

УДК 629.78

doi: 10.53816/23061456\_2025\_5–6\_43

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ  
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО  
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА**

**PROPOSALS FOR BUILDING A MULTI-LEVEL SATELLITE COMMUNICATION  
SYSTEM IN THE INTERESTS OF ENSURING GLOBAL INFORMATION  
EXCHANGE**

*Канд. техн. наук А.А. Ковальский, канд. техн. наук Е.С. Абазина,  
канд. техн. наук С.Х. Зиннуров, М.А. Молдованов*

*Ph.D. A.A. Kovalsky, Ph.D. E.S. Abazina, Ph.D. S.H. Zinnurov, M.A. Moldovanov*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

В статье представлены краткие результаты анализа тенденций развития современных систем спутниковой связи, ориентированных на предоставление глобального высокоскоростного информационного обмена. Выполненный обзор, а также учет ограничений по развертыванию наземной инфраструктуры шлюзовых станций спутниковой связи на всех мировых континентах послужили основой для предложений по построению отечественной многоуровневой системы спутниковой связи. В работе представлены варианты многоуровневой орбитальной группировки космических аппаратов связи на разных высотах, указаны их достоинства и недостатки с позиций общей устойчивости сети спутниковой связи. Ввиду высокой динамики изменения топологии орбитальной группировки формируемой многоуровневой спутниковой сети связи, отдельное внимание уделено выбору маршрутизации на космических аппаратах связи.

**Ключевые слова:** система спутниковой связи, многоуровневая орбитальная группировка космических аппаратов связи, маршрутизация в спутниковой связи.

The paper presents modern trends in the development satellite communication systems aimed at ensuring global high-speed information exchange analysis brief results. The realized review, as well as consideration of the specifics the key of which are the ground gateway satellite communications stations infrastructure deployment, served as the basis for domestic multi-level satellite communications system construction proposals. The paper presents communication spacecraft multi-level orbital constellation options at different altitudes, their advantages and disadvantages in terms of the satellite communications network overall stability. Due to the high dynamics of changes in the multi-level satellite communications network orbital grouping topology, special attention is paid to the information traffic routing choice in communication spacecrafts.

**Keywords:** satellite communication system, communication spacecraft multilevel orbital grouping, routing in satellite communications.

## Введение

Развитие средств робототехники, интернета вещей, распространение удаленно управляемого оборудования различного назначения, средств дистанционного мониторинга состояния разных объектов имеет следствием необходимость совершенствования способов предоставления телекоммуникационных услуг мобильным абонентам и группам распределенных подвижных объектов. Единственным родом связи, позволяющим организовать глобальный охват абонентов, как на месте, так и в движении, в любой точке Земли (на суше и в акваториях), а также в воздушном и околоземном пространстве, является спутниковая связь. Необходимость построения систем глобальной спутниковой связи, ориентированных на высокоскоростной обмен мультисервисной информацией, особенно реального времени, объем которой постоянно увеличивается, определил необходимость снижения высот орбит космических аппаратов (КА) до сверхнизких (Very Low Earth Orbit — VLEO): 250–400 км. Освоение сверхнизких орбит открывает новые возможности для космических систем и систем спутниковой связи.

К основным достоинствам VLEO стоит отнести:

- снижение массогабаритных показателей КА, возможность осуществления групповых запусков роя КА, снижение энергетических затрат и финансовых издержек на запуск;

- снижение требований к радиационной стойкости оборудования КА на VLEO, повышение надежности и сроков эксплуатации КА;

- повышение разрешающих возможностей оптоэлектронного оборудования дистанционного зондирования Земли и визуального мониторинга объектов из космоса;

- снижение количества космического мусора за счет способности к самоуничтожению при завершении жизненного цикла КА путем возвращения в верхние слои атмосферы Земли и безопасного распада в течение нескольких дней;

- снижение требований к энергетике терминального оборудования абонентов спутниковой связи;

- возможность перехода на высокочастотный диапазон электромагнитных волн, связан-

ный прямой зависимостью со скоростью передачи информации в спутниковой радиолинии;

- значительное снижение задержки при передаче информации через КА VLEO, что наиболее критично для трафика реального времени.

Однако, применение КА на VLEO имеет и ряд трудностей, требующих поиска технических и организационных решений:

- подверженность КА VLEO значительному влиянию атмосферного сопротивления, ограничивающего срок службы КА VLEO, а также способствующее быстрому сходу с орбиты при отсутствии механизмов компенсации сопротивления атмосфере;

- кратное увеличение численности КА VLEO в сравнении с более высокими орбитами для обеспечения устойчивого информационного обмена;

- сокращение времени пребывания КА VLEO в зоне взаимной радиовидимости с земной станцией спутниковой связи (терминалом спутниковой связи абонента) до единиц минут;

- необходимость адаптации существующих протоколов управления связью при смене ретранслирующего КА связи (КАС) в процессе информационного обмена (протоколы «хэндовера») или разработки новых;

- ужесточение требований к электромагнитной совместимости бортового оборудования многотысячной группировки КА VLEO с КА на других орбитах;

- необходимость создания устойчивой сети межспутниковой связи как в радио, так и в оптическом диапазонах, а также разработки альтернативной, в сравнении с наземным размещением, сети шлюзовых станций для обеспечения выполнения требований по своевременной доставке трафика, критичного к задержке.

Таким образом, очевидна задача, состоящая в разработке предложений по построению многоуровневой орбитальной группировки космических аппаратов связи в интересах обеспечения глобального устойчивого информационного обмена. Кроме того, отдельного внимания требуют вопросы маршрутизации в многоуровневой орбитальной группировке космических аппаратов связи, что определяется высокой динамикой изменения топологии сети спутниковой связи на ее основе.

### Предложения по построению многоуровневой системы спутниковой связи

Существующие системы спутниковой связи (ССС), функционирующие с использованием орбитальных группировок (ОГ) КА связи (КАС) на геостационарной орбите (35790 км), на низких круговых орбитах (700–800 км) и высоких эллиптических орбитах (апогей свыше 35790 км, как правило около 42000 км), имеют взаимоисключающие достоинства и недостатки. Так, применение СССР с использованием геостационарных КАС не обеспечивает покрытие северных (южных) приполярных районов, а КАС на высокоэллиптических орбитах, в свою очередь, не обеспечивают связи с абонентами экваториальных областей и областей южного полушария Земли [1–7]. Кроме того, КАС, размещаемые на геостационарных и высокоэллиптических орбитах, имеют высокую задержку передачи информации, что критично для трафика реального времени.

Основным критерием при построении ОГ КАС глобальной связи в рамках ранее принятых подходов был критерий минимального и достаточного количества КАС в ОГ, ориентированный на достижение компромисса между необходимостью наведения и слежения земными станциями (ЗС) за КАС в ОГ и уровнем автоматизации, вычислительными возможностями и элементной базой прошлых лет. Современные достижения и научно-технический прогресс позволяют снять указанные ограничения. В этой связи переход на сверхнизкие орбиты в интересах организации сети глобального высокоскоростного информационного мультисервисного обмена представляется актуальным.

Интенсивное освоение VLEO обосновано формированием систем глобальной спутниковой связи, ориентированных на предоставление потребителям в любой точке мира информационных скоростей, сопоставимых со скоростями наземных операторов связи. Создание отечественной СССР глобальной высокоскоростной связи находится в стадии разработки. Зарубежные проекты не могут быть взяты в качестве полного прототипа для реализации в Российской Федерации (РФ). Существующие технические решения по построению СССР на низких и сверхнизких орбитах предусматривают обязательное создание наземной сети шлюзовых станций (ШС) спутни-

ковой связи, предназначенных для обеспечения привязки и сопряжения ОГ КАС с наземными транспортными сетями связи на всех континентах земного шара. Отсутствие возможности по размещению ШС за пределами территории РФ существенно осложняет развертывание и применение СССР на низких и сверхнизких орбитах. Дополнительным фактором, ограничивающим выбор сверхнизких орбит для создания ОГ КАС РФ, является ее высокая насыщенность КАС иностранных государств, что определяет необходимость применения дополнительных мер обеспечения электромагнитной совместимости КАС, усложнения управления ОГ КАС (в том числе для предотвращения столкновений). Указанные факторы актуализируют необходимость проведения предварительных расчетов баллистической структуры ОГ КАС РФ, ориентированной на глобальный высокоскоростной информационный обмен [8–11].

Поскольку формирование наземной телекоммуникационной инфраструктуры перспективной СССР РФ ограничено возможностью размещения шлюзовых земных станций лишь на своей территории, то их вынос на отдельный уровень ОГ КАС РФ представляется логичным решением.

Для реализации указанной цели были сформулированы требования к многоуровневой СССР РФ глобального информационного обмена:

- обеспечивать обслуживание и непрерывную круглосуточную связь, включая приполярные районы;

- обеспечивать информационный обмен абонентов наземного, воздушного и морского базирования как между собой, так и с абонентами других сетей военной связи (стационарных и мобильных, использующих различные телекоммуникационные технологии), что вызовет необходимость использования достаточного числа ШС, размещаемых, как правило, на территории РФ;

- из-за ограниченности возможностей по размещению ШС на территории других стран основные телекоммуникационные ресурсы для обеспечения глобальности, устойчивости и непрерывности связи должны быть перенесены в космический сегмент СССР;

- должна быть предусмотрена возможность интеграции создаваемой системы с существующими системами связи (в том числе — космическими) силовых структур РФ;

– КАС должны оснащаться высокоточной системой ориентации и стабилизации для удержания антенных систем и формируемых ими лучей в заданном направлении;

– предусмотреть создание высокоскоростных межспутниковых линий (в том числе с использованием линий в сверхвысокочастотном, а также в оптическом диапазоне) как для обеспечения устойчивости, так и для обеспечения требуемой общей пропускной способности ССС;

– разработать (модифицировать) протоколы информационного обмена и управления трафиком сетевого взаимодействия между орбитальными уровнями (верхним и нижним) перспективной ССС, мобильными спутниковыми терминалами абонентов и наземными ШС;

– предусмотреть реализацию сетевых технологий высокоскоростной коммутации и маршрутизации информационных потоков, как в наземном, так и в ОГ КАС многоуровневой ССС;

– предусмотреть возможность одновременного управления ОГ КАС многоуровневой ССС и трафиком по каналам межспутниковых, абонентских и фидерных радиолиний с помощью автоматизированной системы управления;

– предусмотреть возможность широкополосного режима в каналах управления многоуровневой ССС.

Таким образом, ОГ КАС будет иметь структуру, включающую минимум два разновысот-

ных орбитах с высотами, отличными от используемых зарубежными глобальными высокосортными ССС. КАС из состава ОГ верхнего уровня (с функционалом ШС) будут обеспечивать коммутацию низкоорбитальной группировки, а также взаимодействие с наземной телекоммуникационной инфраструктурой (рис. 1).

Для выработки предложений по построению ОГ КАС многоуровневой ССС было проведено имитационное моделирование с применением пакета прикладных программ Matlab/Simulink.

В результате получено два варианта построения ОГ КАС многоуровневой ССС:

– нижний уровень ОГ КАС на высоте 1000 км с наклоном 88 град. включает 4 орбитальные плоскости со сдвигом в 45° по 6 КАС в каждой;

– верхний уровень ОГ КАС на высоте 8000 км с наклоном 88 град. может включать в первом варианте 8 КАС в одной плоскости (рис. 2), во втором варианте — две взаимно перпендикулярные плоскости по 4 КАС в каждой (рис. 3).

Между КАС нижнего и верхнего уровня, а также между КАС верхнего уровня организуются межспутниковые линии. Связь между КАС нижнего уровня и спутниковыми терминалами абонентов, а также КАС верхнего уровня и ШС осуществляется по абонентским и фидерным радиолиниям соответственно (пунктирные линии рис. 2, 3).



Рис. 1. Структурная схема многоуровневой ССС

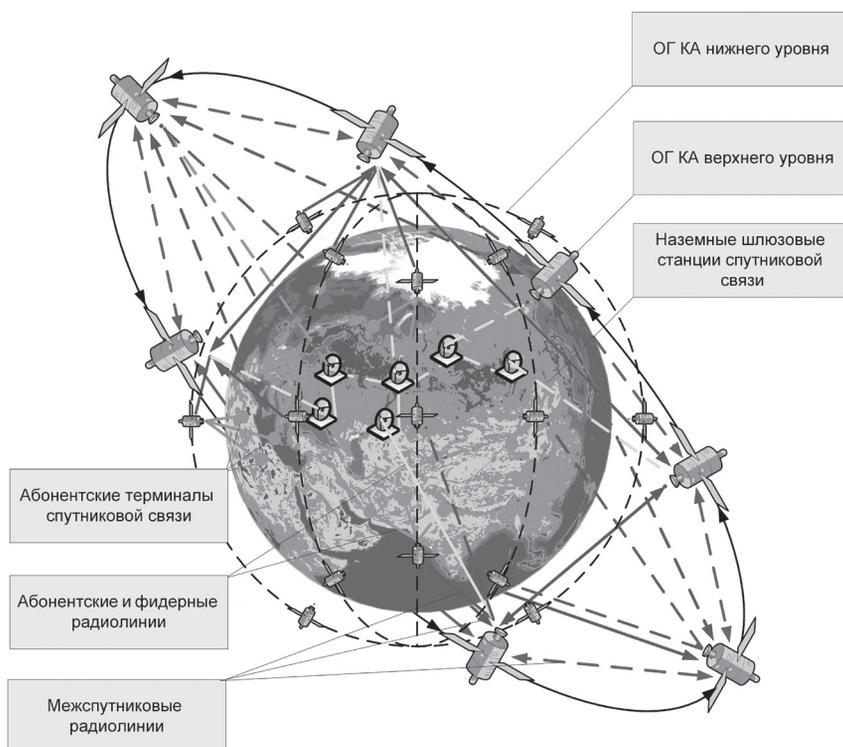


Рис. 2. Вариант построения ОГ КАС верхнего уровня ССС: восемь КАС в одной плоскости

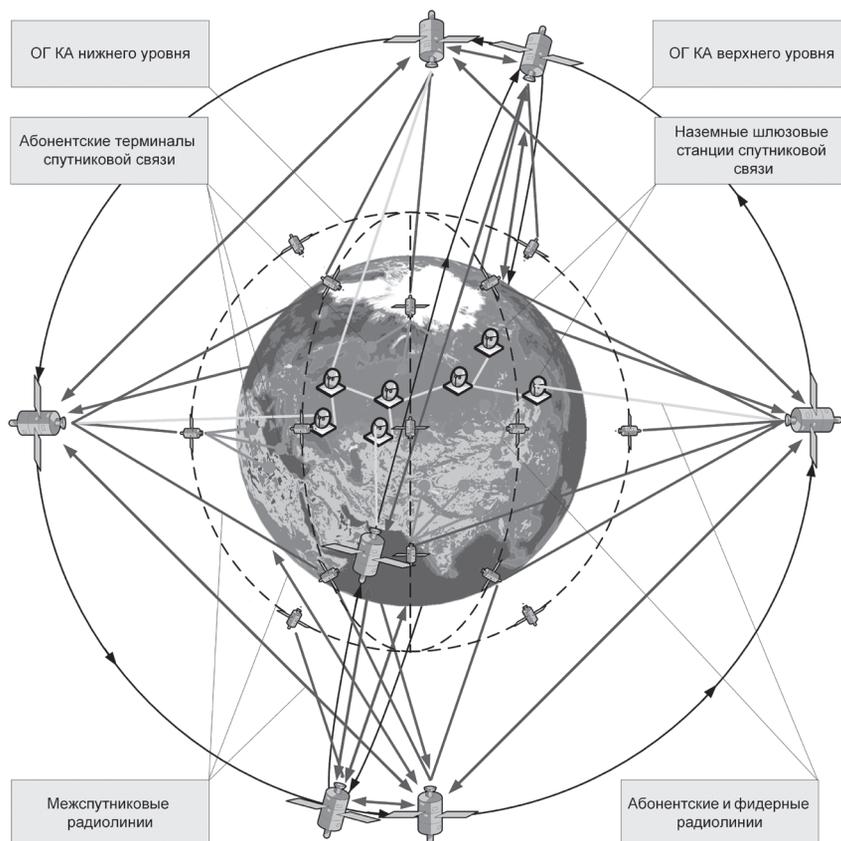


Рис. 3. Вариант построения ОГ КАС верхнего уровня ССС: две взаимно перпендикулярные плоскости по четыре КАС в каждой

При первом варианте построения ОГ КАС многоуровневой ССС постоянные межспутниковые радиолнии между восемью КАС должны быть организованы в одной плоскости, что обеспечит для каждого КАС прямую видимость одновременно четырех соседних с ним КАС, формируя топологическую структуру двойного кольца, повышая устойчивость ССС.

Во втором варианте организуются постоянно действующие спутниковые радиолнии между четырьмя КАС одной плоскости и межспутниковые линии КАС, организуемые на время пролета одного из КАС в взаимно перпендикулярных плоскостях, повышая связность ОГ КАС в сравнении с первым вариантом.

Временные среднескоростные тракты образованы межспутниковыми радиолниями, которые организуются на время взаимной радиовидимости, которое определяется взаимным положением спутниковых терминалов абонентов и КАС нижнего уровня (абонентские радиолнии), КА нижнего и верхнего уровня (межспутниковые линии), а также КАС верхнего уровня и ШС (фидерные радиолнии).

Устойчивость многоуровневой ССС определяется связностью и, соответственно, числом возможных радиолний, однако их увеличение на КАС ограничено массогабаритными и энергетическими характеристиками, а также требованиями по управлению, ориентации и стабилизации КАС.

Создание перспективной многоуровневой ССС предполагает поиск решения ряда организационных и технических задач связи, к числу которых относятся:

- поиск и идентификация абонентов с целью организации сеанса информационного обмена;
- организация связи в отдаленных и труднодоступных районах (включая приполярные территории, северный континентальный шельф и северные морские коммуникации);
- обеспечение непрерывного информационного обмена с использованием современных технологий связи;
- ведение базы данных о местах дислокации (геолокация) абонентов ССС;
- организация переключения и сопровождения терминала абонента ССС при изменении зоны радиопокрытия КА связи, в которой он находится;

- обмен служебными сообщениями системы управления сетевыми ресурсами ССС;

- коммутация и маршрутизация информационных потоков в трактах постоянных и временных межспутниковых радиолний;

- организация автоматизированного оценивания качества обслуживания абонентов ССС;

- обеспечение защищенной связи абонентов ССС.

Приведенные результаты расчета выполнены для установленных в настоящее время диапазонов С-, Р-, S-, Ku-, выделенных для спутниковой связи. Большее уменьшение высоты нижнего уровня ОГ КАС до сверхнизких (менее 400 км) потребует увеличения числа КАС в группировке, в то время как период нахождения каждого КАС в зоне взаимной радиовидимости с ЗС (стационарной) не будет превышать 5–7 минут. Указанные обстоятельства определяют задачу выбора (адаптации существующего и / или разработки нового) алгоритма маршрутизации для перспективных ССС.

#### **Предложения по маршрутизации мультисервисного трафика в ОГ КАС многоуровневой ССС**

Наличие межспутниковых линий в ОГ КАС многоуровневой ССС, использование низких (сверхнизких) орбит, движение КАС по которым характеризуется малым временем нахождения в зоне взаимной радиовидимости с земными станциями и друг с другом, определяют актуальность поиска подходов к маршрутизации мультисервисного трафика на КАС. Высокая динамика КАС относительно ЗС ограничивает применимость наиболее часто используемых методов маршрутизации, реализованных в наземных сетях [12–15]. Для решения представленной задачи существуют три направления решения: использование методов дискретно-стационарной динамической маршрутизации с виртуальной топологией; методов маршрутизации с виртуальными узлами [12, 13]; методов маршрутизации в сетях с ячеистой топологией (mesh-сетях).

Способ маршрутизации, основанный на алгоритме DT-DVTR (Discrete-Time Dynamic Virtual Topology Routing) — дискретно-стационарной динамической маршрутизации с виртуальной топологией, учитывает периодический

характер изменений в топологии ОГ КАС. В соответствии с этим алгоритмом шкала времени делится на интервалы стационарности, продолжительность которых определяется временем взаимной радиовидимости с другими КАС и ЗС. При этом топология сети меняется только в начале и конце установленных интервалов стационарности, оставаясь постоянной до начала следующего интервала. Таким образом, в течение интервала стационарности таблицы маршрутизации не меняются, а построение маршрута может осуществляться одним из способов, традиционных для наземных сетей исходя из возможностей их реализации при массогабаритных и энергетических ограничениях, а также с учетом требований к радиационной стойкости элементной базы КАС. Все множество возможных таблиц маршрутизации для всех интервалов стационарности предполагается иметь на борту каждого КАС с возможностью обращения к ней в соответствующем интервале. Это является недостатком метода, поскольку предъявляет высокие требования как к объему бортовой памяти, так и к надежности всего телекоммуникационного оборудования. Одним из возможных вариантов уменьшения требуемого объема памяти или создания дополнительного резервирования является организация обмена таблицами между соседними КАС.

Подход к маршрутизации на КАС в соответствии с алгоритмом VN (Virtual Node) топологии виртуальных узлов заключается в подмене реальных топологических изменений ее виртуальной стационарностью при формировании таблиц маршрутизации, исключая их перестроение. С этой целью вводится виртуальная топология, которая является суперпозицией виртуальных узлов и физической топологии ОГ КАС. В течение определенного периода времени каждый виртуальный узел представляет собой определенный физический КАС, находящийся в заданной области. Пока он остается в ней, виртуальная топология считается неизменной. Как только КАС покидает ее, виртуальный узел соотносится с другим КАС, который вошел в эту область. Первый КАС передает второму всю информацию, необходимую для работы данного виртуального узла. Задача маршрутизации решается уже над виртуальной топологией, и при передаче трафика по протоколу маршрутизации

нет необходимости слежения за динамикой изменения реальной топологии ОГ КАС [12].

Одним из наиболее популярных направлений разрешения противоречия между быстро меняющейся топологией многоуровневой ССС, не требующей обновления таблиц маршрутизации по всей сети, и минимизацией временных, вычислительных, энергетических ресурсов многоуровневой ССС и ее пропускной способности, является развитие гибридных протоколов маршрутизации в mesh-сетях. Mesh-сети — сети с ячеистой топологией, имеют кластерную структуру, предполагающую в рамках кластера возможность создания полностью связанной топологии, что определяет возможность самовосстановления сети в случае деградации ее узлов. Протоколы маршрутизации, используемые в ячеистых сетях, классифицируются на проактивные (стационарные), характеризующиеся обновлением таблиц маршрутизации при каждом изменении топологии сети с пересылкой их между всеми узлами; реактивные (динамические), формирующие маршрутные таблицы в результате широковещательных запросов с последующим ожиданием ответа от узла-получателя, и гибридные — совмещающие два предыдущих протокола: проактивные протоколы используются для маршрутизации между кластерами, реактивные — внутри кластера [14–15].

Топология ОГ КАС постоянно меняется: КАС находятся в движении, расстояние между ними (особенно на разных орбитах) постоянно меняется. В этой связи топологию ОГ КАС целесообразно свести к кластерной, применив для маршрутизации подходы, используемые в mesh-сетях, а также для минимизации динамики изменения топологии — использовать способы назначения периодов стационарности DT-DVTR или VN. В качестве кластеров для многоуровневой ССС желательно назначать ячейки КАС с объемом не более 10 узлов на одноименной орбите, с применением внутри кластера проактивных протоколов, а между — реактивных, основу которых составляет алгоритм Дейкстры. Такой подход позволит разделить непрерывно меняющуюся топологию на  $n$  дискретных топологий с небольшими изменениями между соседними кластерами, при этом, чем больше  $n$ , тем меньше топологическая разница между каждым соседним кластером. Если  $n$  выбрано корректно,

разница в задержке, вносимая этим методом, может быть незначительной. Кроме того, топология, используемая для расчетов маршрутизации, является статичной.

### Заключение

Поиск решений в области обеспечения глобального устойчивого информационного обмена является одной из приоритетных современных задач. Предоставление высокоскоростного доступа в Интернет, обмен трафиком, критичным к временной задержке, ограничения на размещение шлюзовых станций по всему миру являются ключевыми факторами, определяющими формирование разнорысотной структуры ОГ КАС многоуровневой ССС. Усложнение структуры ОГ КАС совместно с необходимостью организации высокосортной устойчивой глобальной связи требуют решения множества технических вопросов, наиболее важными из которых являются баллистические расчеты ОГ КАС многоуровневой ССС и способы маршрутизации мультисервисного трафика в высокодинамичной сети.

### Список источников

1. Стародубцев Ю.И., Иванов С.А., Закалкин П.В. Концептуальные направления решения проблем обеспечения устойчивости Единой сети электросвязи Российской Федерации в интересах органов государственной власти и военного управления // Военная мысль. 2021. № 4. С. 39–49.

2. Остроумов О.А. Методология обеспечения устойчивого функционирования системы связи — критически важного объекта системы управления // Военная мысль. 2022. № 9. С. 52–58.

3. Цветков К.Ю., Осташов И.Т., Косяков Е.Н. Радиорелейные и спутниковые системы передачи информации специального назначения: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 430 с.

4. Мануйлов Ю.С., Павлов А.Н., Новиков Е.А. и др. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 266 с.

5. Ермишян А.Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях. Часть 1. Методологические осно-

вы построения организационно-технических систем военной связи. СПб.: ВАС, 2005. 740 с.

6. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. М.: Альбина Паблишер, 2004. 536 с.

7. Невдяев Л.М., Смирнов А.А. Персональная спутниковая связь. М.: ТЭК, 1998. 216 с.

8. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф. и др. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2011. № 630. С. 5–10.

9. Акмоллов А.Ф., Ковальский А.А., Ефимов С.Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разнорысотной орбитальной группировки // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 22–31.

10. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф. и др. Баллистическое построение разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2012. № 634. С. 45–56.

11. Ефимов С.Н., Косаревич Д.В., Викторов Е.А. и др. Пропускная способность межспутниковых и фидерных радиолиний разнорысотной многоспутниковой системы связи // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2011. № 633. С. 121–136.

12. Муфтиев Р.Г., Хасанов В.Х., Закирьянова Г.Т. Беспроводные сети: монография. Уфа: Уфимский институт (филиал) Российского государственного торгово-экономического университета, 2011. 233 с.

13. Абазина Е.С., Зиннуров С.Х. Выбор прототипа протокола маршрутизации телекоммуникационной сети подсистемы информационного обеспечения сложной эргатической системы // Сборник трудов XLIII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Серпухов, 2024. С. 106–111.

14. Сорокин М.Ю., Селифанов В.А., Фролов М.А. Анализ применимости стандартных протоколов динамической маршрутизации в сетях спутниковой связи на основе низкоорбитальных космических аппаратов // Ракетно-космичес-

кое приборостроение и информационные системы. 2021. Том 8. Вып. 4. С. 63–71.

15. Фэй Чжэн, Чао Ван, Цзоу Чжоу и др. Стратегия межспутниковой маршрутизации LEO на основе модифицированного алгоритма Q-маршрутизации // Журнал EURASIP по беспроводным коммуникациям и сетям, номер статьи: 36 (2022) // URL: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-022-02119-1> (дата обращения: 14.02.2025).

### References

1. Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., Zakalkin P.V. Conceptual directions for solving the problems of ensuring the sustainability of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation in the interests of government bodies and military command // *Military Thought*. 2021. No 4. Pp. 39–49.

2. Ostroumov O.A. Methodology for ensuring the sustainable functioning of the communication system — a critically important object of the control system // *Military Thought*. 2022. No 9. Pp. 52–58.

3. Tsvetkov K.Yu., Ostashov I.T., Kosyakov E.N. Radio relay and satellite systems for special-purpose information transmission: textbook. SPb.: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2013. 430 p.

4. Manuilov Yu.S., Pavlov A.N., Novikov E.A. et al. Systems analysis and organization of automated control of spacecraft: textbook. SPb.: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2010. 266 p.

5. Ermishyan A.G. Theoretical foundations of building military communications systems in associations and formations. Part 1. Methodological foundations of building organizational and technical military communications systems. SPb.: VAS, 2005. 740 p.

6. Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. Satellite communication networks: textbook. Moscow: Albina Publisher, 2004. 536 p.

7. Nevdyayev L.M., Smirnov A.A. Personal satellite communications. Moscow: TEK, 1998. 216 p.

8. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F. et al. Concept of building a multi-altitude

multi-satellite communication system with mobile subscribers // *Proceedings of the VKA*. 2011. No 630. Pp. 5–10.

9. Akmolov A.F., Kovalsky A.A., Efimov S.N. Proposals for the creation and operation of a multi-satellite communication system based on a multi-altitude orbital grouping // *Proceedings of educational institutions of communication*. 2020. Vol. 6. No 1. Pp. 22–31.

10. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F. et al. Ballistic construction of a multi-altitude multi-satellite communication system with mobile subscribers // *Proceedings of the Military Space Agency*. 2012. No 634. Pp. 45–56.

11. Efimov S.N., Kosarevich D.V., Viktorov E.A. et al. Throughput capacity of inter-satellite and feeder radio links of a multi-altitude multi-satellite communication system // *Proceedings of the Military Space Agency*. 2011. No 633. Pp. 121–136.

12. Muftiev R.G., Khasanov V.Kh., Zakiryanova G.T. Wireless networks: Monograph. Ufa: Ufa Institute (branch) of the Russian State University of Trade and Economics, 2011. 233 p.

13. Abazina E.S., Zinnurov S.Kh. Selection of a prototype of the routing protocol of the telecommunication network of the information support subsystem of a complex ergatic system // *Collection of works of the XLIII All-Russian scientific and technical conference «Problems of efficiency and safety of functioning of complex technical and information systems»*. Serpukhov. 2024. Pp. 106–111.

14. Sorokin M.Yu., Selifanov V.A., Frolov M.A. Analysis of the applicability of standard dynamic routing protocols in satellite communication networks based on low-orbit spacecraft // *Rocket and space instrumentation and information systems* 2021. Vol. 8, issue 4. Pp. 63–71.

15. Fei Zheng, Chao Wang, Zou Zhou et al. LEO Inter-Satellite Routing Strategy Based on Modified Q-Routing Algorithm. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networks*, Vol. 36 (2022). <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-022-02119-1> (date of access: 14.02.2025).