

УДК 621.314.5

Влияние факторов надежности орбитальных и наземных средств на пропускную способность наземного комплекса управления многоспутниковыми орбитальными группировками

А.Ю. Потюпкин, А.А. Руслеков, Ю.А. Тимофеев, С.А. Волков

АО «Российские космические системы»

Orbital and ground control system reliability factors influencing the throughput of the multi-satellite orbital constellation ground control

A.Y. Potyupkin, A.A. Ruslekov, Y.A. Timofeev, S.A. Volkov

JSC Russian Space Systems

Рассмотрена задача анализа пропускной способности наземного контура управления для многоспутниковой орбитальной группировки космических аппаратов с учетом влияния случайных факторов надежности орбитальных и наземных средств. Проведена формализация задачи анализа пропускной способности, предложено ее решение как нахождение условия равновесия между потоком случайных заявок на обслуживание со стороны космического аппарата и возможность их удовлетворения наземными средствами. Полученное условие позволяет оценивать возрастание реальной требуемой пропускной способности наземного контура относительно ожидаемой с учетом факторов надежности средств и необходимости проведения динамических операций с космическим аппаратом в составе группировки. Приведены результаты имитационного моделирования, получены количественные оценки реальной требуемой пропускной способности.

EDN: JXXKPN, <https://elibrary/jxxkpn>

Ключевые слова: многоспутниковая орбитальная группировка, пропускная способность, условие равновесия, наземный комплекс управления

The paper considers a problem of analyzing the ground control loop throughput for a multi-satellite orbital constellation taking into account the influence of random reliability factors of the orbital and ground systems. It formalizes the throughput analysis problem and proposes its solution as finding the equilibrium condition between the random service requests flow from a spacecraft and a possibility of satisfying them by the ground facilities. The obtained condition makes it possible to assess an increase in the ground loop actual required throughput compared to that expected taking into account reliability factors of the facilities and the need to ensure dynamic operations with a spacecraft as part of the constellation. The paper provides results of the simulation modeling. Quantitative assessment of the actual required throughput were obtained.

EDN: JXXKPN, <https://elibrary/jxxkpn>

Keywords: multi-satellite orbital constellation, throughput, equilibrium condition, ground control system

Многоспутниковые орбитальные группировки космических аппаратов (КА) для отечественной космонавтики из мечты становятся явью. Задачи, поставленные руководством Роскосмоса о создании таких группировок на основе конвейерного производства КА, требуют решения целого комплекса частных научно-технических проблем, одной из которых является разработка технологий управления многоспутниковыми группировками.

Этой теме посвящено множество публикаций специалистов, анализ которых позволяет сделать вывод о несомненном осознании того, что изменение объекта управления и его функционирования влечет за собой изменение технологии управления. Данный вопрос активно обсуждается как на концептуальном уровне, так и на практическом [1–8].

Управлять любым космическим объектом можно только дистанционно по радиоканалу в соответствии с технологическим циклом управления (ТЦУ) посредством наземного комплекса управления (НКУ), являющегося составной частью автоматизированной системы управления (АСУ) КА и содержащего в качестве основных средств управления радиотехнические системы, размещенные на командно-измерительных пунктах.

НКУ КА разного типа объединяют в наземный автоматизированный комплекс управления (НАКУ) всей отечественной орбитальной группировкой, к которому предъявляют требования по глобальности и оперативности управления, пропускной способности, производительности, точности прогноза движения КА на момент решения целевых задач, по надежности и другим показателям.

Известно, что главным отличием отечественных НКУ различных космических систем от зарубежных является их пространственная ограниченность вследствие расположения только на территории РФ, что приводит к ограничениям по выполнению требований глобальности управления КА [9–11].

Однако сегодня выходят на первый план и вопросы производительности НАКУ, о чем свидетельствует, например, заявление представителей Минобороны РФ в честь дня космических войск: «В текущем году дежурные силы НАКУ провели свыше 400 тыс. сеансов управления более чем по 200 космическим аппаратам». Нарастание орбитальной группировки в разы при существующей технологии управле-

ния, очевидно, вызовет аналогичный рост количества сеансов связи с КА, что ставит вопрос о способности существующего НАКУ и входящих в него НКУ решать задачи управления многоспутниковой группировкой КА.

Технические средства управления в составе НКУ должны обеспечивать возможность информационного обмена управляющей информацией со всеми КА многоспутниковой орбитальной группировки. В связи с этим на первый план выходит вопрос по пропускной способности наземных радиотехнических средств: смогут ли выделенные наземные средства управления КА выполнить задачи ТЦУ в условиях пространственно-временных и технологических ограничений на функционирование НКУ?

Традиционно при ответе на этот вопрос учитывалась группа ограничений, связанная с тем, что командно-измерительные пункты НАКУ РФ расположены только на российской территории, их количество ограничено, и связь с КА возможна только при их нахождении в зонах радиовидимости наземных пунктов. Поэтому, как правило, при анализе пропускной способности НКУ учитывают только баллистические и временные аспекты: возможность попадания КА в зону радиовидимости наземных средств и технологические особенности их функционирования, связанные с затратами времени на настройку наземных средств для проведения сеанса связи, с их перенацеливанием на последующий КА и послесеансными операциями [12, 13].

Важным фактором при расчете пропускной способности является учет не только числа КА на орбите, но и структуры ТЦУ, определяющей количество необходимых сеансов управления по каждому КА.

Однако на сегодняшний день вследствие значительного увеличения загрузки наземных средств и численности КА особое значение приобретает фактор ограниченной надежности наземных и бортовых средств, приводящий к необходимости учета их текущего технического состояния. Следует отметить, что традиционные подходы к оценке пропускной способности НКУ, связанные с пространственно-временными аспектами взаимодействия КА — НКУ, обеспечивают необходимые условия, а предлагаемый с учетом надежности — и достаточные условия информационного обмена.

В связи с этим анализ пропускной способности НКУ при управлении многоспутниковыми группировками КА с комплексным учетом фак-

торов глобальности, структуры ТЦУ и надежности средств наземного и космического базирования становится актуальной задачей. Представляется, что полученные оценки требуемой пропускной способности послужат исходными данными для известных методов, учитывающих баллистические и временные аспекты функционирования группировки и ее взаимодействия с НКУ.

При этом события изменения структуры ТЦУ и выхода из строя технических средств являются случайными. Следует отметить, что анализ случайных процессов традиционно для орбитальных группировок ввиду их немногочисленности ограничивался отдельными временными реализациями. Однако вследствие перспективного наращивания численности орбитальных группировок возникает возможность анализа не только по времени, но и по множеству реализаций на заданный момент времени. Именно этот подход использован в данной статье.

Постановка задачи. Рассмотрим НКУ многоспутниковой группировки КА как систему, на входе которой есть поток запросов на обслуживание — требуемое количество сеансов связи с КА в сутки, на выходе — количество сеансов, выполненных средствами НКУ.

Пусть общее количество заявок

$$Z = N_{КА} n_{c/c},$$

где $N_{КА}$ — количество находящихся на орбите КА; $n_{c/c}$ — количество сеансов в сутки по одному КА, определяемое заданным ТЦУ КА.

Для многофункциональной орбитальной группировки каждый тип КА характеризуется своим ТЦУ, поэтому в первом приближении можно рассматривать $n_{c/c}$ как среднее значение по множеству типов КА.

Другим вариантом является детализация $N_{КА}$ по типам КА N_i с определением количества сеансов по каждому типу $n_{c/c}^i$ и вычислением количества заявок следующим образом:

$$Z = \sum_{i=1}^k N_i n_{c/c}^i.$$

Количество сеансов, выполненных средствами НКУ, будем оценивать как

$$V = mr,$$

где m — количество средств НКУ, привлекаемых для управления; r — пропускная способность каждого средства.

Если провести декомпозицию по типам наземных средств НКУ, то количество сеансов можно определить как

$$V = \sum_{j=1}^M m_j r_{cp}^j,$$

где m_j — тип j -го средства НКУ, привлекаемого для управления; r_{cp}^j — его пропускная способность.

Принимая известным коэффициент глобальности управления Γ , запишем

$$\Gamma = \sum_{j=1}^m \frac{T_j}{T_{сут}}$$

или

$$\Gamma = \sum_{j=1}^m \frac{T_j}{T_{обсл}},$$

где T_j — время нахождения КА в зоне радиовидимости j -го наземного средства НКУ за сутки полета; $T_{сут}$ — общее время суток; $T_{обсл}$ — требуемое времени обслуживания.

Известен также показатель надежности КА как вероятность безотказной работы (ВБР) $P_{б.р.}$. ВБР — это вероятность того, что в заданных условиях эксплуатации в течение определенного промежутка времени t не произойдет ни одного отказа элементов при интенсивности отказов λ :

$$P_{б.р.}(t) = e^{-\lambda t}.$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{n_{\Delta t}}{N_{cp} \Delta t}.$$

Здесь $n_{\Delta t}$ — количество элементов, отказавших в интервале времени Δt ;

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2},$$

где N_i и N_{i+1} — количество исправно работавших элементов в начале и конце отрезка времени Δt .

Интенсивность отказов может иметь размерность, обратную времени t , т. е. событий/сутки (месяц, год). Для простоты принимаем, что $\lambda(t) = \text{const}$ и имеет размерность 1/сутки и ВБР каждого КА одинаковы.

Для наземных средств с учетом возможности их восстановления и ремонта задан коэффициент готовности K_r — отношение времени

его исправной работы $T_{\text{раб}}$ к сумме его и времени вынужденного простоя $T_{\text{прост}}$, взятых за один и тот же календарный срок:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{прост}}}.$$

Заданы коэффициенты возрастания среднего количества сеансов связи с КА при возникновении отказов на борту КА $L_{\text{отк}}$ и при проведении динамических операций $L_{\text{д.о}}$ с вероятностью события $P_{\text{д.о}}$.

Вероятность события можно определить как отношение количества КА, для которых запланировано выполнение динамических операций на интервале суток $N_{\text{КА}}^{\text{д.о}}$, к общему количеству КА $N_{\text{КА}}$:

$$P_{\text{д.о}} = \frac{N_{\text{КА}}^{\text{д.о}}}{N_{\text{КА}}}.$$

Будем считать равенство $Z = V$ условием равновесия (устойчивости функционирования) АСУ КА группировки.

Цель работы — анализ выполнения условия равновесия для выработки рекомендаций по обеспечению устойчивости функционирования АСУ КА при воздействии комплекса факторов глобальности, структуры ТЦУ и надежности технических средств.

Решение задачи. Будем рассматривать количество заявок на обслуживание Z как сумму математических ожиданий (МО) заявок от количества работоспособных КА при стандартном ТЦУ $M_{\text{р.с}}$ и заявок от КА, выполняющих динамические операции $M_{\text{д.о}}$ или находящихся в неработоспособном состоянии $M_{\text{отк}}$:

$$M_{\text{р.с}} = [N_{\text{КА}} - N_{\text{отк}}(t)]n_{\text{с/с}};$$

$$M_{\text{д.о}} = N_{\text{КА}} P_{\text{д.о}} L_{\text{д.о}} n_{\text{с/с}};$$

$$M_{\text{отк}} = N_{\text{отк}}(t) L_{\text{отк}} n_{\text{с/с}},$$

где $N_{\text{отк}}$ — количество отказавших КА,

$$N_{\text{отк}} = N_{\text{КА}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)].$$

Тогда общее количество заявок

$$\begin{aligned} Z(t) &= \{N_{\text{КА}} - N_{\text{КА}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)]\} n_{\text{с/с}} + \\ &+ N_{\text{КА}} P_{\text{д.о}} L_{\text{д.о}} n_{\text{с/с}} + N_{\text{КА}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)] n_{\text{с/с}} L_{\text{отк}} = \\ &= N_{\text{КА}} P_{\text{б.п}}(t) n_{\text{с/с}} + N_{\text{КА}} P_{\text{д.о}} L_{\text{д.о}} n_{\text{с/с}} + \\ &+ N_{\text{КА}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)] n_{\text{с/с}} L_{\text{отк}} = \\ &= N_{\text{КА}} n_{\text{с/с}} \{P_{\text{б.п}}(t) + P_{\text{д.о}} L_{\text{д.о}} + L_{\text{отк}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)]\}. \end{aligned}$$

Пропускная способность НКУ в интервале суток с учетом факторов надежности наземных средств и глобальности управления

$$V = m K_{\Gamma}(t) r \Gamma.$$

Тогда условие $Z = V$ равновесия АСУ КА принимает вид

$$\begin{aligned} N_{\text{КА}} n_{\text{с/с}} \{P_{\text{б.п}}(t) + P_{\text{д.о}} L_{\text{д.о}} + L_{\text{отк}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)]\} = \\ = m K_{\Gamma}(t) r \Gamma. \end{aligned}$$

Отсюда требуемая пропускная способность НКУ

$$mr = \frac{N_{\text{КА}} n_{\text{с/с}} \{P_{\text{б.п}}(t) + P_{\text{д.о}} L_{\text{д.о}} + L_{\text{отк}} [1 - P_{\text{б.п}}(t)]\}}{K_{\Gamma}(t) \Gamma}.$$

При этом она ограничена как количеством средств НКУ m , так и производительностью каждого средства r . С учетом естественных ограничений, накладываемых на количество средств НКУ, возникает вопрос о производительности каждого средства. Следует отметить, что на практике для гарантированного обеспечения управления всей группировкой КА должно выполняться требование $Z \leq V$, т. е. должен быть запас по пропускной способности НКУ.

Пример. Пусть общее количество КА в группировке составляет 100 КА, ВБР каждого из них на заданный момент времени равна 0,995, количество сеансов стандартного ТЦУ в сутки $n_{\text{с/с}} = 1$, коэффициент возрастания среднего количества сеансов при возникновении отказов на борту КА $L_{\text{отк}} = 3$, коэффициент возрастания среднего количества сеансов при проведении динамических операций КА $L_{\text{д.о}} = 2$, вероятность проведения динамических операций за сутки $P_{\text{д.о}} = 0,2$, коэффициент готовности НКУ $K_{\Gamma} = 0,98$, глобальность управления $\Gamma = 0,5$. Тогда общая потребная пропускная способность НКУ составит 287 сеансов в сутки, т. е. почти в 3 раза больше численности КА в группировке и стандартной нагрузки на НКУ. Для глобальности $\Gamma = 1$ получаем 144 сеанса в сутки.

Более реалистичная ВБР, равная 0,9, при тех же условиях дает соответственно 326 и 163 сеанса в сутки в зависимости от требований по глобальности.

Как видно из полученных результатов, глобальность управления — важный фактор. Поэтому одним из вариантов, обсуждаемых специалистами, является управление с ретрансляцией, в том числе с использованием подсистемы информационного обмена как составной части

многоспутниковой группировки, позволяющей повысить коэффициент глобальности управления.

Достоинства ретрансляционного режима на уровне известных показателей АСУ КА достаточно хорошо описаны в работе [14], где на основе анализа показателей доступности и оперативности связи НКУ с КА без ретрансляции и с ретрансляцией установлено, что выигрыш по оперативности управления российским сегментом Международной космической станции с ретрансляцией может достигать 90...98 %.

Однако даже для ретрансляционного режима с использованием специально выделенных спутников-ретрансляторов или же при реализации межспутниковой связи внутри самой группировки количество взаимодействий центра управления полетами с КА не снизится, так как количество объектов управления не изменится.

В этом случае появятся промежуточные звенья системы информационного обмена, надежность которых $K_r^{и.о}$ также следует учитывать при расчете пропускной способности:

$$mr = \frac{N_{КА} n_{с/с} \{P_{б,р}(t) + P_{д,о} L_{д,о} + L_{отк} [1 - P_{б,р}(t)]\}}{K_r(t) K_r^{и.о}(t) \Gamma}$$

В рассматриваемом примере при ретрансляционном режиме коэффициент глобальности $\Gamma = 1$, но включение дополнительных звеньев передачи информации, обладающих $K_r^{и.о} = 0,9$, приводит к следующему результату: общая потребная пропускная способность НКУ составит 160 сеансов в сутки, что на 60 % больше численности КА в группировке.

Следует отметить, что проведенный анализ не учитывает интенсивности потоков заявок, не рассматривает систему управления как сложную систему массового обслуживания и как сеть передачи данных. Однако многоспутниковую систему надо рассматривать как телекоммуникационную систему со множеством абонентов и потоков заявок, которые будут распределены по законам либо Пуассона, либо Эрланга, а в ряде случаев носить фрактальный характер систем, в которых возможны очереди не только с отказами в обслуживании, но и с ожиданием. Такое представление позволяет воспользоваться другим математическим аппаратом, применяемым для анализа сетей, в том числе и методами сетевого исчисления.

Однако предложенный вариант анализа, позволяющий получать усредненные оценки требу-

емой пропускной способности НКУ, может быть востребован для обоснования характеристик НКУ при проектировании КА, а также в процессе эксплуатации многоспутниковых группировок, когда на основании анализа текущего состояния множества КА группировки и наземных средств можно будет осуществить прогноз требуемой пропускной способности НКУ и обосновано спланировать сеансы связи с КА.

В этом случае требуется анализ состояния всей группировки на заданный момент времени, учет количества обслуженных и необслуженных КА, выявление «критичных» КА и оперативное перепланирование программы работ наземных средств.

В общем случае исследование влияния случайных факторов надежности и динамических операций на пропускную способность НКУ следует проводить путем имитационного моделирования. В рамках созданного в экспертно-аналитическом центре АО «РКС» моделирующего стенда разработана имитационная модель, позволяющая получать статистические оценки пропускной способности методом Монте-Карло.

В качестве исходных данных выступали количество КА, ВБР каждого КА, количество сеансов для штатного ТЦУ, вероятность проведения динамических операций, коэффициенты возрастания количества сеансов связи, коэффициенты готовности наземных средств и глобальности управления, а также вид режима управления — непосредственный или ретрансляционный. Значения входных и выходных данных приведены в таблице, где б/р — безразмерный.

Примеры результатов расчета при различных режимах управления без ретрансляции и с ретрансляцией для группировки с количеством КА $N_{КА} = 100$, количеством стандартных сеансов управления $n_{с/с} = 1$, коэффициентом возрастания количества сеансов при отказах $L_{отк} = 3$ и равномерном законе распределения случайных величин в пределах, указанных в таблице, приведены на рис. 1 и 2.

Анализ результатов расчетов свидетельствует о значительном возрастании потребности в количестве сеансов управления при учете влияния случайных факторов, связанных с отказами КА и наземных средств. Так, для управления без ретрансляции математическое ожидание потребной пропускной способности НКУ составляет 210, что более чем в 2 раза превышает

Значения входных и выходных данных

Наименование	Обозначение	Формат	Тип, размерность данных	Пределы изменения
<i>Входные данные</i>				
Количество итераций	$N_{\text{итер}}$	Массив	Числовой, б/р	1...20 000
Количество КА, находящихся на орбите	$N_{\text{КА}}$			1...264
Количество сеансов в сутки по одному КА, определяемое заданным ТЦУ	$n_{\text{с/с}}$			1...50
Коэффициент возрастания среднего количества сеансов при возникновении отказов на борту КА	$L_{\text{отк}}$			2...5
Коэффициент возрастания среднего количества сеансов при проведении динамических операций КА	$L_{\text{д.о}}$			2...5
Вероятность проведения динамических операций КА на суточном интервале	$P_{\text{д.о}}$	Сгенерирована датчиком случайных чисел	Числовой	0,50...0,99
Коэффициент глобальности управления	Γ	Массив	Числовой, б/р	0,2...1,0
Вид закона распределения случайной величины	–	Логический	Целый	Равномерный/ нормальный
Вариант управления	–			Без ретрансляции/ с ретрансляцией
МО случайной величины, заданной по нормальному закону	$M []$	Массив	Числовой	0,50...0,99
Вероятность безотказной работы каждого из КА	$P_{\text{б.р}}$	Сгенерирована датчиком случайных чисел		0,50...0,99
Коэффициент готовности НКУ	K_{Γ}		Числовой, б/р	0,50...0,99
Коэффициент готовности промежуточных звеньев системы информационного обмена	$K_{\Gamma}^{\text{н.о}}$			0,50...0,99
<i>Выходные данные</i>				
Потребная пропускная способность НКУ	m_{Γ}	Таблица	Числовой, б/р	В соответствии с входными данными и методикой расчета
		Гистограмма	Графический, б/р	
МО потребной пропускной способности НКУ	M_x	Массив	Числовой, б/р	
Дисперсия потребной пропускной способности НКУ	D_x			
Среднеквадратическое отклонение потребной пропускной способности НКУ	G_x			
<i>Примечание.</i> Приведенные в таблице и на гистограмме данные содержат объединенные в группы (с шагом 10, от min до max) значения потребной пропускной способности НКУ и количество этих попаданий в конкретную группу.				

ожидаемое значение, а для управления с ретрансляцией — 295, что превышает ожидаемое значение почти в 3 раза.

В связи с этим, по-видимому, требуется разработка новых подходов к реализации технологий управления, ориентированных на реализа-

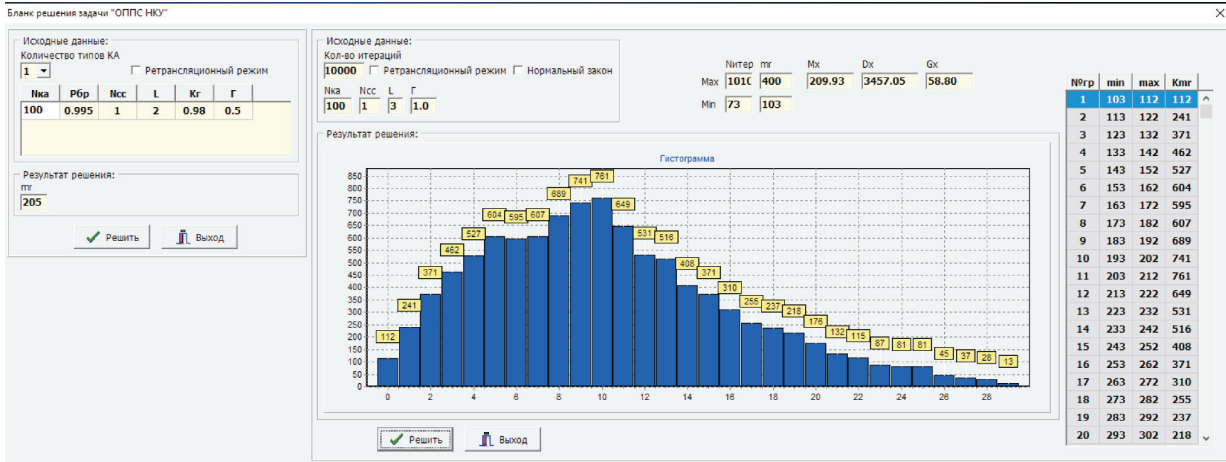


Рис. 1. Пример результатов расчета для приведенных исходных данных в режиме управления без ретрансляции

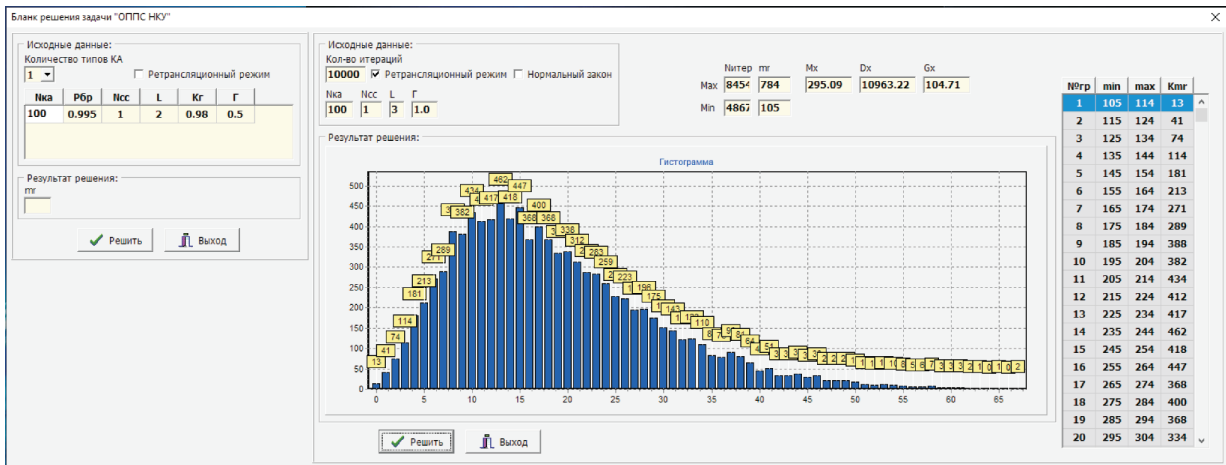


Рис. 2. Пример результатов расчета для приведенных исходных данных в режиме управления с ретрансляцией

цию методов многостанционного доступа с разделением каналов по времени, частоте, поляризации, кодовому и пространственному разделению, а также их комбинациям, которые в настоящее время активно применяются на КА связи, находящихся на геостационарной орбите и обеспечивающих одновременную работу нескольких сотен транспондеров [15]. Представляется целесообразным вариант применения активных фазированных антенных решеток и на земле в составе НКУ, позволяющих одновременно формировать несколько пространственно разнесенных каналов передачи информации.

Нагрузку на систему информационного обмена также можно снизить повышением автономности КА, в том числе разработкой новых режимов функционирования и автономной диагностики КА с реализацией технологии «Вызов НКУ» в случае необходимости.

Выводы

1. Рассмотрены вопросы анализа пропускной способности наземного контура управления для многоспутниковой орбитальной группировки с учетом влияния случайных факторов надежности орбитальных и наземных средств.
2. Проведена формализация задачи анализа пропускной способности. Предложено ее решение как нахождение условия равновесия между потоком случайных заявок на обслуживание со стороны КА и возможностью их удовлетворения наземными средствами НКУ.
3. Полученное условие позволяет оценивать возрастание реальной требуемой пропускной способности НКУ относительно ожидаемой с учетом факторов надежности средств и необходимости проведения динамических операций с КА в составе группировки.

4. Приведены результаты имитационного моделирования, свидетельствующие о двух- и трехкратном превышении реальной потребности в проведении сеансов управления для различных вариантов управления. Ретрансляционный режим оказался более затратным, чем режим управления только наземными средствами.

5. Предполагается, что полученные оценки требуемой пропускной способности послужат исходными данными для известных методов,

учитывающих только баллистические и временные аспекты функционирования группировки КА и ее взаимодействия с НКУ.

6. На основании результатов моделирования сделано заключение о необходимости разработки новых подходов к реализации технологий управления, основанных на методах многоканального доступа с разделением каналов по времени, частоте, поляризации, кодовому и пространственному разделению, а также их комбинациям.

Литература

- [1] Данилин Н.С. *Системная микроминиатюризация и малые спутники*. Москва, Спектр, 2013. 55 с.
- [2] Жоздишский А.И., Жидкова С.К., Нагорных Д.Н. Построение единого наземного комплекса управления многоспутниковой группировки КА ДЗЗ. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2020, т. 7, № 4, с. 14–21, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.14.21>
- [3] Вагутин С.И., Гвардин Р.М., Курков И.К. Межорбитальная система передачи данных для управления группировкой малых КА. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии*, 2022, т. 9, № 3, с. 65–75.
- [4] Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Пантелеймонов И.Н. и др. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2020, т. 7, № 3, с. 61–70, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70>
- [5] Афанасьев И. «Сфера» общих интересов. Космические информационные технологии как драйвер развития страны. *Русский космос*, 2020, № 10, с. 8–19.
- [6] Городецкий В.И., Карсаев О.В. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2017, № 2, с. 234–247.
- [7] Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В. и др. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли. *Информационно-управляющие системы*, 2013, № 1, с. 16–26.
- [8] Привалов А.Е., Зубачев А.М., Власов Р.П. и др. Методика интеграции многоагентных моделей в технологию управления многоспутниковыми космическими системами мониторинга. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2023, № 2, с. 193–198.
- [9] Кисляков М.Ю., Логачев Н.С., Петушков А.М. Системно-технические аспекты развития НАКУ КА НСЭН и измерений до 2025 года. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2016, т. 3, № 1, с. 62–71.
- [10] Эволюция и тенденции развития комплексов управления КА за рубежом. *poznovatelno.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.pznovatelno.ru/space/8350.html> (дата обращения: 20.10.2023)
- [11] Фортескью П., Старк Дж., Суинерд Г., ред. *Разработка систем космических аппаратов*. Москва, Альпина Паблицер, 2015. 764 с.
- [12] Григорьев В.С., Ксендзук А.В. Анализ эффективности алгоритмов перенацеливания наземного радиотехнического измерительного средства при планировании сеансов связи с космическими аппаратами. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии*, 2023, т. 10, № 2, с. 83–88.
- [13] Пеньков М.М., Сахно И.В., Назаров А.В. *Искусственный интеллект в военно-космической деятельности*. Санкт-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2022. 544 с.
- [14] Пантелеймонов И.Н., Потюпкин А.Ю., Траньков В.М. и др. Методика расчета показателей эффективности системы управления полетом космических аппаратов. *Изве-*

стия высших учебных заведений. *Машиностроение*, 2019, № 11, с. 55–65, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-11-55-65>

- [15] Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. *Спутниковые сети связи*. Москва, Военный парад, 2010. 608 с.

References

- [1] Danilin N.S. *Sistemnaya mikrominiaturizatsiya i malye sputniki* [Systemic microminiaturization and small satellites]. Moscow, Spektr Publ., 2013. 55 p. (In Russ.).
- [2] Zhodzishskiy A.I., Zhidkova S.K., Nagornykh D.N. Construction of a unified ground-based control complex for a multi-satellite ERS constellation. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2020, vol. 7, no. 4, pp. 14–21, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.14.21> (in Russ.).
- [3] Vatutin S.I., Gvardin R.M., Kurkov I.K. Inter-orbital data transfer system for small spacecraft constellation control. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2022, vol. 9, no. 3, pp. 65–75. (In Russ.).
- [4] Potyupkin A.Yu., Volkov S.A., Panteleymonov I.N. et al. Control of multi-satellite orbital constellations. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2020, vol. 7, no. 3, pp. 61–70, doi: <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70> (in Russ.).
- [5] Afanasyev I. "Sphere" of common interests. Space information technologies as a driver of the country's development. *Russkiy kosmos*, 2020, no. 10, pp. 8–19. (In Russ.).
- [6] Gorodetskiy V.I., Karsaev O.V. Distributed surveillance system based on self-organized collective behavior of small satellite cluster. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences], 2017, no. 2, pp. 234–247. (In Russ.).
- [7] Sollogub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V. et al. Intelligent system for distributed problem solving in cluster of small satellites for earth remote sensing. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 1, pp. 16–26. (In Russ.).
- [8] Privalov A.E., Zubachev A.M., Vlasov R.P. et al. Method for integration of multi-agent models in multi-satellite control technology space monitoring systems. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2023, no. 2, pp. 193–198. (In Russ.).
- [9] Kislyakov M.Yu., Logachev N.S., Petushkov A.M. System and technical development aspects of the ground-based automated control complex for spacecraft of scientific and socio-economic purposes and measurements until 2025. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2016, vol. 3, no. 1, pp. 62–71. (In Russ.).
- [10] Evolyutsiya i tendentsii razvitiya kompleksov upravleniya KA za rubezhom [Evolution and trends in the development of spacecraft control complexes abroad]. *poznovatelno.ru: website*. URL: <https://www.pznovatelno.ru/space/8350.html> (accessed: 20.10.2023) (In Russ.).
- [11] Fortescue P., Swinerd G., Stark J., eds. *Spacecraft systems engineering*. Wiley, 2011. 728 p. (Russ. ed.: *Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov*. Moscow, Alpina Publisher Publ., 2015. 764 p.)
- [12] Grigoryev V.S., Ksendzuk A.V. Effectiveness analysis of redirection algorithms for ground-based radio engineering instruments in planning communication sessions with spacecraft. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2023, vol. 10, no. 2, pp. 83–88. (In Russ.).
- [13] Penkov M.M., Sakhno I.V., Nazarov A.V. *Iskusstvennyy intellekt v voenno-kosmicheskoy deyatel'nosti* [Artificial intelligence in military-space activities]. Sankt-Petersburg, VKA im. A.F. Mozhayskogo Publ., 2022. 544 p. (In Russ.).
- [14] Panteleymonov I.N., Potyupkin A.Yu., Trankov V.M. et al. Methods of calculation of performance indicators of spacecraft flight control systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

- zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 11, pp. 55–65, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2019-11-55-65> (in Russ.).
- [15] Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. *Sputnikovye seti svyazi* [Satellite communications networks]. Moscow, Voennyu parad Publ., 2010. 608 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.02.2024

Информация об авторах

ПОТЮПКИН Александр Юрьевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник экспертно-аналитического центра. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 53, e-mail: potyupkin_in@spacecorp.ru).

РУСЛЕКОВ Андрей Александрович — доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник экспертно-аналитического центра. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 53, e-mail: ruslekov_in@spacecorp.ru).

ТИМОФЕЕВ Юрий Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник экспертно-аналитического центра. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 53, e-mail: timofeev_in@spacecorp.ru).

ВОЛКОВ Сергей Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник экспертно-аналитического центра. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 53, e-mail: volkov_in@spacecorp.ru).

Information about the authors

POTYUPKIN Alexander Yurievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Chief Researcher, Expert and Analytical Center. JSC Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: potyupkin_in@spacecorp.ru).

RUSLEKOV Andrey Aleksandrovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, Expert and Analytical Center. JSC Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: ruslekov_in@spacecorp.ru).

TIMOFEEV Yuri Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Head of the Expert and Analytical Center. JSC Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: timofeev_in@spacecorp.ru).

VOLKOV Sergey Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Leading Researcher, Expert and Analytical Center. JSC Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: volkov_in@spacecorp.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Потюпкин А.Ю., Руслеков А.А., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Влияние факторов надежности орбитальных и наземных средств на пропускную способность наземного комплекса управления многоспутниковыми орбитальными группировками. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 11, с. 117–126.

Please cite this article in English as:

Potyupkin A.Y., Ruslekov A.A., Timofeev Y.A., Volkov S.A. Orbital and ground control system reliability factors influencing the throughput of the multi-satellite orbital constellation ground control. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 11, pp. 117–126.