РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2025, том 12, выпуск 2, с. 16–31

#### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.314.5 EDN ZTHGZX

# К вопросу создания космической системы ретрансляции для управления многоспутниковой орбитальной группировкой

#### **А. Ю. Потюпкин**, *д. т. н., проф., potyupkin\_in@spacecorp.ru АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

#### **В. В. Красков**, kraskov.vv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследуются вопросы создания космической системы ретрансляции для управления многоспутниковой орбитальной группировкой как многоагентной системой КА, порождающей множество заявок на реализацию индивидуальных технологических циклов управления КА. Система ретрансляции рассматривается как система массового обслуживания, для успешного функционирования которой необходима реализация технологий многостанционного доступа. Исследуются характеристики системы и предлагаются варианты модернизации существующей отечественной космической системы ретрансляции.

В предлагаемой авторами модели модернизации предполагается использовать в качестве антенны спутников-ретрансляторов многолучевую антенную систему (АФАР или многорупорная система) с частичным перекрытием зон радиовидимости в направлении КА, в диапазоне высот круговых орбит от 400 км до 2000 км. Для обратного канала предлагается использовать модуляцию BPSK/QPSK с ортогональной кодовой манипуляцией и расширением спектра.

Авторами произведена оценка теоретически достижимой скорости обслуживания КА при многостанционном доступе в 128–256 кБит/с и общей производительности системы.

Практическая реализация рассмотренных в статье предложений предполагает поэтапную модернизацию наземных средств для формирования сигналов с требуемыми сигнально-кодовыми конструкциями, модернизацию спутников-ретрансляторов с установкой многолучевой антенной системы и осуществления обработки сигналов на борту спутников-ретрансляторов.

**Ключевые слова:** космическая система ретрансляции, многоспутниковая орбитальная группировка, система массового обслуживания, многостанционный доступ

Для цитирования: Потюпкин А. Ю., Красков В. В. К вопросу создания космической системы ретрансляции для управления многоспутниковой орбитальной группировкой. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы.* 2025. Т. 12. № 2. С. 16–31.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2025, том 12, выпуск 2, с. 16–31

#### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

# On the Issue of a Space Relay System Concept for Controlling a Multi-Satellite Orbital Constellation

**A. Yu. Potyupkin**, Dr. Sci. (Engineering), Prof., potyupkin\_in@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

#### V. V. Kraskov, kraskov.vv@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper studies the issues of a space relay system concept for controlling a multi-satellite orbital constellation as a multiagent spacecraft system generating many applications for the implementation of individual technological spacecraft control cycles. The relay system is considered as a queuing system, for the successful operation of which the implementation of multi-station access technologies is necessary. The characteristics of the system are investigated and options for upgrading the existing domestic space relay system are proposed.

In the modernization model proposed by the authors, it is assumed that an active electronically scanned array (AESA or multihorn system) with partial overlap of radio coverage areas in the direction of spacecraft is used as an antenna for relay satellites, in the range of altitudes of circular orbits from 400 km to 2000 km. For the return channel, it is proposed to use BPSK/QPSK modulation with orthogonal code manipulation and spread spectrum.

The authors have estimated the theoretically achievable spacecraft service rate with multiple access of 128-256 kbit/s and the overall system performance.

Practical implementation of the proposals considered in the paper involves a step-by-step modernization of ground-based facilities for generating signals with the required signal-code structures, modernization of relay satellites with the installation of a multibeam antenna system and the implementation of signal processing onboard the relay satellites.

Keywords: space relay system, multi-satellite orbital constellation, queuing system, multi-station access

For citation: Potyupkin A. Yu., Kraskov V. V. On the Issue of a Space Relay System Concept for Controlling a Multi-Satellite Orbital Constellation. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 2. P. 16–31. (in Russian)

## Введение

Создание космической системы ретрансляции (КСР) для управления многоспутниковой орбитальной группировкой (МОГ) 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 ее 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 ДЗЗ, и в силу этого не является экономически рентабельной». 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.

## Общие замечания

Сегодняшняя технология реализации ретрансляционного режима основана на директивном планировании и предполагает установление канала информационного обмена СР–КА в заданное время. Например, применение отечественной многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) для передачи информации с МКС или на этапе выведения ракет космического назначения (РКН) предполагает априорное планирование взаимодействия СР с МКС или РКН и наземными комплексами. При этом возможности существующей системы имеют существенные ограничения, а сама МКСР не предназначалась и не способна обеспечивать управление многоспутниковыми орбитальными группировками [2].

Анализ ретрансляционных технологий зарубежных систем свидетельствует о схожести подходов директивного планирования для КСР, развернутых на геостационарной орбите (ГСО). Вместе с тем использование для ретрансляции спутниковых систем связи на низких орбитах (НО), в том числе и опыта отечественного ТНС-0 разработки АО «РКС», позволяет сделать вывод о возможности исследования систем ретрансляции как динамических телекоммуникационных систем с применением элементов теории массового обслуживания [3]. Специалисты отмечают, что современные космические системы связи должны рассматриваться с учетом известной модели взаимодействия открытых систем (OSI) 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].

Данное обстоятельство обусловлено тем, что 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 функционала ААА (Authorization-Authentication-Accounting) на наземной станции. При этом для оценки характеристик межспутниковых трактов создан сценарий поступления пакетов сообщений от группы межспутниковых трактов к одному абонентскому тракту и разработаны соответствующие аналитические модели 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 учета специфики функционирования КСР как сложных динамических технических систем и соответствующих влияющих факторов.

Кроме того, 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 учетом 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, причем их пространственно-временное распределение случайно, а отказы приводят к возрастанию интенсивности СС.

В связи с этим целесообразно определиться с выбором концептуальной основы создания КСР и оценки ее характеристик как СМО. 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 космических "сот" и оснащенные бортовой аппаратурой для организации связи как с абонентами, так и с соседними базовыми станциями и наземной инфраструктурой. Остальные КА МОГ выступают в качестве абонентов, оснащенных модемами сети, они регистрируются при нахождении в зоне действия конкретной "соты" и пользуются ее 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 сети и создание сети "базовых станций-ретрансляторов" на основе выбранных КА внутри многоспутниковой группировки».

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 путем излучения пилотсигнала (рис. 1).



Рис. 1. Пример организации КСР на основе орбитальных сот

Fig. 1. Example of a space relay system organization based on orbital cells

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 оранжевым цветом представлено возможное распределение нахождения КА в различных сотах 1–5. Если известна пропускная способность каждой соты — количество КА, одновременно потенциально обслуживаемых в соте, в частности на приведенном рисунке по 7 КА, то можно выделить соты с резервом и перегруженные. Например, сота 3 перегружена на 1 КА, 1, 4, 5 имеют резерв соответственно 3, 4, 2 КА. На том же рисунке серым цветом представлены запросы на проведение СС с КА.



Рис. 2. Возможное распределение КА по сотам Fig. 2. Possible SC distribution by cells

Как видно, количество планируемых сеансов может быть меньше числа КА, потенциально находящихся в ЗРВ.

Постановка задачи. В силу того, что описанный процесс является случайным, возникает задача оценивания вероятности выполнения СС с КА из орбитальной группировки размерностью N группой СР размерностью М при условии, что каждый СР обладает ограниченной пропускной способностью, а сами сеансы должны пройти в директивное время. Иначе говоря, нужно обеспечить информационный обмен ЦУП-КА с каждым КА с использованием КСР в соответствии с индивидуальным ТЦУ, определяющим количество сеансов в сутки и время их проведения, зависящее от программы полета 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 расчет КСР независимо от орбиты размещения СР–ГСО, СО или НО, базируется на идее прямой геометрической видимости СР–КА, обеспечивающей требуемый интервал связи на допустимой дальности с допустимой радиальной скоростью при условии обеспечения требуемого энергетического потенциала для заданного соотношения С/Ш и вероятности битовой ошибки. При этом предполагается что сеансы проводятся при каждом попадании КА в ЗРВ СР. Однако на практике требуемое число  $n_{\rm cc}$  СС для одного КА определяется его ТЦУ и может быть меньше числа  $N_{\rm 3DB}$  потенциальных ЗРВ:

$$N_{
m 3pb} > n_{
m cc},$$
 поэтому  $n_{
m cc} = K_{
m cc} N_{
m 3pb},$ 

где  $K_{\rm cc}$  — доля СС в общей (суммарной) ЗРВ в фиксированный момент времени. Возможны различные варианты расчета приведенного показателя, например  $K_{\rm CC} = \frac{t_{\rm cc}}{t_{\rm 3pB}}$  или  $K_{\rm CC} = \frac{t_{\rm cc}}{t_{\rm cyT}}$ , где  $t_{\rm cc}$ ,  $t_{\rm 3pB}$  — суммарное время СС и ЗРВ для КА,  $t_{\rm сут}$  — длительность суток.

Известно, что для каждого КА осуществляется планирование распределения СС по аналогии с НКУ исходя из запросов МОГ и возможностей КСР. Пусть каждый КА должен быть обслужен в соответствии с ТЦУ. Ежесуточно на борт каждого *i*-го КА необходимо передать определенный объем информации управляющей  $V^i_{
m ynp.}$  и принять объем контрольной информации V<sub>кнт.</sub>. Информация передается во время радиоконтакта с *i*-м КА длительностью  $au_{i,i}$  со скоростью  $R_{i,i}$ , где j — номер средства обмена информацией с КА (орбитального или наземного). Тогда объем информации переданный за сеанс *j*-м средством  $V_j = \sum_{i=1}^m \tau_{j,i} \times$  $\times R_{j,i}$ , при этом  $au_{j,i} < au_{j,i}^{
m 3pB}$  — времени геометрической ЗРВ, которое равно  $\tau_{j,i}^{\text{зрв}} = \tau_{j,i}^{\text{сл}} + \tau_{j,i}$ , где  $\tau_{j,i}^{\text{сл}} - \text{служебный интервал времени установления}$ связи, синхронизации и других служебных операций с *i*-м КА.

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

$$V_{i}^{\rm ynp.} = \sum_{j=1}^{K} \tau_{j,i}^{\rm ynp.} R_{j,i}^{\rm ynp.} \quad \text{if} \quad V_{i}^{\rm kht.} = \sum_{j=1}^{K} \tau_{j,i}^{\rm kht.} R_{j,i}^{\rm kht.}.$$

Тогда  $\tau_{j,i} = \max(\tau_{j,i}^{\text{упр.}}, \tau_{j,i}^{\text{кнт.}})$ , 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 приведенного рисунка, часть СС полностью вписывается в интервалы ЗРВ, а некоторые



Рис. 3. Схема взаимодействия СР с KA Fig. 3. Scheme of interaction between a RS and a SC

из них выходят за пределы интервалов. Представим вероятность совпадения времени проведения СС с интервалами ЗРВ как вероятность выполнения ТЦУ за сутки:

$$P_{
m 3pb} = S(\Delta au_j^i = 0)/S_{
m tuy},$$

где  $S(\Delta \tau_j^i = 0)$  — число СС, в которых интервал проведения СС полностью вписывается в интервал ЗРВ, т. е.  $\tau_i^{cc} \subset \tau_j^{\rm 3pB}$ ,  $S_{\rm тиу}$  — общее число сеансов ТЦУ за сутки (планируемое).

Космическая система ретрансляции, рассматриваемая как система массового обслуживания (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; k — число каналов обслуживания СР [ед]. Отсюда параметр загруженности СМО  $\alpha = \lambda/\mu$ .

Примем, что каждая заявка обслуживается только 1 каналом. Тогда среднее число заявок  $\lambda_0$ , обслуживаемых в единицу времени, — это произведение среднего числа занятых каналов  $k_{\rm cp}$  на плотность потока обслуживания (интенсивность)

$$\lambda_0 = \mu k_{\rm cp}$$

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  $k_{\rm cp}=\alpha P_{\rm ofc.r.}==P_{\rm ofc.r.}\lambda/\mu.$ 

Если канал занят обслуживанием заявки, то можно установить соотношения между значениями общего числа каналов n, интенсивностями  $\lambda$  и  $\mu$ , средним числом занятых каналов  $k_{\rm cp.}$  и вероятностями обслуживания  $P_{\rm oбсл.}$  и занятости канала  $P_{\rm зан.}$ 

$$k_{\rm cp} = n P_{\rm Sah.}, \quad P_{\rm Sah.} = (P_{\rm obc.m.} \lambda/\mu)/n.$$

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

$$k_{\rm cp} \cdot R \cdot m \geqslant N \cdot q \tag{1}$$

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

При этом в случае неучета специфики ТЦУ при планировании СС на каждом витке при нахождении в ЗРВ СР условие обслуживания будет выглядеть так:

$$k_{cp} \cdot R \cdot m \ge N \cdot m$$
 или  $k_{cp} \cdot R \ge N.$  (2)

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

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

$$k_{\rm cp} \ge (N \cdot q)/(R \cdot m).$$

Указанные требования позволяют оценить среднее число занятых каналов  $k_{\rm cp}$  с учетом заданных параметров СМО и требований ТЦУ.

Примем, что обслуживаются только те заявки, которые соответствуют требованиям  $\tau_i^{\rm cc} \subset \tau_j^{\rm 3pB}$ , иначе в этом случае заявка переносится на следующую ЗРВ и далее. При этом время обслуживания заявки увеличивается на время ожидания  $t_{\rm ox} =$  $= n\Delta t_{\rm 3pB}$ , где  $\Delta t_{\rm 3pB}$  — 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  $P_{\rm зрв}, q = 1 - P_{\rm зрв}$  — вероятность обратного события.

Математическое ожидание числа зон определяется как  $n \cdot p$  или в нашем случае  $R \cdot P_{\rm 3pB}$ , а среднее время ожидания соответственно

$$t_{\text{ож}}^{\text{cp}} = R \cdot P_{_{3\text{DB}}} \cdot \Delta t_{_{3\text{DB}}}.$$

Тогда общее время обслуживания определяется как  $t_{obcn.}^{obщ} = t_{obcn.} + t_{ow}^{cp}$ . Как видно, оно возрастает, что приводит к изменению интенсивности обслуживания  $\mu$  с учетом ТЦУ, при этом  $\mu_{\pi\mu\gamma} < \mu$ , и соответствующему изменению параметров всей КСР как СМО.

Приведенные соотношения, несмотря на свою простоту, позволяют решать следующие задачи:

1. Оценить количество СР для управления МОГ заданной размерности при известных ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) и структуру ТЦУ КА с заданной вероятностью обслуживания.

2. Оценить количество 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. Оценить пропускную способность СР (число каналов) для управления МОГ заданной размерности при известном числе СР и ограничениях на структуру ТЦУ КА с заданной вероятностью обслуживания.

4. Оценить структуру ТЦУ КА для управления МОГ заданной размерности при известном числе СР и ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) с заданной вероятностью обслуживания.

5. Оценить текущую вероятность обслуживания при управлении МОГ заданной размерности для известного количества СР и ограничениях на пропускную способность СР (число каналов) и структуру ТЦУ КА.

**Пример.** Рассмотрим пример решения указанных задач для следующих исходных данных:  $t_{\text{заявки}} = 1$  мин, продолжительности обслуживания  $t_{\text{обсл.}} = 5$  мин и с учетом 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 расчетов приведены на рис. 4, 5. Анализ приведенных графиков свидетельствует о необходимости увеличения числа



Рис. 4. Оценка вероятности обслуживания заявок и коэффициента занятости каналов Fig. 4. Estimation of probability of requests servicing and channel occupancy rate



Рис. 5. Оценка среднего числа занятых каналов Fig. 5. Estimation of the average number of occupied channels

потенциально возможных каналов обслуживания как основного влияющего фактора и сокращении времени обслуживания каждой заявки, что определяется объемом и скоростью передачи информации.

Рост числа каналов обслуживания возможен за счет реализаций 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 применительно к существующей отечественной МКСР. Как показано в работе [2], существующая МКСР не дает возможности управления МОГ, но возможен ли вариант модернизации, при котором она появится?

# Предложения по модернизации МКСР

Предложения по модернизации МКСР основаны на построении и анализе модели командноинформационного обмена наземных средств (НС) с низкоорбитальной группировкой КА посредством геостационарных СР с использованием технологий многостанционного доступа в условиях непреднамеренных помех и ограниченного частотного ресурса [10–14]. Общая модель системы основывается на трех составляющих: модель планирования и организации СС, описанная ранее, в том числе рядом показателей качества обслуживания; баллистическая модель; модель физического канала связи (радиоканала).

В предыдущих разделах было показано, что модель планирования и организации СС можно рассматривать как СМО. При этом возможности реализации технологии управления оцениваются рядом показателей качества СМО, в том числе вероятностью обслуживания при управлении МОГ заданной размерности, зависящей, в свою очередь, от производительности физического канала связи.

В данном разделе рассматривается модель физического канала связи в совокупности с упрощенной баллистической моделью, достаточной для анализа, а также осуществляется оценка производительности или пропускной способности на физическом уровне с заданным качеством, а также «затрат» на достижение указанных значений.

Переходя к рассмотрению модели, отметим, что для организации обслуживания МОГ КА к системе необходимо предъявить ряд требований.

1. Наличие множественного доступа к/от КА в общем случае различных МОГ, но функционирующих по единому протоколу.

2. Совмещение малоскоростной целевой информации со служебной (командно-измерительной и телеметрической), с возможностью адаптируемой скорости передачи (гибкая нагрузка).

3. Надежное функционирование в условиях непреднамеренных помех, в том числе возникающих как вследствие работы радиоэлектронных средств (РЭС) собственных систем МОГ, так и прочих.

4. Экономное использование радиочастотного ресурса необходимого для функционирования физического канала системы МОГ.

5. Простая аппаратная часть КА (в основном MKA), — в первую очередь усилители мощности и антенно-фидерное устройство.

6. При необходимости физическая возможность доступа к любому КА МОГ практически в любой момент времени с учетом загруженности системы, а также тенденции к повышению автономности КА.

Модель физического канала связи. Модель физического канала связи представляет собой параметрическую модель командно-информационной малоскоростной радиолинии связи группы из N низкоорбитальных КА с НС посредством геостационарного СР, в зоне радиовидимости которого находится рассматриваемая группа КА, в прямом и обратном направлениях. Функционирование осуществляется в выделенных системе полосах частот.

Прямой канал представляет собой канал типа 1 к N, при котором должна быть обеспечена передача группового сигнала от одного источника, HC- с адресацией через CP, одновременно в N направлений — KA, находящихся в зоне радиовидимости CP. Обратный канал представляет собой канал типа N к 1. При этом должна быть обеспечена одновременная передача сигналов с N космических аппаратов на наземное средство связи через CP, в зоне радиовидимости которого находятся рассматриваемые KA.

Будем последовательно рассматривать следующие варианты функционирования КСР: с кодовым разделением каналов при малонаправленной антенне (МНА) СР; с частотным и кодовым разделениями при использовании на СР многолучевой антенны; комбинация кодового разделения с ортогональной манипуляцией сигнала при использовании на СР многолучевой антенны.

Основные параметры модели физического канала связи, а также некоторые параметры упрощенной баллистической модели, их диапазонные значения представлены в таблице. Оценка пропускной способности физического уровня с заданным качеством осуществляется путем расчета энергетического потенциала радиолинии  $\mathrm{KA}_i \leftrightarrow \mathrm{CP} \leftrightarrow \mathrm{HC}$  для  $i \in \{1, \ldots, N\}$  в наихудшем случае (N — количество KA при групповой связи), при заданных значениях параметров из таблицы, и сопоставления его с пороговым значением на приемной стороне. Также осуществляется оценка необходимой полосы частот, используемой системой.

Расчет энергетического потенциала приведем для обратного канала. Рассматриваемая модель также включает прямой радиоканал, однако изложение результатов анализа его производительности выходит за рамки настоящей статьи. Для метода модуляции QPSK с расширением спектра соотношение сигнал-шум радиолинии  $KA_i \rightarrow CP \rightarrow HC$  на входе демодулятора HC при групповой связи с N KA определяется следующим соотношением:

$$SNR_i^{OK} = -10 \cdot \log\left(\frac{C_i}{B} + \frac{1}{H1_i} + \frac{K_i}{H2_i}\right) \ [\texttt{AB}],$$

где  $C_i = 2 \cdot 10^{-(Lp_i/10)} \cdot \sum_{j=0}^{\lceil N/2 \rceil} 10^{(Lp_j/10)} - 1$  [раз], — коэффициент ухудшения *SNR* (относительно связи типа 1 к 1) в радиолинии KA<sub>i</sub>  $\rightarrow$  CP  $\rightarrow$   $\rightarrow$  HC из-за потерь при обработке группы сигналов от *N* KA в модеме HC;  $Lp_i$  [дБ] — потери распространения в свободном пространстве в радиолинии KA<sub>i</sub>  $\rightarrow$  CP; *B* [раз] — коэффициент расширения спектра;  $H1_i$  [раз] — энергетический потенциал радиолинии KA<sub>i</sub>  $\rightarrow$  CP;  $H2_i$  [раз] — энергетический потенциал радиолинии KA<sub>i</sub>  $\rightarrow$  CP;  $H2_i$  [раз] — энергетический потенциал радиолинии KA<sub>i</sub>  $\rightarrow$  CP;  $K_i = C_i + 1 + B/H1_i$  [раз] — коэффициент ретрансляционных потерь в радиолинии KA<sub>i</sub>  $\rightarrow$  CP  $\rightarrow$  HC.

Вначале рассмотрим случай, соответствующий характеристикам применяемой в настоящий момент времени системы ретрансляции МКСР. Отметим, что подробный анализ пропускной способности приведен в [5]. Здесь остановимся лишь на одном частном случае для сопоставления с последующими результатами.

На рис. 6 представлены результаты расчетов энергетического потенциала радиолинии  $KA_i \rightarrow MKCP \rightarrow HC$  при групповой передаче сигналов от N KA, находящихся в ЗРВ CP. KA осуществляют

## К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕТРАНСЛЯЦИИ

Nº	Параметр (обозначение), ед. изм.	Диапазон рассматриваемых значений
1	Высота геостационарной орбиты СР ( <i>H</i> ср), км	35 768 <sup>1)</sup>
2	Высота круговой орбиты КА (Нка), км	400–2000
Спутник-ретранслятор		
3	Тип антенны СР	Малонаправленная (МНА) <sup>2)</sup> /Многолучевая АФАР с частичным перекрытием зон радиовидимости лучей
4	Количество лучей антенны СР (Кл)	МНА: Кл = 1, АФАР: Кл = 7-19
5	Ширина диаграммы направленности (ДНА) луча антенны СР по уровню —3 дБ (βср), град.	МНА: 22 <sup>2)</sup> , АФАР: 5–10
6	Коэффициент усиления антенны (Ку_ср), дБ	МНА: 14,8 <sup>2)</sup> , АФАР: 22–28
7	Тип ретранслятора	Без обработки/С обработкой (регенерация)
KA		
8	Тип антенны КА	Всенаправленная (ВНА)/МНА
9	Ширина диаграммы направленности луча антенны КА по уровню $-3$ дБ ( $eta$ ка), град.	BHA: 170 MHA: 20–40
10	Коэффициент усиления антенны КА (Ку_ка), дБ	ВНА: 4 (в секторе углов ±40 град.) МНА: 9–15
11	Мощность передатчика КА (Рка_прд), Вт	5-15
12	Режим полета КА	Неориентированный/Ориентированный
Системные		
13	Скорость передачи информации (Vци), кБит/с	1-512
14	Требуемая вероятность ошибки на бит (Рош)	$10^{-5}/10^{-6}$
15	Метод модуляции	BPSK/QPSK с расширением спектра/ BPSK/QPSK с ортогональной кодовой манипуляцией и расширением спектра
16	Метод кодирования	R-S ( <i>n/m</i> )/Турбокод (1/2)
17	Используемый частотный ресурс в одном направлении (Пс), МГц	4–300
18	Оцениваемый средний уровень спектральной плотности мощностисистемных помех в полосе приема ( <i>N</i> п), дБВт/Гц	-200
Примечания: 1) В модели применены значения параметров геостационарных орбит трех СР, входящих в МКСР. 2) Значения характеристик МНА СР взяты из ТТХ антенного средства СР МКСР, функционирующего в S-диапазоне радиочастот.		

#### Таблица. Параметры модели командно-информационной малоскоростной радиолинии связи



Рис. 6. Расчет энергетического потенциала радиолинии  $KA_i \rightarrow MKCP \rightarrow HC$ Fig. 6. Calculation of the energy potential of the radio link  $SC_i \rightarrow MSRS \rightarrow GF$ 

передачу в ориентированном на СР режиме, посредством МНА и усилителя с относительно небольшой выходной мощностью. Прием на СР осуществляется так называемой антенной многостанционного доступа (МСД) с последующей ретрансляцией на штатные НС КИС. Расчет осуществлен для КА, находящихся на максимальном удалении от СР.

Представленные зависимости демонстрируют явное влияние дефицита энергетики полезного сигнала на приемной стороне, что накладывает ограничения на ширину его информационной полосы. При этом эффекты, связанные с мешающим влиянием группового сигнала при приеме на НС, выражены слабо, поскольку коэффициент расширения спектра при узких информационных полосах значителен. В данном случае он составляет не менее 30 дБ, при полосе передачи сигнала 16,384 МГц.

Общий результат — весьма скромные удельные (на один КА) характеристики производительности. Возможная скорость передачи составляет до 8 кБит/с, хотя на один СР одновременно могут осуществлять передачу вплоть до 256 КА. Тем не менее плохие характеристики удельной производительности, обусловленной энергетикой радиоканала, не позволяют реализовать технологию управления, при которой требуются бо́льшие скорости передачи телеметрической и тем более малоскоростной целевой информации.

Далее перейдем к рассмотрению модели, в которой проведена гипотетическая «модернизация» МКСР. В качестве антенны МСД применим многолучевую антенную систему многолучевую антенную систему (АФАР или многорупорная система) с частичным перекрытием зон радиовидимости в направлении КА, в диапазоне высот круговых орбит от 400 км до 2000 км.

Результаты расчетов, представленных на рис. 7, ожидаемо показывают явно возросшую энергетику сигнала на входе приемного тракта СР. Данное обстоятельство позволяет ощутимо увеличить информационные полосы передачи, но вместе с тем и влияние группового сигнала на прием вследствие уменьшающегося коэффициента расширения спектра.



Рис. 7. Энергетический потенциал радиолинии  $KA_i \rightarrow CP \rightarrow HC$  с применением на CP многолучевой антенны Fig. 7. Energy potential of the radio link  $SC_i \rightarrow RS \rightarrow GF$  with the use of a multi-beam antenna on the RS

Полоса передачи сигнала, как и в первом случае, 16,384 МГц. Однако здесь стоит отметить, что в данном случае оценка производительности осуществляется для группового обслуживания КА, находящимися в ЗРВ одного из лучей антенной системы СР. Предварительная оценка необходимого количества лучей с шириной ДНА, равной 5°, с частичным перекрытием зон радиовидимостей КА, находящихся в диапазоне круговых орбит от 400 км до 2000 км, составляет Кл = 19. Указанная группа ЗРВ образует кластер радиовидимости многолучевой антенной системы одного из СР. Таким образом, общее количество КА, одновременно обслуживаемых одним СР, при условии частотного разделения между лучами, в соответствии с рис. 7, может составлять  $19 \times 15 = 285$  КА на скорости 128 кБит/с. Дополнительно потребуем, чтобы частоты смежных областей радиовидимости, образуемых проекцией ЗРВ лучей соседних кластеров на орбитальную сферу КА, не пересекались. Тогда с учетом пространственного разнесения в первом приближении можно оценить количество одновременно обслуживаемых КА и общую полосу системы в обратном радиоканале при заданных ограничениях на удельную скорость передачи КА. Так, например, для скорости передачи информации 128 кБит/с общее количество одновременно обслуживаемых КА в обратном направлении  $3 \times K \pi \times L = 855$  КА, требуемая полоса системы не менее  $K \pi \times 2 \times F$ chip = 311,3 МГц. Уменьшить полосу системы возможно, например, за счет повторного использования частот внутри кластера, что, в свою очередь, приведет либо к уменьшению количества одновременно обслуживаемых КА, либо к уменьшению удельной скорости передачи.

Справедливости ради стоит отметить, что многолучевые антенные системы с применением АФАР достаточно дорогостоящий проект, поэтому как альтернативу можно рассмотреть возможность применения многорупорных антенных систем также с частичным перекрытием ЗРВ в направлении КА.

Одним из путей для увеличения производительности системы является использование различных структур сигналов, представляющих собой



МОДУЛЯТОР KA(i), i = 1, ..., L

Рис. 8. Схема формирования и приема сигнала BPSK/QPSK с ортогональной кодовой манипуляцией и расширением спектра

Fig. 8. Scheme of BPSK/QPSK signal formation and reception with orthogonal code manipulation and spread spectrum

комбинацию методов модуляции и кодирования. Для обратного канала остановимся на модуляции BPSK/QPSK с ортогональной кодовой манипуляцией и расширением спектра. Функциональная схема, поясняющая принцип формирования и приема сигнала, изображена на рис. 8.

В модуляторе КА исходный поток цифровой информации на скорости Vци кодируется (скорость n/m), затем поток подвергается ортогональной кодовой модуляции символов из k бит в одну из функций (последовательностей) из ортогонального базиса последовательностей длиной  $2^k$ . Указанная модуляция также осуществляет расширение спектра кодового потока в  $2^k/k$  раз. Далее осуществляется модуляция псевдослучайной последовательностью, представляющей собой «адрес» или «идентификатор» КА. На заключительном этапе осуществляется BPSK/QPSK-модуляция с переносом спектра в область высоких частот (BЧ).

На приемной стороне — демодуляторе HC — осуществляется перенос группы ВЧ-сигналов

от *L* КА в область видеосигналов (промежуточных частот ПЧ). Затем сигнал подвергается корреляционной обработке с целью селекции сигналов каждого КА из группы сигналов. Далее сигнал от каждого из КА демодулируется с сужением полосы. На заключительном этапе осуществляется декодирование с исправлением ошибок и выделение принимаемого цифрового потока информации от каждого из КА.

Результаты расчетов модели, в которой, помимо «модернизации» антенных средств на СР, рассмотренной ранее, для передачи сигнала используется описанная выше сигнально-кодовая конструкция (СКК), представленная на рис. 9, демонстрируют возросшую удельную скорость передачи по сравнению с предыдущим результатом.

Данный эффект обосновывается тем, что в СКК применен достаточно эффективный с энергетической точки зрения метод модуляции ортогональными функциями, одновременно участвующий в расширении спектра кодовой последовательности. Зависимость вероятности ошибки от порогового



Рис. 9. Энергетический потенциал радиолинии  $KA_i \rightarrow CP \rightarrow HC$  с применением на МКСР многолучевой антенны и модифицированной сигнально-кодовой конструкции

Fig. 9. Energy potential of the radio link  $SC_i \rightarrow RS \rightarrow GF$  with the use of a multi-beam antenna and modified signal-code design on the MSRS

потенциала соответствует энергетически эффективному методу MFSK. В этой связи нет необходимости в применении особо эффективных методов канального кодирования как в предыдущем случае, где применялось турбокодирование (1/2). В данном случае достаточно применения менее эффективного кода R-S с кодовой скоростью 0,8, но приводящего к незначительному увеличению шумовой полосы в 1,25 раза (в отличие от двукратного увеличения полосы в предыдущем случае). Требуемый пороговый потенциал указанной комбинации для  $P_{\rm out} = 10^{-5}$  примерно соответствует требуемому пороговому потенциалу при демодуляции сигнально-кодовой конструкции, рассмотренной в предыдущем случае. Также стоит отметить, что при примерно одинаковых полосах передачи в обеих моделях коэффициент расширения спектра кодовой последовательности при V ци = 256 кБит/с в предыдущей составляет 12 дБ, в рассматриваемой — 15 дБ.

Оценим результирующую производительность системы. Общее количество КА, одновременно обслуживаемых одним СР, при условии частотного разделения между лучами может составлять  $19 \times 11 = 209$  КА на скорости 256 кБит/с либо  $19 \times 32 = 608$  КА на скорости 128 кБит/с. Соответственно общая производительность системы при оговоренных выше условиях на пространственночастотное разделение может составлять 627 КА на скорости 256 кБит/с либо 1824 КА на скорости 128 кБит/с.

Практическая реализация рассмотренных предложений предполагает поэтапную модернизацию НС для формирования сигналов с требуемыми СКК, модернизацию СР с установкой многолучевой антенной системы и осуществления обработки сигналов на борту СР.

## Заключение

В настоящей статье исследована возможность модернизации МКСР для предоставления возможности управления МОГ путем комбинированного метода многостанционного доступа. При этом перспективная КСР для многоспутниковой орбитальной группировки КА должна рассматриваться как система массового обслуживания. Показано, что при расчете параметров такой системы целесообразно учитывать структуру ТЦУ отдельных КА, что позволяет снизить требования по числу каналов обслуживания.

Для КСР на ГСО комбинированный метод многостанционного доступа, основанный на пространственном, частотном и кодовом разделениях каналов, позволяет значительно повысить общую производительность системы и обеспечить управление и информационный обмен малоскоростной ЦИ с вновь создаваемыми МОГ. Следует все же учитывать, что реальное число управляемых КА будет определяться параметрами системы массового обслуживания.

#### Список литературы

- Тимофеев Ю.А., Потюлкин А.Ю. Концептуальные вопросы создания системы управления перспективной орбитальной космической инфраструктурой // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2024, т. 11, вып. 3. С. 3–13.
- 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, вып. 2. С. 60–70.
- Селиванов А.С. Разработка и летные испытания первого российского технологического наноспутника ТНС-0 №1 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 2. С. 74–90.
- Спутниковые системы связи. Учеб. пособие. 2-е изд., доп. / Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. М.: Военный парад, 2010. 608 с.
- Пичугин С.Б. Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы. Известия вузов // Машиностроение, 2022, № 1. С. 61–70.
- 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 технологии, 2022, т. 9, вып. 3. С. 65–75.
- 7. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками //

Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020, т. 7, вып. 3. С. 61–70.

- 8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Наука, 1973. 363 с.
- Гарагуля А. С., Козинов 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, вып. 4. С. 82–93.
- Бартенев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др. Спутниковая связь и вещание: Справочник. З-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997.
- Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ. / Под ред. В. В. Маркова. М.: Связь, 1979. С. 166–180.

- 12. *Lindsey W. C. and Symon M.K.* Telecommunication Systems Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 1973.
- Berrou C., Glavieux A. and Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes. IEEE Proc. of Int'l Conf. on Communications, Geneva, Switzerland, May, 1993 (ICC'93), pp. 1064–1070.
- 14. Bartee Th.C., Howard W. Sams Company, Data Communications, Network, and Systems, Indianapolis, Ind., 1985. P. 312.

Дата поступления рукописи в редакцию 17.01.2025 Дата принятия рукописи в печать 04.04.2025