

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ РЕТРАНСЛЯЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ

© 2025

- А. Ю. Потюпкин** доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник;  
АО «Российские космические системы», Москва;  
[Avramenko.sv@spacecorp.ru](mailto:Avramenko.sv@spacecorp.ru)
- В. В. Красков** заместитель начальника отделения;  
АО «Российские космические системы», Москва;  
[Kraskov.vv@spacecorp.ru](mailto:Kraskov.vv@spacecorp.ru)
- С. А. Яхутин** директор проектов;  
АО «Российские космические системы», Москва;  
[Yakhutin.sa@spacecorp.ru](mailto:Yakhutin.sa@spacecorp.ru)
- С. В. Авраменко** кандидат технических наук, начальник бюро;  
АО «Российские космические системы», Москва;  
[Avramenko.sv@spacecorp.ru](mailto:Avramenko.sv@spacecorp.ru)

Показана актуальность космической системы ретрансляции при создании многоспутниковых орбитальных группировок космических аппаратов. Исследуются параметры перспективной космической системы ретрансляции для управления многоспутниковой орбитальной группировкой космических аппаратов с учётом структуры технологического цикла управления космическими аппаратами. Предложена космическая система ретрансляции на низких и средних околоземных орбитах как динамическая телекоммуникационная система для обеспечения управления большим числом космических аппаратов. Для выполнения технологического цикла управления космическими аппаратами с заданным качеством сформулированы необходимые условия, в том числе при реализации методов многостанционного доступа. Предлагаемая космическая система ретрансляции рассматривается как система массового обслуживания. Приведён пример расчёта параметров геостационарной космической системы ретрансляции при использовании многолучевой антенной системы как системы массового обслуживания.

*Система ретрансляции; система массового обслуживания; технологический цикл управления; многостанционный доступ; многоспутниковая группировка*

---

**Цитирование:** Потюпкин А.Ю., Красков В.В., Яхутин С.А., Авраменко С.В. Анализ возможностей создания системы ретрансляции для управления многоспутниковой орбитальной группировкой // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 1. С. 45-55.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-45-55

---

Создание космической системы ретрансляции (КСР) для управления многоспутниковой орбитальной группировкой (МОГ) космических аппаратов (КА) является актуальной задачей для обеспечения глобальности и непрерывности управления с необходимой пропускной способностью системы. Однако зачастую получаемые оценки потребного количества спутников-ретрансляторов (СР) и необходимых каналов связи являются завышенными, экономически нерентабельными и не позволяют приступить к реализации практически обоснованных проектов КСР. Как отмечается в работе [1], «Основная причина заключается в её экономической целесообразности. Сегодня внимание разработчиков КА связи сосредоточено на предоставлении услуг информационного обмена массовому потребителю, в основном наземному, способному обеспечить экономическую эффективность проектов. Система ретрансляции, в свою очередь, ориентирована на ограниченный круг потребителей, в основном потребителей информации дистанционного зондирования Земли, и в силу этого не является экономически рента-

бельной». В связи с этим целесообразно рассмотреть возможные пути создания или модернизации существующей КСР для управления МОГ, исходя из представления орбитальной группировки многоагентной системой, порождающей множество заявок на реализацию индивидуальных технологических циклов управления (ТЦУ) КА.

Технология реализации ретрансляционного режима основана на директивном планировании и предполагает установление канала информационного обмена СР – КА в заданное время. Возможности существующей многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) «Луч» имеют существенные ограничения, а сама МКСР «Луч» не предназначалась и не способна обеспечивать управление многоспутниковыми орбитальными группировками [2]. Анализ ретрансляционных отечественных и зарубежных технологий ретрансляционного режима свидетельствует о схожести подходов директивного планирования для КСР, развёрнутых на геостационарной орбите (ГСО). Вместе с тем оценка возможности управления КА на низких орбитах с ретрансляцией сигнала через спутниковые системы связи также на низких орбитах требует исследования систем ретрансляции как динамических телекоммуникационных систем с применением элементов теории массового обслуживания [3]. Взаимодействие космических систем связи и КА других МОГ должны рассматриваться с учётом известной модели взаимодействия открытых систем (ОСИ) на всех уровнях, и помимо традиционных уровней – физического и канального, обеспечивающих техническую инфраструктуру системы передачи данных, в настоящее время необходимо рассматривать и более высокие уровни, в первую очередь транспортный и сетевой [4]. Космические системы связи по своим возможностям уже сравнимы с наземными сетями сотовой связи и предназначены для обслуживания массового потребителя. Например, в работе [5] рассмотрена перспективная низкоорбитальная система связи на базе СР с функцией маршрутизатора пакетов сообщений и реализацией функций протокола BGP (Border Gateway Protocol), который подразумевает коррекцию бортовых таблиц маршрутизации СР при любом изменении конфигурации сети и функционала AAA (Authorization – Authentication – Accounting) на наземной станции. При этом характеристики межспутниковых трактов определяются сценарием поступления пакетов сообщений от группы межспутниковых трактов к одному абонентскому тракту, который формируется соответствующими аналитическими моделями с применением математического аппарата систем массового обслуживания (СМО) с простейшими потоками заявок и экспоненциальным распределением времени обслуживания.

Однако, основное внимание в известных работах уделяется традиционным характеристикам систем связи, например, качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) – совокупности показателей, таких как скорость передачи, задержка, джиттер, потери, которые определяют степень удовлетворения пользователя предоставляемым ему обслуживанием, без учёта специфики функционирования КСР как сложных динамических технических систем и соответствующих влияющих факторов.

Следует учитывать, что КСР используют технологии коммутации каналов, а не коммутации сообщений или пакетов. Поэтому подходы, применимые для анализа наземных систем связи, целесообразно адаптировать под реальные условия. Подобная адаптация возможна с учётом ряда факторов, влияющих на качество функционирования КСР, к числу которых помимо традиционных, связанных с баллистическим построением КСР [4; 6], можно отнести структуру ТЦУ, определяющую директивное время проведения сеансов связи (СС) с КА; отказы борта, приводящие к возрастанию интенсивности СС; отказы средств информационного обмена, приводящие к отказу от обслуживания и перераспределению СС на другие средства; конфликты в заявках на обслуживание, приводящие к вынужденному отказу от проведения СС.

Особое значение перечисленные факторы приобретают для перспективных МОГ, насчитывающих сотни и тысячи управляемых объектов, где на первый план выходят факторы, обусловленные не только состоянием отдельных КА, но и системы в целом. Например, суточный коэффициент готовности системы из 1000 КА  $K_r = 0,9$  подразумевает, что 100 КА из группировки возможно будут неработоспособны, причём их пространственно-временное распределение случайно, а отказы приводят к возрастанию интенсивности СС.

В работе [7] предложена концепция «орбитальных сот», предполагающая формирование динамической сети базовых станций по типу наземных сетей сотовой связи на основе выделенных из состава МОГ КА связи и ретрансляции. В этом случае в составе группировки выделяются КА, выполняющие роль базовых станций «орбитальных сот», выполняющие диспетчерские функции для организации связи как с абонентами, так и с соседними базовыми станциями и наземной инфраструктурой. Остальные КА МОГ выступают в качестве абонентов, оснащённых модемами сети, они регистрируются при нахождении в зоне действия конкретной «орбитальной соты» и пользуются её ресурсами как для передачи специальной информации для потребителей, так и для решения задач информационного обмена в процессе управления. Таким образом, предлагается функциональная специализация КА в МОГ путём создания базовых станций-ретрансляторов на основе выбранных КА.

Примем, что система ретрансляции статичная и каждый СР в зоне радиовидимости (ЗРВ) обеспечивает свою соту обслуживания. В системе координат относительно СР все КА будут последовательно перемещаться из соты в соту с обязательной регистрацией в ней путём излучения пилот-сигнала (рис. 1).

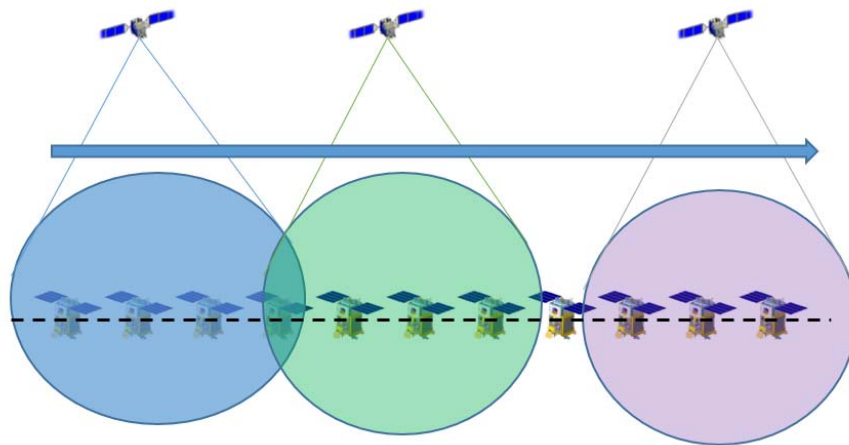


Рис. 1. Пример организации космической системы ретрансляции на основе орбитальных сот

При необходимости проведения СС каждый КА формирует запрос на СР, после чего осуществляется оценка возможностей предоставления канала обслуживания, в случае отказа выдаются рекомендации КА по свободной соте. Например, на рис. 2 диагональной штриховкой представлено возможное распределение нахождения КА в различных сотах 1 – 5. Если известна пропускная способность каждой соты (максимальное число КА, одновременно обслуживаемых в соте, например на рис. 2 по 7 КА), то можно выделить соты с резервом и перегруженные. Например, сота 3 перегружена на 1 КА, а соты 1, 4, 5 имеют резерв соответственно 3, 4, 2 КА. На том же рисунке горизонтальной штриховкой представлены запросы на проведение СС с КА. Как видно, количество планируемых сеансов может быть меньше числа КА, потенциально находящихся в ЗРВ.

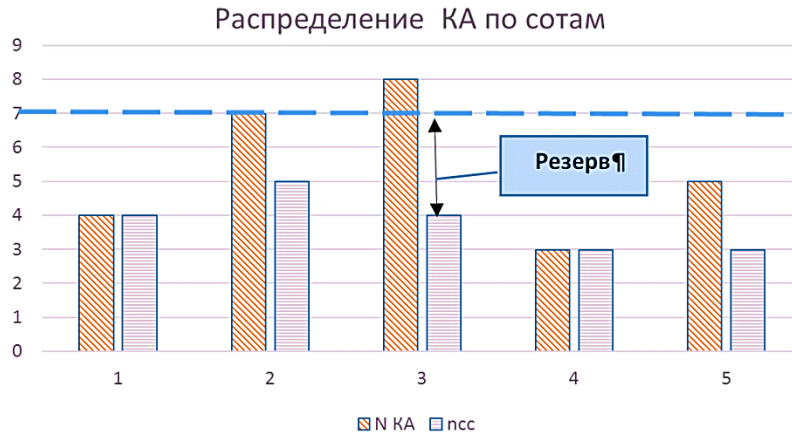


Рис. 2. Возможное распределение космических аппаратов по сотам

В силу того, что описанный процесс является случайным, возникает задача оценивания вероятности выполнения СС с КА из орбитальной группировки размерностью  $N$  группой СР размерностью  $M$  при условии, что каждый СР обладает ограниченной пропускной способностью, а сами сеансы должны пройти в директивное время. Иначе говоря, нужно обеспечить информационный обмен между центром управления полётом (ЦУП) и каждым КА с использованием КСР в соответствии с индивидуальным ТЦУ, определяющим количество сеансов в сутки и время их проведения, зависящее от программы полёта КА, выполнения целевых задач, технического состояния КА и других факторов. При этом в общем случае ТЦУ по разным КА может варьироваться в каждые сутки и является случайным.

Рассмотрим данный вопрос более подробно. Отметим, что сегодняшний расчёт КСР независимо от орбиты размещения СР – ГСО, средние или низкие орбиты, базируется на основе прямой геометрической видимости СР – КА, обеспечивающей требуемый интервал связи на допустимой дальности с допустимой радиальной скоростью при условии обеспечения требуемого энергетического потенциала для заданного отношения сигнал/шум и вероятности битовой ошибки. При этом предполагается, что сеансы проводятся при каждом попадании КА в ЗРВ СР. Однако на практике требуемое число  $n_{cc}$  СС для одного КА определяется его ТЦУ и может быть меньше числа  $N_{зрв}$  потенциальных ЗРВ. Так как  $N_{зрв} > n_{cc}$ , то  $n_{cc} = K_{cc} N_{зрв}$ , где  $K_{cc}$  – доля СС в общей (суммарной) ЗРВ в фиксированный момент времени. Возможны различные варианты расчёта приведённого показателя, например,  $K_{cc} = t_{cc}/t_{зрв}$  или  $K_{cc} = t_{cc}/t_{сут}$ , где  $t_{cc}, t_{зрв}$  – суммарное время СС и ЗРВ для КА,  $t_{сут}$  – длительность суток.

Известно, что для каждого КА осуществляется планирование распределения СС по аналогии с организацией СС наземным комплексом управления, исходя из запросов МОГ и возможностей КСР. Пусть каждый КА должен быть обслужен в соответствии с ТЦУ. Ежедневно на борт каждого  $i$ -го КА необходимо передать определённый объём управляющей информации  $V_{уп}^i$  и принять объём контрольной информации  $V_{кнт}^i$ . Информация передаётся во время СС  $i$ -го КА с  $j$ -м средством управления этим КА (орбитального или наземного) длительностью  $\tau_{ji}$  со скоростью  $R_{ji}$ . Тогда объём информации, переданный за СС  $j$ -м средством  $V_i = \sum_{i=1}^m \tau_{ji} R_{ji}$ , при этом длительность СС  $\tau_{ji} < \tau_{ji}^{зрв}$  – времени геометрической ЗРВ, которое равно  $\tau_{ji}^{зрв} = \tau_{ji}^{сл} + \tau_{ji}$ , где  $\tau_{ji}^{сл}$  – служебный ин-

тервал времени для установления связи, синхронизации сигналов и других служебных операций с  $i$ -м КА.

Учитывая то, что скорости передачи управляющей информации ЦУП – КА, и контрольной КА – ЦУП различны, как правило  $R_{ji}^{\text{упр}} < R_{ji}^{\text{кнт}}$ , объём передаваемой информации за  $K$  сеансов связи для  $i$ -го КА оценим как

$$V_{\text{упр}}^i = \sum_{j=1}^K \tau_{ij}^{\text{упр}} R_{ij}^{\text{упр}} \quad \text{и} \quad V_{\text{кнт}}^i = \sum_{j=1}^K \tau_{ij}^{\text{кнт}} R_{ij}^{\text{кнт}}.$$

Тогда  $\tau_{ji} = \max(\tau_{ji}^{\text{упр}}, \tau_{ji}^{\text{кнт}})$ , так как процессы обмена информацией ЦУП – КА и КА – ЦУП, как правило, происходят одновременно.

Если известны ЗРВ группировки СР, то при условии, что группировка СР «стационарна», а КА движутся относительно СР, схема взаимодействия может выглядеть следующим образом (рис. 3). Как видно из приведённого рисунка, часть СС полностью вписывается в интервалы ЗРВ, а некоторые из них выходят за пределы интервалов. Представим вероятность совпадения времени проведения СС с интервалами ЗРВ как вероятность выполнения ТЦУ за сутки следующим образом:

$$P_{\text{ЗРВ}} = \frac{S(\Delta\tau_j^i = 0)}{S_{\text{ТЦУ}}},$$

где  $S(\Delta\tau_j^i = 0)$  – число СС, в которых интервал проведения СС полностью вписывается в интервал ЗРВ, т.е.  $\tau_i^{\text{СС}} \subset \tau_j^{\text{ЗРВ}}$ ,  $S_{\text{ТЦУ}}$  – общее число сеансов ТЦУ за сутки (планируемое).

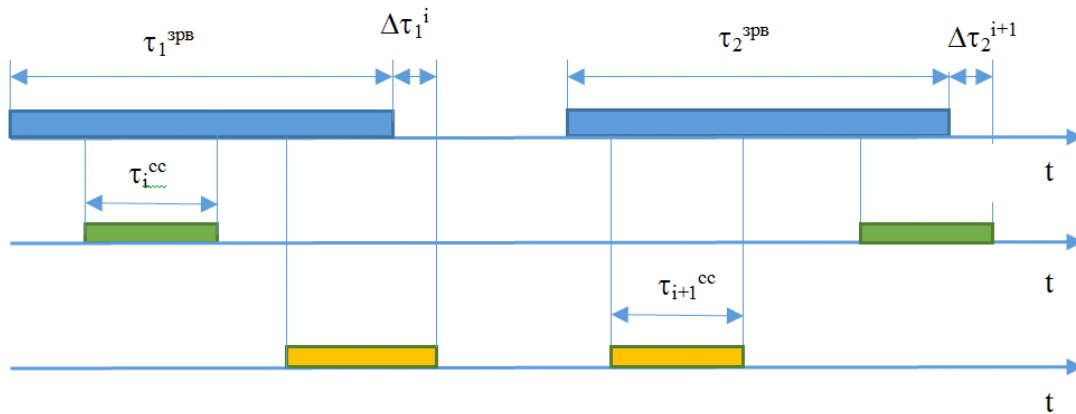


Рис. 3. Схема взаимодействия спутника-ретранслятора с космическим аппаратом

Космическая система ретрансляции, рассматриваемая как СМО, относится к классу многоканальных СМО без ожидания с отказами [8]. Основными параметрами таких систем являются следующие: интенсивность заявок  $\lambda = 1/t_{\text{заявки}}$  [ед/мин], где  $t_{\text{заявки}}$  – интервал между входами КА в ЗРВ СР; интенсивность обслуживания  $\mu = 1/t_{\text{обсл}}$  [ед/мин],

где  $t_{\text{обсл}}$  – среднее время обслуживания заявки КА в ЗРВ СР. Тогда параметр СМО, определяющий загрузженность системы, можно записать в виде  $\alpha = \lambda / \mu$ .

Примем, что каждая заявка обслуживается только одним каналом. Тогда среднее число заявок  $\lambda_0$ , обслуживаемых в единицу времени, – это произведение среднего числа занятых каналов  $k_{\text{ср}}$  на плотность потока обслуживания (интенсивность)  $\lambda_0 = \mu k_{\text{ср}}$ , где  $k_{\text{ср}}$  – среднее число занятых каналов обслуживания из общего числа каналов СР [ед].

Вероятность обслуживания произвольно выбранной заявки

$$P_{\text{обсл}} = \lambda_0 / \lambda = \mu k_{\text{ср}} / \lambda = k_{\text{ср}} / \alpha ,$$

а среднее число занятых каналов  $k_{\text{ср}} = \alpha P_{\text{обсл}} = P_{\text{обсл}} \lambda / \mu$ .

Если канал занят обслуживанием заявки, то, задаваясь значениями общего числа каналов  $n$ , интенсивностями  $\lambda$  и  $\mu$ , при вероятности занятости канала  $P_{\text{зан}}$  можно по известным соотношениям вычислить вероятность обслуживания  $P_{\text{обсл}}$  и среднее число занятых каналов  $k_{\text{ср}}$ :

$$k_{\text{ср}} = n P_{\text{зан}} , \text{ где } P_{\text{зан}} = \left( P_{\text{обсл}} \frac{\lambda}{\mu} \right) / n .$$

Тогда, если задано  $R$  сот СР, в каждой из которых обслуживается  $k_{\text{ср}}$  КА, в сутки КА совершают  $m$  витков, всего аппаратов  $N$ , согласно ТЦУ должно быть выполнено  $q$  СС, и общее число планируемых согласно ТЦУ сеансов  $N q$ , а проведённых реально за сутки  $k_{\text{ср}} R m$ , то условие

$$k_{\text{ср}} R m \geq N q \tag{1}$$

является условием обслуживания всей орбитальной группировки КА системой СР и выполнения запланированных ТЦУ для всех КА.

При этом в случае неучёта специфики ТЦУ при планировании СС на каждом витке при нахождении в ЗРВ СР, условие обслуживания будет выглядеть следующим образом:

$$k_{\text{ср}} R m \geq N m \text{ или } k_{\text{ср}} R \geq N . \tag{2}$$

Сравнение условий (1) и (2) показывает, что выигрыш по числу сеансов составляет  $m/q$ .

Как видно, реальная пропускная способность  $k_{\text{ср}} R m$  определяется как числом СР и витков КА, так и в первую очередь возможностями каждого СР по реализации среднего числа занятых каналов  $k_{\text{ср}}$ , зависящего в свою очередь от общего числа каналов  $n$ :

$$k_{\text{ср}} \geq (N q) / (R m) .$$

Указанные требования позволяют оценить среднее число занятых каналов  $k_{\text{ср}}$  с учётом заданных параметров СМО и требований ТЦУ.

Примем, что обслуживаются только те заявки, которые соответствуют требованиям  $\tau_i^{\text{ср}} \subset \tau_j^{\text{ЗРВ}}$ , иначе в этом случае заявка переносится на следующую ЗРВ и далее. При этом время обслуживания заявки увеличивается на время ожидания  $t_{\text{ож}} = n \Delta t_{\text{ЗРВ}}$ , где  $\Delta t_{\text{ЗРВ}}$  – интервал времени между соседними ЗРВ СР,  $n$  – число переносов.

Количество таких переносов определяется биномиальным законом распределения

$$P(x = m) = \binom{m}{n} p^m q^{n-m},$$

где  $p$  – вероятность события, в нашем случае  $P_{\text{ЗРВ}}$ ,  $q = 1 - P_{\text{ЗРВ}}$  – вероятность обратного события.

Математическое ожидание числа зон определяется как произведение  $n p$ , или в нашем случае  $R P_{\text{ЗРВ}}$ , а среднее время ожидания соответственно

$$t_{\text{ож}}^{\text{ср}} = R P_{\text{ЗРВ}} \Delta t_{\text{ЗРВ}}.$$

Тогда общее время обслуживания определяется как  $t_{\text{обсл}}^{\text{общ}} = t_{\text{обсл}} + t_{\text{ож}}^{\text{ср}}$ .

Как видно, общее время обслуживания возрастает, что приводит к изменению интенсивности обслуживания  $\mu$  с учётом ТЦУ, при этом  $\mu_{\text{ТЦУ}} < \mu$ , и соответствующему изменению параметров всей КСР как СМО.

Несмотря на свою простоту, приведённые соотношения позволяют решать следующие задачи:

- 1) оценка количества СР для управления МОГ заданной размерности при известных ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) и структуру ТЦУ КА с заданной вероятностью обслуживания;
- 2) оценка количества КА МОГ для управления через группу СР заданной размерности при известных ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) и структуру ТЦУ КА с заданной вероятностью обслуживания;
- 3) оценка пропускной способности СР (число каналов) для управления МОГ заданной размерности при известном числе СР и ограничениях на структуру ТЦУ КА с заданной вероятностью обслуживания;
- 4) оценка структуры ТЦУ КА для управления МОГ заданной размерности при известном числе СР и ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) с заданной вероятностью обслуживания;
- 5) оценка текущей вероятности обслуживания при управлении МОГ заданной размерности для известного количества СР и ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) и структуру ТЦУ КА.

Для оценки возможности управления КА из состава орбитальной группировки через СР рассмотрим пример для следующих исходных данных:  $t_{\text{заявки}} = 1$  мин, продолжительность обслуживания  $t_{\text{обсл}} = 5$  мин и, с учётом необходимости перехода в другую ЗРВ, из за требований ТЦУ и занятости каналов  $t_{\text{обсл}} = 10, 15$  мин при базовом числе каналов СР – 5, 10, 20. Результаты расчётов приведены на рис. 4, 5. Анализ приведённых графиков свидетельствует о необходимости увеличения числа потенциально возмож-

ных каналов обслуживания как основного влияющего фактора и сокращении времени обслуживания каждой заявки, что определяется объёмом и скоростью передачи и информации.

Рост числа каналов обслуживания возможен за счёт реализации технологий многостанционного доступа, к числу которых относят следующие варианты разделения каналов: временной, частотный, кодовый, пространственный, поляризационный и комбинированный. Теоретические аспекты подобных технологий достаточно хорошо исследованы [4; 9], однако возникает вопрос их практической реализации. Как показано в работе [2], существующая МКСР не даёт возможности управления МОГ.



Рис. 4. Оценка вероятности обслуживания заявок и коэффициента занятости каналов



Рис. 5. Оценка среднего числа занятых каналов

Представляется, что для КСР на ГСО актуален комбинированный подход многостанционного доступа, основанный на пространственном, частотном и кодовом разделении каналов управления КА, что позволяет значительно повысить общую производительность системы и обеспечить управление вновь создаваемыми МОГ. Для геостационарной КСР такой подход при использовании многолучевой антенной систе-



мы, например АФАР, и методов модуляции, основанных на ортогональной кодовой манипуляции/кодовом уплотнении, обеспечивает управление более чем 6 КА на один луч при максимальной скорости передачи 512 кбит/с, с соответствующим возрастанием количества одновременно управляемых КА при снижении требований к скорости передачи. При этом реальное число управляемых КА будет определяться параметрами системы массового обслуживания.

### **Заключение**

Таким образом, исследованы особенности создания космической системы ретрансляции на низких и средних орбитах для управления многоспутниковой орбитальной группировкой. При этом такая система рассматривается как система массового обслуживания. Показано, что при расчёте параметров перспективной системы ретрансляции целесообразно учитывать структуру технологических циклов управления отдельных космических аппаратов, что позволяет снизить требования по числу каналов обслуживания.

### **Библиографический список**

1. Тимофеев Ю.А., Потюпкин А.Ю. Концептуальные вопросы создания системы управления перспективной орбитальной космической инфраструктурой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2024. Т. 11, № 3. С. 3-13.
2. Жодзишский А.И., Красков В.В., Леонов М.С., Рябогин Н.В. Оценка пропускной способности спутников-ретрансляторов типа «Луч» для управления низкоорбитальными КА в S-диапазоне частот // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2024. Т. 11, № 2. С. 60-70.
3. Селиванов А.С. Разработка и лётные испытания первого российского технологического наноспутника ТНС-0 № 1 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2, № 2. С. 74-90.
4. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учебное пособие. М.: ООО «Военный парад», 2010. 608 с.
5. Пичугин С.Б. Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 1 (742). С. 61-70. DOI: 10.18698/05361044-2022-1-61-70
6. Ватутин С.И., Гвардин Р.М., Курков И.К., Егорова Н.В. Межорбитальная система передачи данных для управления группировкой малых КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9, № 3. С. 65-75. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.65.75
7. 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
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей: учебное пособие. М.: Наука, 1973 г. 368 с.
9. Гарагуля А.С., Козинев И.А., Куликов В.С. Выбор структуры сигналов для группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с кодовым разделением каналов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2023. Т. 10, № 4. С. 82-93.

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES FOR THE CREATION OF A RELAY SYSTEM TO CONTROL A MULTI-SATELLITE ORBITAL CONSTELLATION

© 2025

- A. Yu. Potyupkin** Doctor of Science (Engineering), Professor, Senior Research Associate;  
JSC Russian Space Systems, Moscow, Russian Federation;  
[Avramenko.sv@spacecorp.ru](mailto:Avramenko.sv@spacecorp.ru)
- V. V. Kraskov** Deputy Chief of the Branch;  
JSC Russian Space Systems, Moscow, Russian Federation;  
[Kraskov.vv@spacecorp.ru](mailto:Kraskov.vv@spacecorp.ru)
- S. A. Yakhutin** Director of Projects;  
JSC Russian Space Systems, Moscow, Russian Federation;  
[Yakhutin.sa@spacecorp.ru](mailto:Yakhutin.sa@spacecorp.ru)
- S. V. Avramenko** Candidate of Science (Engineering), Head of the Bureau;  
JSC Russian Space Systems, Moscow, Russian Federation;  
[Avramenko.sv@spacecorp.ru](mailto:Avramenko.sv@spacecorp.ru)

The paper shows the relevance of a space relay system when creating multi-satellite orbital constellations of spacecraft. The parameters of an advanced space relay system for controlling a multi-satellite orbital constellation of spacecraft are studied taking into account the structure of the spacecraft technological control cycle. A space relay system in low and medium Earth orbits is proposed as a dynamic telecommunication system to provide control of a large number of spacecraft. Necessary conditions are formulated to complete the spacecraft technological control cycle with a given quality including the realization of multiple access methods. The proposed space relay system is considered as a queuing system. An example of calculating the parameters of a geostationary space relay system in the case of using multi-beam antenna system as a queuing system is given.

*Relay system; queuing system; technological control cycle; multiple access; multi-satellite constellation*

---

**Citation:** Potyupkin A.Yu., Kraskov V.V., Yakhutin S.A., Avramenko S.V. Analysis of the possibilities for the creation of a relay system to control a multi-satellite orbital constellation. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 1. P. 45-55. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-45-55

### References

1. Timofeev Yu.A., Potyupkin A.Yu. Conceptual issues of creating a control system for advanced orbital space infrastructure. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2024. V. 11, no. 3. P. 3-13. (In Russ.)
2. Zhodzishsky A.I., Kraskov V.V., Leonov M.S., Ryabogin N.V. Estimation of throughput capacity of «Luch» relay satellites to control low orbit spacecraft in S-band frequencies. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2024. V. 11, no. 2. P. 60-70. (In Russ.)
3. Selivanov A.S. Development and flight testing of first Russian technological nano-satellite TNC-0 № 1. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2015. V. 2, no. 2. P. 74-90. (In Russ.)
4. Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. *Sputnikovye seti svyazi: uchebnoe posobie* [Satellite communication networks]. Moscow: OOO «Voennyi Parad» Publ., 2010. 608 p.
5. Pichugin S.B. Simplest flow queuing models for LEO satellite system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021. No. 1 (742). P. 61-70. (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2022-1-61-70
6. Vatutin S.I., Gvardin R.M., Kurkov I.K., Egorova N.V. Inter-orbital data transfer system for small spacecraft constellation control. *Rocket-Space Device Engineering and*

*Information Systems*. 2022. V. 9, no. 3. P. 65-75. (In Russ.). DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.65.75

7. Potyupkin A.Yu., Panteleymonov I.N., Timofeev Yu.A., Volkov S.A. Control of multi-satellite orbital constellations. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2020. V. 7, no. 3. P. 61-70. (In Russ.). DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70

8. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey: uchebnoe posobie* [Probability theory. Manual for technical schools]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 368 p.

9. Garagulya A.S., Kozinov I.A., Kulikov V.S. Signal structure for group control of space vehicles of a multi-satellite space system with code division of channels. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2023. V. 10, no. 4. P. 82-93. (In Russ.)