellite_remote_sensing_ru.pdf
17. Карсаев О.В. Автономное планирование задач наблюдения в группировках спутников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 129-143. DOI: [10.23683/2311-3103-2019-1-129-143](https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-1-129-143)
18. Сологуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е., Жилиев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 16-26.
19. Калабин П.В. Исследование влияния параметров двигателей-маховиков на характеристики оптимального по быстродействию разворота малого космического аппарата // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. № 675. С. 266-275.
20. Ромашкин В.В., Лошкарев П.А., Федоткин Д.И., Тохиян О.О., Арефьева Т.А., Мусиенко В.А. ЕТРИС ДЗЗ - современные решения в развитии отечественной наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 220-227. DOI [10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227)

References

1. Potyupkin A.Yu., Panteleimonov I.N., Timofeev Yu.A., Volkov S.A. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 61–70. DOI: [10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70](https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70)
2. *GOST R 53802–2010. Sistemy i komplekсы kosmicheskije. Terminy i opredeleniya* (Space systems and complexes. Terms and definitions, State Standart R 53802–2010), Moscow, Standartinform, 2019. 34 p.
3. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremlynykh sistem* (Methodological Foundations of External Design of Purposeful Processes and Purposeful Systems), Moscow, AST, 2006, 504 p.
4. Gal'kevich A.I., Potyupkin A.Yu. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2011, no. 4 (65), pp. 159–164.
5. Minakov E.P., Shafigullin I.Sh., Zubachev A.M. *Metody issledovaniya effektivnosti primeneniya organizatsionno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya* (Methods of studying the effectiveness of the use of organizational and technical systems for space purposes), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2016, 244 p.
6. Minakov E.P., Volozhinskii A.O., Aleksandrov M.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 7, pp. 129-135.
7. Kolpin M.A., Protsenko P.A., Slashchev A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77144>

8. Minakov E.P., Bugaichenko P.Yu. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2014, no. 645, pp. 167–170.
9. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie system* (Modeling of systems), Moscow, Izd-vo Yurait, 2012, 343 p.
10. Dorozhko I.V., Kopeika A.L., Osipov N.A. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 303–313.
11. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164268>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-16)
12. Kremer N.Sh. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (Theory of probability and mathematical statistics), Moscow, Izd-vo Yuniti-Dana, 2004, 573 p.
13. Afanas'ev I. *Russkii kosmos*, 2020, no. 8, pp. 8–19. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/russianspace/rk2020-08-single.pdf>
14. *Issledovanie putei povysheniya effektivnosti promyshlennogo i innovatsionnogo sotrudnichestva gosudarstv-chlenov evraziiskogo ekonomicheskogo soyuza v sfere sozdaniya i ispol'zovaniya kosmicheskikh i geoinformatsionnykh tekhnologii, prodvizheniya kosmicheskikh produktov i uslug na mirovoi rynek*. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/NIR/Lists/List/Attachments/312>
15. Protsenko P.A., Khubbiev R.V. *Trudy MAI*. 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159796>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-18)
16. *Sputnikovoe distantsionnoe zondirovanie morskikh razlivov nefiti*. 2016. URL: https://www.ospri.online/site/assets/files/1130/satellite_remote_sensing_ru.pdf
17. Karsaev O.V. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 1 (203), pp. 129-143.

DOI: [10.23683/2311-3103-2019-1-129-143](https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-1-129-143)

18. Sologub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V., Tsarev A.V., Stepanov M.E., Zhilyaev A.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2013, no. 1 (62), pp. 16-26.

19. Kalabin P.V. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2020, no. 675, pp. 266-275.

20. Romashkin V.V., Loshkarev P.A., Fedotkin D.I., Tokhiyan O.O., Arefeva T.A., Musienko V.A. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 220-227. DOI [10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227)

Статья поступила в редакцию 16.06.2022

Статья после доработки 19.06.2022

Одобрена после рецензирования 28.06.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 16.06.2022; approved after reviewing on 28.06.2022; accepted for publication on 25.08.2022