

Управление орбитальным каналным ресурсом на основе немарковских приоритетных систем массового обслуживания.

Часть 1. Модель оперативного распределения

А.А. Ковальский^{1*}, Г.А. Митряев¹, А.В. Питрин¹

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

*Адрес для переписки: sake636@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.07.2021

Принята к публикации 09.08.2021

Ссылка для цитирования: Ковальский А.А., Митряев Г.А., Питрин А.В. Управление орбитальным каналным ресурсом на основе немарковских приоритетных систем массового обслуживания. Часть 1. Модель оперативного распределения // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 38–46. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-38-46

Аннотация: В работе проведен системный анализ процесса целевого функционирования спутниковой командно-ретрансляционной системы (СКРС) в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. Проведенный анализ перспектив развития подсистемы ретрансляции СКРС орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, позволил сделать вывод об особенностях этапа координационного планирования средств подсистемы ретрансляции, заключающихся в распределении орбитального каналного ресурса СКРС на основе немарковских приоритетных систем обслуживания. Получена модель оперативного распределения орбитального каналного ресурса подсистемы ретрансляции на основе приоритетных систем обслуживания, в которой, в отличие от известных моделей, время пребывания заявки в системе ограничено, сняты ограничения на вид распределения времени обслуживания заявок, а также получено выражение для вычисления начальных моментов распределения времени ожидания сообщений различных приоритетов. Использование модели позволяет оценить вероятность несвоевременной доставки информационных данных, а также обеспечить требуемые показатели качества обслуживания приоритетных потоков и за счет этого обеспечить требуемую связность и устойчивость СКРС в целом.

Ключевые слова: спутниковая командно-ретрансляционная система, оперативное распределение, орбитальный каналный ресурс, приоритетное обслуживание.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях существенно возрастает значение космических технологий в социальной, экономической и, особенно, военно-политической сферах жизни общества. Решение задач информационного обеспечения государственных структур из космоса осуществляется с использованием орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) различного целевого назначения, в том числе и КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Перспективная спутниковая командно-ретрансляционная система (СКРС), прототипом которой является многофункциональная космическая система ретрансляции «Луч», призвана решить задачу обеспечения профильных ведомств Российской Федерации информацион-

ными данными (ИД) в заданные сроки с требуемым качеством. Подсистема ретрансляции является составной частью СКРС, непосредственно реализующей функцию передачи высокоскоростных потоков ИД между абонентами системы. В состав подсистемы ретрансляции СКРС будут входить спутники-ретрансляторы (СР), находящиеся на геостационарной орбите, КА ДЗЗ, самолеты и беспилотные летательные аппараты, а также пункты приема информации (ППИ) различного типа [1].

Ключевым показателем качества функционирования подсистемы ретрансляции СКРС является показатель устойчивости. Устойчивость СКРС – это интегральный показатель, определяющий способность системы выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в ре-

зультате воздействия внутренних и внешних дестабилизирующих факторов, в том числе и в сложных условиях радиоэлектронной обстановки (РЭО). В качестве составной части устойчивости подсистемы ретрансляции СКРС принято рассматривать вероятность связности каждого информационного направления связи (ИНС), формируемого для передачи ИД, которая в свою очередь, напрямую зависит от своевременности доставки потоков ИД по каждому из участков каждого пути, входящего в ИНС. В настоящее время требуемая своевременность доставки ИД достигается за счет жесткого директивного планирования орбитального канального ресурса [2]. Под орбитальным канальным ресурсом в работе понимается совокупность спутниковых радиоканалов, организуемых для передачи ИД от источников (КА ДЗЗ) через КА связи и ретрансляции на ППИ, находящиеся на территории РФ, в том числе с использованием межспутниковых радиолиний. Планируемое увеличение численности ОГ КА ДЗЗ, а также невозможность заблаговременно учесть при оперативном планировании орбитального канального ресурса влияние РЭО на объекты СКРС ограничивает возможности используемого подхода к распределению орбитального канального ресурса на основе заблаговременного планирования. Поэтому особую актуальность приобретает разработка методов оперативной диспетчеризации потоков неоднородной информации в условиях ограниченного орбитального канального ресурса и сложной РЭО [3].

Таким образом, существует проблемная ситуация, заключающаяся в необходимости обеспечения требуемого уровня устойчивости подсистемы ретрансляции высокоскоростных потоков ИД от КА ДЗЗ и невозможностью на основе существующего научно-методического аппарата планирования орбитального канального ресурса СКРС обеспечить своевременную передачу запланированного объема ИД в условиях сложной РЭО [4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенное моделирование функционирования СКРС в сложных условиях РЭО позволило выявить особую значимость в обеспечении требуемого уровня устойчивости подсистемы ретрансляции, а также процедуры доступа к орбитальному канальному ресурсу нескольких абонентов, находящихся в зоне радиовидимости луча гибридно-зеркальной антенны (ГЗА), с учетом требований по своевременности связи [5–8].

Существенный вклад в обеспечение устойчивости подсистемы ретрансляции СКРС вносится за счет обеспечения своевременности доставки пакетов ИД в направлении КА ДЗЗ–КА СР–ППИ. При этом обоснована необходимость разработки дисциплины приоритетной диспетчеризации потоков

ИД, учитывающей жесткие требования по своевременности передачи всех видов информации с заданным качеством в установленные сроки [9].

Показателем качества выбран показатель устойчивости подсистемы ретрансляции СКРС. В соответствии с ГОСТ Р 53111 – 2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки» под показателем устойчивости СКРС понимается значение вероятности P_y своевременной доставки пакета по всем ИНС, организуемых подсистемой ретрансляции:

$$P_y = \left(1 - \prod_{j=1}^J (1 - P_{y_j}) \right) = \left(1 - \prod_{j=1}^J (1 - K_{Г_j} P_{св_j}) \right), \quad (1)$$

где $P_{y_j} = K_{Г_j} P_{св_j}$ – устойчивость j -го ИНС; $j = \overline{1, J}$;

$P_{св_j} = 1 - (1 - P_{QoS_j})(1 - P_{стр_j})$ – вероятность связности j -го ИНС, определяемая как вероятность того, что на заданном ИНС существует хотя бы один путь, по которому возможна передача требуемого объема информации с требуемым качеством обслуживания (QoS) $Q^{троб}$;

$K_{Г_j}$ – коэффициент готовности j -го ИНС, требуемое значение которого определяется руководящими документами ($K_{Г} = 0,995$);

$P_y^{троб} \geq 0,9$ – требуемый уровень устойчивости СКРС;

$P_{QoS_j} = \left(1 - \prod_{d=1}^{D_j} \left(1 - \prod_{z_{jd}=1}^{Z_{jd}} P_{z_{jd}}^{QoS} \right) \right)$ – вероятность качественной связности j -го ИНС, определяемую качеством обслуживания трафика; $d_j = \overline{1, D_j}$ – номер пути в j -м ИНС;

$z_{jd} = \overline{1, Z_{jd}}$ – номер элемента в d_j -м пути j -го ИНС; $P_{z_{jd}}^{QoS} = P_{z_{jd}}^{своевр}$ – вероятность своевременной доставки пакета ИД через z_{jd} -й элемент d_j -го пути j -го ИНС;

$P_{стр_j}$ – вероятность структурной связности j -го ИНС;

$P_{z_{jd}}^{раб. эл.}$ – вероятность работоспособного состояния z_{jd} -го элемента d -го пути j -го ИНС; $P_{z_{jd}}^{отк}$ – вероятность отказа z_{jd} -го элемента d -го пути j -го ИНС в сложных условиях РЭО:

$$P_{стр_j} = \left(1 - \prod_{d=1}^{D_j} \left(1 - \prod_{z_{jd}=1}^{Z_{jd}} P_{z_{jd}}^{раб. эл.} \right) \right);$$

$$P_{z_{jd}}^{раб. эл.} = \left(1 - P_{z_{jd}}^{отк} \right).$$

Особенностью реализации протоколов подсистемы ретрансляции СКРС для каналов спутниковой связи может быть наличие режима АСМ (*аббр. от англ. Adaptive Coding and Modulation*) для адап-

тивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в зависимости от отношения сигнал/шум+помеха (ОСШП) на входе приемника. Показателем ОСШП является отношение энергии на сигнальный символ к спектральной плотности аддитивного белого гауссовского шума, значение которого соответствует суммарному уровню воздействия естественных, так и аддитивных преднамеренных помех на канал связи. В качестве исходной РЭО принят показатель ОСШП 16,2 дБ, что соответствует наиболее благоприятным условиям. При ухудшении РЭО показатель ОСШП постепенно снижается до -2,35 дБ, что соответствует наиболее неблагоприятным условиям.

Режим ACM позволяет осуществлять гибкое регулирование параметрами кодирования и модуляции передатчика в зависимости от значения ОСШП на входе приемника при заданном уровне достоверности приема. При этом параметры кодирования и модуляции могут изменяться от кадра к кадру. Для достижения высокой спектральной эффективности в протоколе подсистемы ретрансляции СКРС предлагается использовать различные скорости кодирования FEC (аббр. от англ. Forward

Error Correction) при различных видах модуляции: QPSK, 8-PSK, 16-APSK и 32-APSK. Для защиты от ошибок приема сигналов возможно использовать перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок FEC. В протоколе подсистемы ретрансляции СКРС в качестве внутреннего кода предлагается использовать код LDPC, в качестве внешнего – код БЧХ (код Боуза – Чоудхури – Хоккенгема).

Таким образом, благодаря возможности адаптивного выбора вида модуляции и скоростей кодирования каналы могут работать в широком диапазоне значений ОСШП с показателем спектральной эффективности, близким к теоретически достижимому [10–12]. Так, канал связи подсистемы ретрансляции СКРС может работать при ОСШП от 2,4 до 16 дБ, при этом для этого канала доступны показатели эффективности спектра от 0,5 до 4,5 (бит/с)/Гц. Зависимость пропускной способности, выраженной количеством организуемых основных цифровых каналов (ОЦК), от адаптивного выбора вида модуляции и скорости кодирования для подсистемы ретрансляции СКРС приведены на рисунке 1.

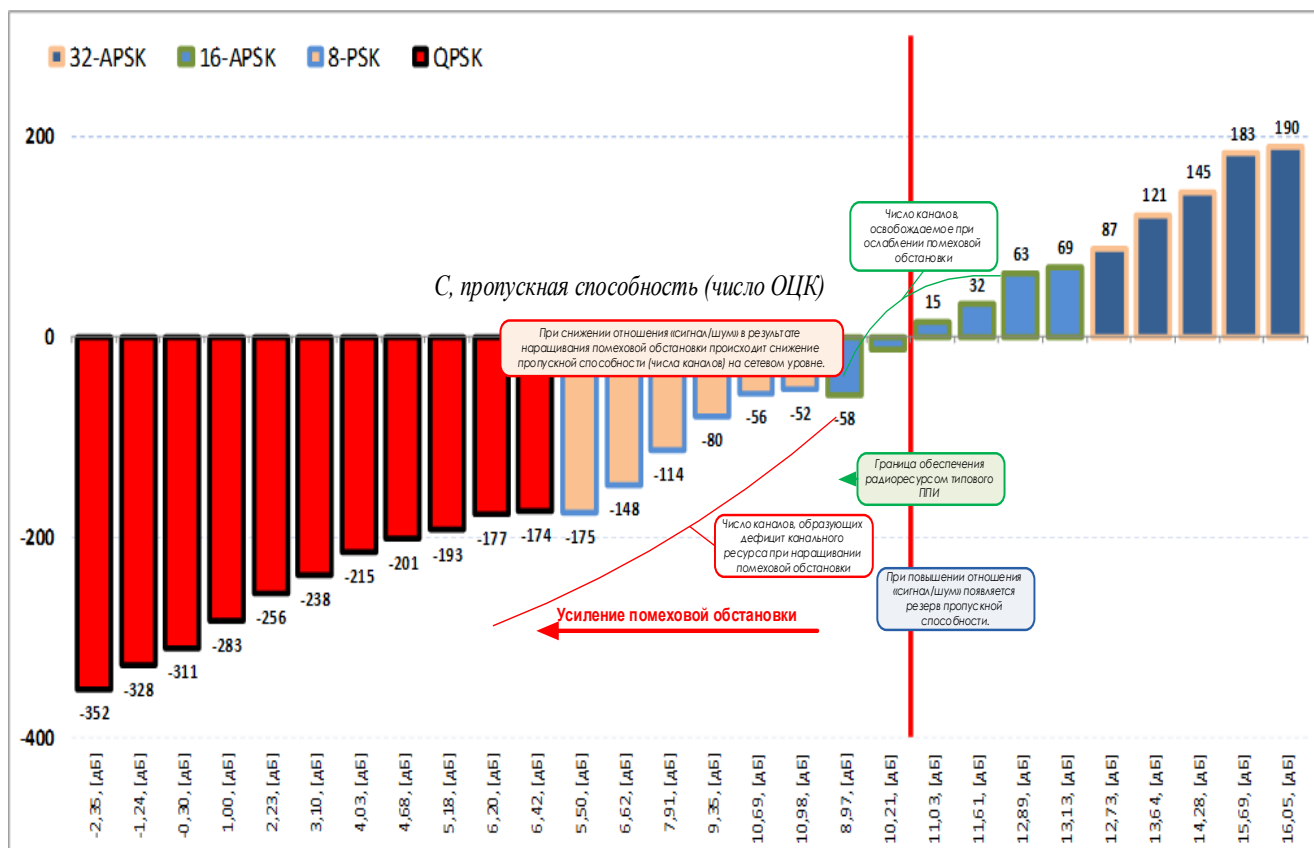


Рис. 1. Зависимость пропускной способности СКРС от отношения мощности сигнала к шуму (условий РЭО)

Fig. 1. Dependence of Throughput of SKRS on the Signal Power Relation to Noise (REO Conditions)

Распределение орбитального канального ресурса в настоящее время осуществляется по плану за- действования космических и наземных средств,

программа которого составляется и утверждается на сутки. Такой вариант распределения орбитального канального ресурса эффективно работает в

условиях небольшого количества функционирующих КА ДЗЗ. Однако перспективы развития ОГ КА ДЗЗ таковы, что уже к 2030 г. планируется возрастание ОГ в 2–3 раза, что существенно увеличит информационную нагрузку на подсистему ретрансляции СКРС.

В целях уменьшения влияния при изменении РЭО на антенну КА СР основной особенностью проектируемой системы должно стать применение многолучевой ГЗА, обеспечивающей пространственную селекцию космических радиолучей за счет оперативного отключения нестабильно работающих радионаправлений (лучей) при обнаружении мешающих радиоизлучений.

Отключение отдельных лучей при жестком планировании фактически приводят к «простою» системы на время перепланирования. Используемый в настоящее время алгоритм распределения ресурса не позволяет оперативно перераспределять потоки ИД.

Поэтому в работе основное внимание концентрируется на обеспечении устойчивости подсистемы ретрансляции СКРС за счет оперативного перераспределения орбитального канального ресурса для передачи потоков специальной информации в заданные сроки с заданным качеством. В этом случае задача обеспечения требуемого уровня устойчивости СКРС в условиях РЭО формализуется следующим образом.

Дано:

$A_{\text{кар}} = \{a_v^{\text{кар}}, v = \overline{1, N}\}$ – множество КА ретрансляции;

$B_v = \{b_{v\chi}, \chi = \overline{1, H}, v = \overline{1, N}\}$ – множество лучей ГЗА v -го КА ретрансляции;

$A_{\text{вр}} = \{a_{\mu}^{\text{вр}}, \mu = \overline{1, M}\}$ – множество КА ДЗЗ;

$C = \{c_{\lambda}, \lambda = \overline{1, L}\}$ – множество ППИ;

$D = \{d_{\gamma}, \gamma = \overline{1, G}\}$ – множество центров обработки информации;

$I(t) = \{I_j(t), j = \overline{1, J(t)}\}$ – множество ИНС, формируемых в текущий момент времени t ;

$S(t) = \langle T_{\text{кар}}(t), T_{\text{ппи}}(t), M_{\text{св}}(t), V_{\text{тр}}(t) \rangle$ – кортеж текущего состояния СКРС;

$M_{\text{св}}(t)$ – матрица связности системы СКРС, определяющая топологию;

$T_{\text{кар}}(t) = [t_{v\mu\chi}^{\text{кар}}, v = \overline{1, 3}, \chi = \overline{1, H}, \mu = \overline{1, M}]$ – матрица остаточного времени радиоконтакта КА ДЗЗ и КА ретранслятора, где $t_{v\mu\chi}^{\text{кар}}$ – длительность интервала времени до конца зоны радиовидимости μ -го КА ДЗЗ в χ -м луче v -го КА ретрансляции;

$T_{\text{ппи}}(t) = [t_{\mu\lambda}^{\text{ппи}}, \lambda = \overline{1, L}, \mu = \overline{1, M}]$ – матрица остаточного времени радиоконтакта КА ДЗЗ и ППИ, где $t_{\mu\lambda}^{\text{ппи}}$ – длительность интервала времени до конца зоны радиовидимости μ -го КА ДЗЗ в луче λ -го ППИ;

$V_{\text{тр}}(t) = [V_{\mu}(t), \mu = \overline{1, M}]$ – матрица объемов информации, которые необходимо передать μ -му КА ДЗЗ начиная с текущего момента времени t ;

$C^{\text{кар}}(t) = [c_{v\mu\chi}^{\text{кар}}(t) \in [0, C_{v\mu\chi}^{\text{кар}}], v = \overline{1, N}, \chi = \overline{1, H}, \mu = \overline{1, M}]$ – матрица скорости передачи информации по каналам связи КА ДЗЗ – КА ретрансляции;

$C^{\text{ппи}}(t) = [c_{\mu\lambda}^{\text{ппи}}(t) \in [0, C_{\mu\lambda}^{\text{ппи}}], \mu = \overline{1, M}, \lambda = \overline{1, L}]$ – матрица скорости передачи информации по каналам связи КА ДЗЗ – ППИ;

$P_{zjd}^{\text{отк}}$ – вероятность отказа z_{jd} -го элемента d -го пути j -го ИНС в сложных условиях РЭО.

Необходимо: определить такой план распределения орбитального канального ресурса:

$$U^*(R, t) = \{U_1^*(R, t) = [u_{v\chi\mu}(t) \in \{0, 1\}, v = \overline{1, N}, \chi = \overline{1, H}, \mu = \overline{1, M}], U_2^*(R, t) = [u_{\mu\lambda}(t) \in \{0, 1\}, \mu = \overline{1, M}, \lambda = \overline{1, L}]\},$$

для которого выполняется условие:

$$P_{\gamma}(S(t), U(R, t), P^{\text{отк}}) \geq P_{\gamma}^{\text{треб}}, \quad (2)$$

где $P_{\gamma}(S(t), P^{\text{отк}})$ – вероятность своевременной доставки ИД по всем ИНС, организуемых СКРС;

$P_{\gamma_j} = K_{\gamma_j} P_{\text{св}j}$ – устойчивость j -го ИНС, $j = \overline{1, J}$;

$P_{\text{св}j} = 1 - (1 - P_{\text{QoS}j})(1 - P_{\text{стр}j})$ – вероятность связности j -го ИНС, определяемая как вероятность того, что на заданном ИНС существует хотя бы один путь, по которому возможна передача требуемого объема информации с QoS ($Q^{\text{треб}}$);

K_{γ_j} – коэффициент готовности j -го ИНС ($K_{\gamma} = 0,995$);

$P_{\gamma}^{\text{треб}} \geq 0,9$ – требуемый уровень устойчивости СКРС;

$P_{\text{QoS}j} = (1 - \prod_{d=1}^{D_j} (1 - \prod_{z_{jd}=1}^{Z_{jd}} P_{z_{jd}}^{\text{QoS}}))$ – вероятность качественной связности j -го ИНС, определяемую качеством обслуживания трафика;

$d_j = \overline{1, D_j}$ – номер пути в j -м ИНС;

$z_{jd} = \overline{1, Z_{jd}}$ – номер элемента в d_j -м пути j -го ИНС;

$P_{z_{jd}}^{\text{QoS}} = P_{z_{jd}}^{\text{своевр}}$ – вероятность своевременной доставки пакета ИД через z_{jd} -го элемент d_j -м пути j -го ИНС;

$P_{\text{стр}j} = (1 - \prod_{d=1}^{D_j} (1 - \prod_{z_{jd}=1}^{Z_{jd}} P_{z_{jd}}^{\text{раб. эл.}}))$ – вероятность структурной связности j -го ИНС;

$R(T_{\text{кар}}(t), T_{\text{эс}}(t)) = [r_{v\chi\mu\lambda}(t), v = \overline{1, N}, \chi = \overline{1, H}, \mu = \overline{1, M}, \lambda = \overline{1, L}]$ – матрица динамических приоритетов, определяемая величиной остаточного радиоресурса $T_{\text{кар}}(t)$ или $T_{\text{ппи}}(t)$.

МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА

Под орбитальным канальным ресурсом СКРС в работе понимается совокупность всех спутниковых каналов связи, предназначенных для ретрансляции высокоскоростных потоков ИД от КА ДЗЗ по радионаправлениям КА ДЗЗ–КА СР–ППИ и КА ДЗЗ–ППИ. Канальный ресурс СКРС может быть декомпозирован на две составляющие: канальный ресурс отдельного узла коммутации, под которым понимается совокупное число каналов связи, организуемых узлом сети в интересах всех ИНС, и

структурный (сетевой) ресурс СКРС, под которым понимается совокупность путей (маршрутов) передачи информации в интересах каждого из организуемых ИНС.

Объектом – прототипом модели оперативного распределения орбитального канального ресурса является узел коммутации подсистемы ретрансляции СКРС с возможностью анализа остаточного времени пребывания КА ДЗЗ в зоне радиовидимости луча КА СР (рисунок 2).

Для моделирования узла коммутации можно применить традиционный математический аппарата теории марковских цепей, существенным ограничением которого является наличие допущения, что информационный трафик на входе ретранслятора является стационарным Пуассоновским потоком. Одним из конструктивных направ-

лений моделирования такой подсистемы ретрансляции СКРС, в рамках которого имеется возможность снять данные ограничения и получить аналитическое решение является использование моделей на основе немарковских приоритетных систем массового обслуживания.

На основе предложенной на рисунке 2 модели оперативного распределения орбитального канального ресурса СКРС построена система массового обслуживания (рисунок 3), которая моделирует поступление, классификацию, диспетчеризацию и обслуживание высокоскоростных потоков ИД с различными приоритетами. Приоритетное обслуживание сообщений с учетом остаточного времени радиоконтакта повышает вероятность доставки информации с заданным качеством в установленные сроки.

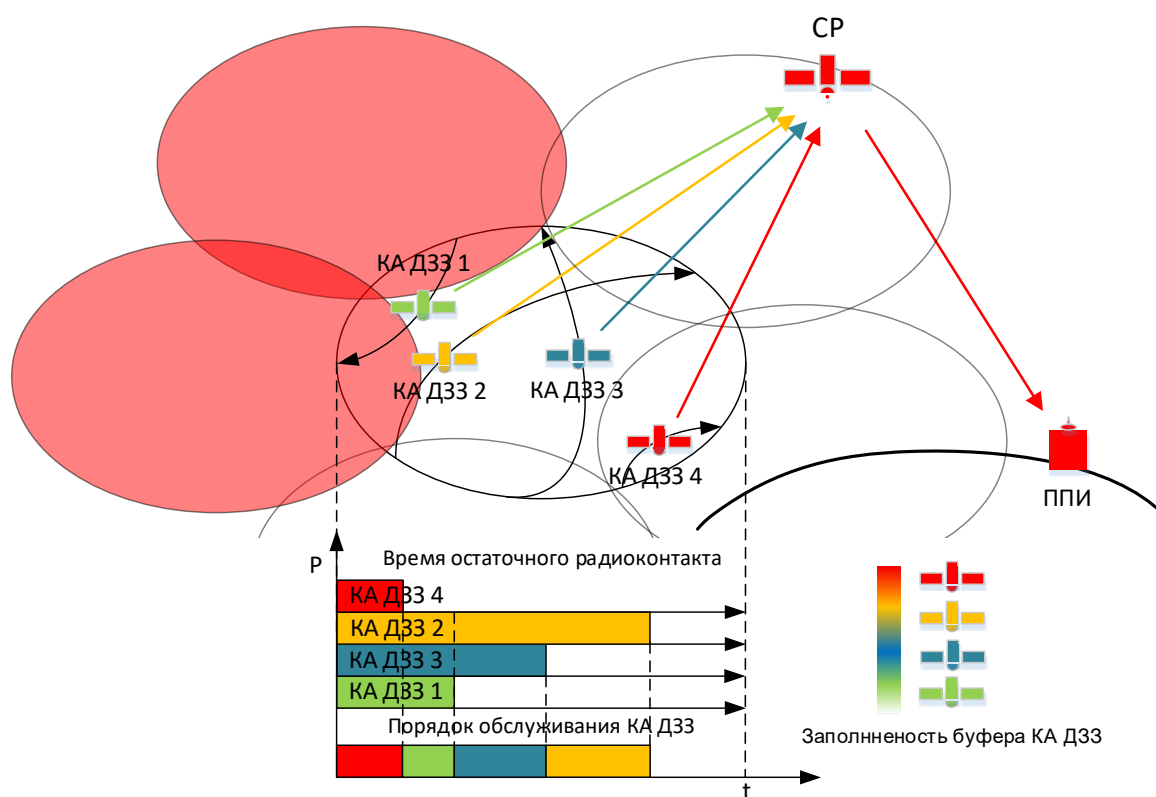


Рис. 2. Модель оперативного распределения орбитального канального ресурса СКРС

Fig. 2. Model of Operational Distribution of the SKRS Orbital Channel Resource

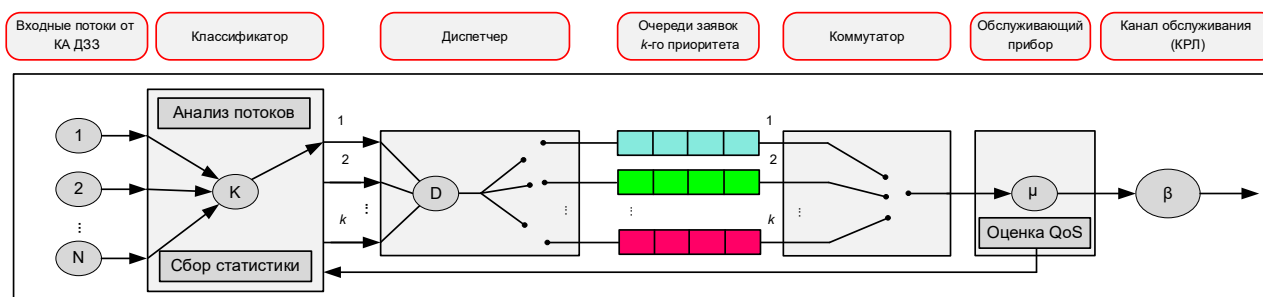


Рис. 3. Модель приоритетного обслуживания высокоскоростных потоков ИД

Fig. 3. Model of Priority Service of High-Speed Flows of ID

В данной модели, в отличие от известных, учитывается ограниченное время нахождения абонентов в зоне радиовидимости спутника-ретранслятора вследствие высокой скорости движения КА ДЗЗ. Ключевым вопросом использования разработанной модели является получение оценок квантилей распределения времени ожидания заявок различного приоритета. Для получения этих характеристик в явном виде используется метод аппроксимации искомых плотностей распределений $f(t)$ по начальным моментам $\bar{f}^i$. Наиболее удобной представляется аппроксимация на основе многочленов Лагерра, ортогональных с весом e^{-x} на вещественной полуоси $[0, \infty)$.

Выбирая весовую функцию вида $e^{-\mu t}$, где μ – некоторый произвольный коэффициент, можно представить плотность $f(t)$ в виде следующего ряда:

$$f(t) = e^{-\mu t} \sum_{n=0}^{\infty} a_n L_n(\mu t), t > 0, \quad (3)$$

где a_n – коэффициенты разложения вида; $L_n(\mu t)$ – многочлены Лагерра:

$$a_n = \mu \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \frac{(-\mu)^i}{i!} \bar{\omega}_k^i; L_n(\mu t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \frac{(-\mu t)^i}{i!}.$$

Ограничив число членов ряда (3), после несложных преобразований аппроксимируемую плотность можно представить в виде взвешенной суммы распределений Эрланга:

$$f(t) \approx \sum_{n=0}^N g_n \frac{\mu(\mu t)^n}{n!} e^{-\mu t},$$

где $g_n = \frac{(-1)^n}{\mu} \sum_{i=0}^N \binom{i}{n} a_i$.

Начальные моменты распределений времени ожидания заявок k -го приоритета ($k = \bar{1}, r$), далее называемых k -заявками, могут быть найдены путем разложения правой и левой частей известных выражений для преобразований Лапласа – Стильеса соответствующих распределений в степенные ряды вида:

$$\begin{aligned} \omega_k(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} dW_k(t) = \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-st)^n}{n!} dW_k(t) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-s)^n}{n!} \bar{\omega}_k^n, \end{aligned}$$

где $\bar{\omega}_k^n$ – n -й начальный момент распределения $W_k(t)$, заданного своим преобразованием Лапласа – Стильеса $\omega_k(s)$.

После алгебраических преобразований, приравняв члены с одинаковыми степенями s , можно получить общее рекуррентное выражение для некоторого n -го начального момента.

Для систем обслуживания с относительным приоритетом – это выражение имеет вид (4), где α_k – интенсивность потока заявок k -го приоритета (k -заявок); p_0 – вероятность того, что обслуживающий прибор окажется свободным для k -заявки в момент ее поступления; $\bar{\pi}_{ki}^n$ – моменты распределения периода занятости системы заявками приоритета k и старше при условии, что этот период начался с обслуживания i -заявки; $\bar{h}_k^j$ – моменты распределения интервала времени, начинающегося с момента поступления на обслуживание k -заявки и заканчивающегося моментом освобождения системы от этой заявки и всех заявок старшего приоритета.

Для учета различий во времени допустимой задержки будем различать во входном потоке два класса сообщений: «срочные» – т.е., у которых резерв времени меньше некоторой величины τ_d , и «несрочные» – остальные. Всем «срочным» сообщениям предоставляется относительный приоритет в обслуживании. Таким образом, исходная модель трансформируется в систему массового обслуживания с относительным приоритетом и двумя входными потоками: высшего приоритета с интенсивностью $\lambda D_z(\tau)$ и низшего приоритета с интенсивностью $\lambda[1 - D_z(\tau)]$.

Качество обслуживания в исходной модели оценивается величиной вероятности несвоевременной передачи сообщений:

$$\bar{P}_3 = \int_0^{\tau_d} [1 - W(t)] dD_z(t).$$

Для приоритетной модели вероятность несвоевременной передачи оценивается соотношением:

$$\bar{P}_3^* = \sum_{k=1}^2 D_z(\tau_{n_i}) \int_{\tau_{n_{k-1}}}^{\tau_{n_k}} (1 - W_k(t)) dD_z(t).$$

Таким образом расчет вероятности несвоевременной передачи сообщений при управлении ОКР позволяет обоснованно назначать приоритеты в обслуживании в зависимости от статистических характеристик входных потоков, требуемого качества обслуживания трафика и выделенного ОКР.

$$\bar{\omega}_k^n = (1 - \alpha_k \bar{h}_k)^{-1} \times \left[\frac{p_0 \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_i \bar{\pi}_{k-1}^{n+1}}{n+1} + \frac{\sum_{i=k+1}^r \alpha_i \bar{\pi}_{k-1}^{n+1}}{n+1} + \sum_{j=1}^n \binom{n}{j} \frac{\bar{h}_k^{j+1}}{j+1} \bar{\omega}_k^{n-j} \right]. \quad (4)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

В качестве исходные данных для проведения моделирования использовались характеристики информационных потоков передаваемых с КА ДЗЗ (оптоэлектронные и радиолокационные снимки местности, а также телеметрическая и командно-программная информация) для ретрансляции через СКРС в ППИ. Так, время допустимой задержки $T_d = 400$ мс для спутникового канала связи составляет, а пропускная способность $C_k = 5$ Мбит/с.

На рисунках 4 и 5 представлены графики, отражающие результаты оценивания эффективности применения разработанной модели приоритетного обслуживания высокоскоростных потоков ИД.

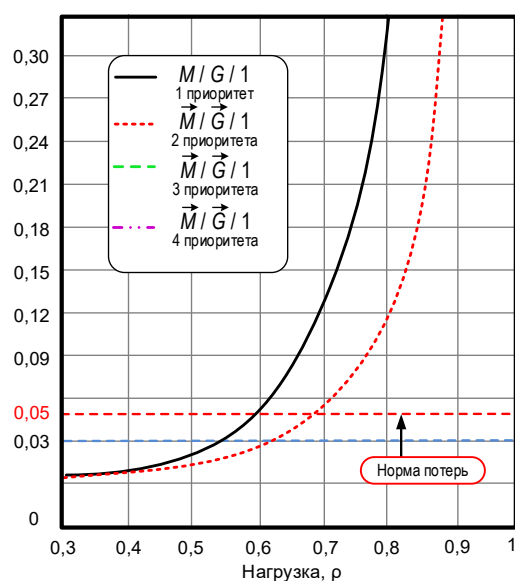


Рис. 4. Распределение вероятности превышения допустимой задержки $P_{np}(t_d)$ от заданной нагрузки

Fig. 4. Distribution of Probability of Exceeding of an Admissible Delay $P_{np}(t_d)$ from the Set Loading

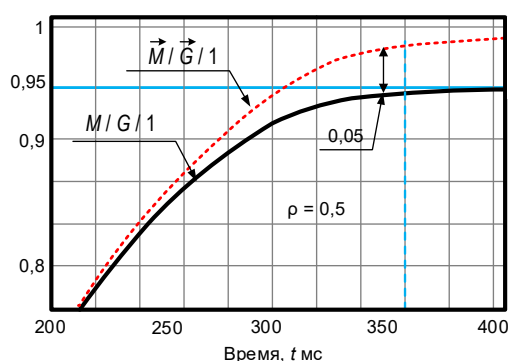


Рис. 5. Распределение вероятности доставки сообщений за заданное время P_d

Fig. 5. Distribution of Probability of Delivery of Messages for Preset Time P_d

На указанных графиках приведено сравнение известной беспriorитетной модели обслуживания с приоритетной моделью, использующей аппроксимацию распределений по четырем начальным моментам. На графиках видно, что наибольший выигрыш получается при разбиении потока на два класса: «срочных» и «несрочных» заявок.

Более детальное разграничение по времени остаточного радиоконтакта, а также увеличение количества назначения приоритетов в обслуживании информационных потоков заметного выигрыша не дает.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование технологии управления ОКР в сочетании с механизмом динамического назначения приоритетов в обслуживании информационных потоков, при организации каналов связи КА ДЗЗ-СКРС, позволяют заметно увеличить вероятность доставки сообщений за заданное время P_d в условиях сложной РЭО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного моделирования получены следующие основные результаты.

1) Проведен системный анализ процесса целевого функционирования СКРС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки.

2) На основе анализа перспектив развития подсистемы ретрансляции СКРС ОГ КА ДЗЗ, сделан вывод об особенностях этапа координационного планирования средств подсистемы ретрансляции, заключающихся в распределении орбитального канального ресурса СКРС на основе немарковских приоритетных систем обслуживания.

3) Получена модель оперативного распределения орбитального канального ресурса подсистемы ретрансляции СКРС на основе приоритетных систем обслуживания, в которой, в отличие от известных моделей, время пребывания заявки в системе ограничено, сняты ограничения на вид распределения времени обслуживания заявок, а также получено выражение для вычисления начальных моментов распределения времени ожидания сообщений различных приоритетов. Использование модели позволяет оценить вероятность несвоевременной доставки ИД.

4) Проведен анализ влияния показателей качества обслуживания потоков ИД. Показано, что разработанная модель оперативного распределения орбитального канального ресурса СКРС на основе приоритетных систем обслуживания позволяет обеспечить требования, предъявляемые к качеству обслуживания потоков ИД.

Использование разработанной модели оперативного распределения орбитального канального ресурса позволяет обеспечить требуемые показатели качества обслуживания приоритетных потоков и за счет этого обеспечить требуемую связность системы и, соответственно, устойчивость СКРС в целом.

Дальнейшие исследования в данной предметной области направлены на разработку методики диспетчеризации орбитального канального ресурса СКРС при передаче высокоскоростных информационных потоков в условиях сложной РЭО.

Список используемых источников

1. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. М.: «Альпина Паблишер», 2004. 536 с.
2. Жуков С.Е., Ковальский А.А., Митряев Г.А., Квасов М.Н. Оперативное распределение радиоресурса системы спутниковой связи в целях обеспечения управления космическими аппаратами // Труды Научно-исследовательского института радио. 2017. № 2. С. 29–36.
3. Ковальский А.А., Зиннуров С.Х., Митряев Г.А. Решение задачи оптимального планирования радиоресурса спутниковой системы связи для сеансов управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 67–74. DOI:10.31854/1813-324x-2018-1-67-74
4. Новиков Е.А., Ковальский А.А., Митряев Г.А. Алгоритм и методика оперативного планирования и распределения радиоресурса системы спутниковой связи для организации устойчивого управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 3(666). С. 68–76.
5. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 4. 2013. С. 69–79.
6. Владимиров В.И. Информационные основы радиоподавления линий радиосвязи в динамике информационно-конфликта. Воронеж: ВАИУ, 2003. 139 с.
7. Макаренко С.И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 2.
8. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л., Новиков Е.А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 2.
9. Макаренко С.И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления. 2010. № 6(65). С. 807–815.
10. Косяков Е.Н., Митряев Г.А. Метод приоритетной диспетчеризации орбитального канального ресурса на основе немарковских приоритетных систем обслуживания // Известия института инженерной физики. 2018. № 4. С. 43–49.
11. Красносельский И.Н., Канев С.А. Исследование помехоустойчивости системы DVB-T на модели канала с многолучевым распространением // Электросвязь. №7. 2010. С. 28–30.
12. Худяков Г.И. Пропускная способность цифровых каналов электросвязи с квадратурной амплитудной модуляцией // Электросвязь. № 6. 2010. С. 38–40.

* * *

The Orbital Channel Resource Control on Non-Markov Priority Systems of Mass Service Basis. Part 1. Operational Distribution Model

A. Kovalsky¹ , G. Mitryaev¹ , A. Pitrin¹ 

¹Military space academy of A.F. Mozhaysky,
St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-38-46

Received 19th June 2021

Accepted 9th August 2021

For citation: Kovalsky A., Mitryaev G., Pitrin A. The Orbital Channel Resource Control on Non-Markov Priority Systems of Mass Service Basis. Part 1. Operational Distribution Model. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(3): 38–46. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-38-46

Abstract: In work systems analysis of process of target functioning of the satellite command relay system (SCRS) in the conditions of a difficult radio-electronic situation is carried out. The carried-out analysis of perspectives of development of a subsystem of relaying of SKRS of orbital grouping of spacecrafts of remote sensing of Earth, allowed to draw a conclusion on features of a stage of coordination planning of the means of a subsystem of relaying consisting in distribution of SKRS the orbital channel resource (OCR) on the basis of the non-Markov priority systems of service. The model of operational distribution of ROC of a subsystem of relaying on the basis of the priority systems of service in which, unlike the known models, time of stay of the request in a system is limited is received, limits for a type of distribution of holding time of requests are lifted and also expression for calculation of the initial moments of

distribution of waiting time of messages of different priorities is received. Use of model allows to evaluate the probability of untimely delivery of details and also to provide required figures of merit of service of priority flows and at the expense of it to provide the required connectivity and stability of SKRS in general.

Keywords: satellite command and relay system, operational distribution, orbital channel resource, priority service.

References

1. Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. *Satellite Communication Networks*. Moscow: Alpina Publisher Publ.; 2004. 536 p. (in Russ.)
2. Zhukov S., Kovalsky A., Mitryaev G., Kvasov M. Operational Distribution of the Radio Resource of Satellite Communication System for the Purpose of Ensuring Management of Spacecrafts. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*. 2017;2: 29–36. (in Russ.)
3. Zinnurov S., Kovalsky A., Mitryaev G. Task's Solution of Satellite Communication System's Optimal Radio Resource Planning for the Sessions of Space Appliance's Orbital Group Managing. *Proc. of Telecom. Universities*. 2018;4(1):67–74. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324x-2018-1-67-74
4. Novikov E.A., Kovalsky A.A., Mitryaev G.A. An Algorithm and a Technique of Operational Planning and Distribution of a Radio Resource of the Satellite Communication System for the Organization of Steady Management of Orbital Grouping of Spacecrafts. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2019;3(666):68–76. (in Russ.)
5. Mikhaylov R.L., Makarenko S.I. Estimating Communication Network Stability Under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting It. *Radio and telecommunication systems*. 2013;4:69–79. (in Russ.)
6. Vladimirov V.I. *Information Bases of Radio Suppression of Lines of a Radio Communication in Dynamics of Information Conflict*. Voronezh: VAIU; 2003. 139 p. (in Russ.)
7. Makarenko S.I. Assessment of Quality of Service of a Packet Radio Network in the Non-Stationary Mode in the Conditions of Influence of the External Destabilizing Factors. *Journal of Radio Electronics*. 2012;6:2. (in Russ.)
8. Mikhaylov R.L., Makarenko S.I., Novikov E.A. A Research of Channel and Network Parameters of a Communication Channel in the Conditions of Dynamically Changing Signal and Interfering Situation. *Journal of Radio Electronics*. 2014;10:2. (in Russ.)
9. Makarenko S.I. A Research of Influence of Deliberate Noises on Opportunities for Relaying of the Message and Figures of Merit of Service of the Data Link Layer of the OSI Model for the Communication System with Accidental Multiple Access of Subscribers. *Informatsionnyye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya*. 2010;6(65):807–815. (in Russ.)
10. Kosyakov E.N., Mitryaev G.A. The Method of Priority Dispatching of Orbital Channel Resource on the Basis of Non-Markov Priority Queuing Systems. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*. 2018;4:43–49. (in Russ.)
11. Krasnosselsky I.N., Kanev S.A. Analyzing DVB-T System's Interference Immunity in a Multipath Fading Channel as a Model. *Electrosvyaz*. 2010;7:28–30. (in Russ.)
12. Khudiakov G.I. Quadrature-Amplitude Modulation Digital Communication Channels' Capacity. *Electrosvyaz*. 2010;6: 38–40. (in Russ.)

Сведения об авторах:

КОВАЛЬСКИЙ
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, докторант военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, yka@mil.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-6878-5858>

МИТЯЕВ
Геннадий Андреевич

кандидат технических наук, начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, yka@mil.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-3840-8672>

ПИТРИН
Алексей Владимирович

адъюнкт военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, yka@mil.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4662-9790>