

УДК 629.78

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_31

МЕТОДИКА УСТАНОВЛЕНИЯ МНОГОИНТЕРВАЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ В МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКЕ

THE MULTI-INTERVAL CONNECTION ESTABLISHING METHODOLOGY IN MULTI-SATELLITE ORBITAL CONSTELLATION

Канд. техн. наук Е.С. Абазина, канд. техн. наук С.Х. Зиннуров, Д.В. Смирнов

Ph.D. E.S. Abazina, Ph.D. S.Kh. Zinnurov, D.V. Smirnov

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье сформулирована актуальность задачи разработки методики установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке, приведена ее формализация. Представлена математическая постановка задачи установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке, обеспечивающего информационный обмен между отправителем и получателем с заданными геопространственными координатами. Представлена методика, отличающаяся от известных учетом доступности наземной магистральной телекоммуникационной инфраструктуры земной станции, планируемой для установления соединения на линии вниз «космический аппарат — Земная станция». Представленная методика может быть использована при оценивании характеристик перспективных сетей спутниковой связи, ориентированных на предоставление глобального высокоскоростного информационного обмена.

Ключевые слова: установление многоинтервального соединения, мультисервисный трафик, многоспутниковая орбитальная группировка.

The paper formalizes the relevance of the task of developing a methodology for establishing a multi-interval connection in multi-satellite orbital constellation. The paper presents a mathematical formulation of the problem of establishing a multi-channel connection in multi-satellite orbital constellation, providing information exchange between the sender and the recipient with specified geospatial coordinates. The methodology is presented, differed from known ones by taking into account the availability of the terrestrial backbone telecommunications infrastructure of the Earth station, planned to establish connection on the «spacecraft — Earth station» down line. The presented methodology can be used to evaluate characteristics of promising satellite communication networks focused on providing global high-speed information exchange.

Keywords: multi-interval connection establishing methodology, multiservice telecommunication traffic, multi-satellite orbital constellation.

Введение

Необходимость обеспечения высокоскоростного информационного обмена в интересах

территориально распределенных абонентов, зачастую находящихся в движении, в воздушном или космическом пространстве, в акваториях внутренних морей Российской Федерации (РФ)

и в Мировых океанах, на территориях с низкой плотностью населения, приполярных районах и труднодоступной местности определяет актуальность развития многоспутниковых систем спутниковой связи. Под многоспутниковыми системами спутниковой связи в статье подразумеваются системы, орбитальная группировка (ОГ) которых включает десятки (и больше) космических аппаратов (КА) на низких и сверхнизких орбитах, позволяющих организовать высокоскоростной информационный обмен на территории РФ и за ее пределами. Значительное увеличение КА в ОГ, а также снижение высоты используемых орбит, приводит к усложнению топологии сети и повышению динамики изменения ее структуры. Для видов трафика, требующих гарантированной доставки в режиме реального времени с высокими требованиями к достоверности передачи, целесообразно предварительное установление соединения. Очевидно, что соединение между наземными абонентами, значительно разнесенными в пространстве, будет многоинтервальным. Существующий подход к установлению соединения предполагает оценивание наличия в зоне радиовидимости КА — ретранслятора шлюзовой Земной станции (ЗС) с доступом к наземной магистральной сети, используемой для доставки трафика ЗС-получателю. Однако, в ситуации, когда ЗС-получателя не имеет непосредственного доступа к наземной магистральной сети, или он ограничен, связь «последней мили», организуется через КА. В этой связи, подход к установлению соединения, предполагающий создание многоинтервальной трассы с использованием межспутниковых радиолиний, предусмотренных в перспективных многоспутниковых ОГ КА, представляется более целесообразным [4]. В статье представлена методика установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке с учетом доступа шлюзовых и абонентских ЗС к наземной магистральной сети.

Математическая постановка задачи установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке

Необходимость обеспечения глобального высокоскоростного обмена мультисервисной

информацией способствует конвергенции систем спутниковой связи с наземными телекоммуникационными сетями, развитию неназемных сетей, а также созданию многоспутниковых ОГ КА — как единственного рода связи, способного предоставлять телекоммуникационные услуги абонентам не только на Земле, но в акваториальном, воздушном и космическом пространствах [2, 3]. Многоспутниковые ОГ КА характеризуются высокой динамикой изменения топологии, которая определяется выбором низковысотных круговых орбит, как одного из возможных решений минимизации временных издержек на распространение сигнала от ЗС до КА.

Основной подход к установлению соединения в системах спутниковой связи предполагает формирование двухинтервальной линии с участками от ЗС вверх и от КА вниз, что обосновано преимущественным использованием ОГ КА на геостационарных орбитах, позволяющих формировать зону обслуживания большой площади, зачастую включающую ЗС-получателя [9]. В противном случае, линия вниз от КА ориентирована на шлюзовую ЗС, включенную в наземную магистральную телекоммуникационную сеть, используемую для доставки трафика ЗС-получателю [4, 9–11]. Однако необходимость организации связи с абонентами без доступа к магистральной телекоммуникационной сети (в том числе со значительно ограниченным доступом к ней во времени и (или) в пространстве), а также нецелесообразность использования наземной сети по временным параметрам доставки информации, в совокупности с проектированием в перспективных многоспутниковых ОГ КА межспутниковых радиолиний, определяет актуальность решения задачи разработки методики установления многоинтервального соединения в интересах обеспечения информационного обмена с требуемым качеством [13].

Математическая постановка задачи установления многоинтервального соединения U^* в многоспутниковой орбитальной группировке, обеспечивающего информационный обмен между ЗС-отправителем и ЗС-получателем с заданными геопространственными координатами с вероятностью отказа в обслуживании, не превышающую требуемых значений, может быть представлена в следующем виде:

$$U = \arg \min P(n_s) \mid P(n_s) \leq P_{\text{треб}}, n_s \in N,$$

где $P(n_s)$ — вероятность отказа в обслуживании;

$P_{\text{треб}}$ — требования к значению вероятности отказа в обслуживании;

n — количество КА в составе многоспутниковой ОГ;

U — множество вариантов установления соединения между ЗС-отправителем и ЗС-получателем, $U = \{U_s\}$;

S — множество интервалов на основе межспутниковых радиолиний, $s = \overline{1, S}$.

Исходными данными для разрабатываемой методики являются данные, определенные ниже:

n — количество КА в составе многоспутниковой ОГ, $n_s \in N$, $N = \overline{100, N}$;

U — множество вариантов установления соединения между ЗС-отправителем и ЗС-получателем, $U = \{U_s\}$;

S — $s = \overline{1, S}$ множество интервалов на основе межспутниковых радиолиний;

G — множество элементов орбиты КА из состава многоспутниковой ОГ $G \in G(e_n, H_n, \alpha_n, i_n, \Omega_n, \omega_n, m_n)$;

e_n — эксцентриситет многоспутниковой орбиты КА;

H_n — высота КА над уровнем Земли, км;

α_n — угол ширины диаграммы направленности глобального луча КА;

i_n — наклонение многоспутниковой орбиты КА;

Ω_n — долгота восходящего узла многоспутниковой орбиты КА;

ω_n — аргумент широты перигея многоспутниковой орбиты КА;

m_n — средняя аномалия КА многоспутниковой ОГ;

$Z_{\text{пер}}, Z_{\text{пр}}, Z_n$ — координаты ЗС-отправителя, ЗС-получателя и подспутниковой точки КА n_s соответственно;

$Z_{\text{пер}}(\varphi_{\text{пер}}, \lambda_{\text{пер}}), Z_{\text{пр}}(\varphi_{\text{пр}}, \lambda_{\text{пр}}), Z_n(\varphi_n, \lambda_n)$, град;

$\varphi_{\text{пер}}, \varphi_{\text{пр}}, \varphi_n$ — широта ЗС-отправителя, ЗС-получателя и подспутниковой точки КА n_s соответственно;

$\lambda_{\text{пер}}, \lambda_{\text{пр}}, \lambda_n$ — долгота ЗС-отправителя, ЗС-получателя и подспутниковой точки КА n_s соответственно;

k — множество шлюзовых ЗС;

$h_{\text{пер}}, h_{\text{пр}}$ — высота над уровнем моря ЗС-отправителя и ЗС-получателя соответственно;

J — количество обращений ЗС-отправителя к одному КА на интервале времени $t \in (t_n, t_k)$;

t_n — время начала интервала моделирования (дата, время);

t_k — время окончания интервала моделирования (дата, время);

$t_{\text{мод}}$ — временной шаг моделирования, с;

V — средний объем информации, требующей передачи, [бит];

d — бинарный параметр доступности наземной магистральной телекоммуникационной инфраструктуры для ЗС, $d = 0$ при отсутствии доступа, $d = 1$ — при наличии доступа;

$h_{\text{перн}}$ — наклонная дальность между КА и ЗС-отправителем, км;

$h_{\text{прн}}$ — наклонная дальность между КА и ЗС-получателем, км.

Стационарность ЗС, участвующих в информационном обмене, для которых требуется установление многоинтервального соединения в многоспутниковой ОГ КА, является ограничением предлагаемой методики.

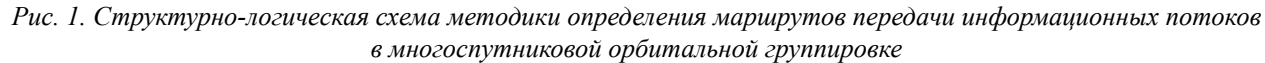
Методика установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке

В основе предлагаемой методики лежит метод расчета зон радиовидимости между ЗС и ОГ КА по параметру минимального расстояния между ними. Структурно-логическая схема методики представлена на рис. 1. В соответствии с представленной методикой, решение сформулированной задачи установления многоинтервального соединения в многоспутниковой орбитальной группировке может быть получено в несколько этапов.

На первом этапе происходит ввод исходных данных.

Параметры рассматриваемой многоспутниковой ОГ КА $G \in G(e_n, h_n, \alpha_n, i_n, \Omega_n, \omega_n, m_n)$ могут быть заданы кеплеровскими элементами орбиты, либо в виде TLE файла [1, 6].

Исходными данными о геопространственном положении ЗС отправителя и получателя являются их долгота, широта и высота над уровнем моря. Сличение положения ЗС с картой раз-



Требования к задержке, вероятности отказа в обслуживании, временные и вероятностные

Таблица 1

Допустимые значения параметров качества обслуживания при передаче мультисервисного трафика

Тип сервиса	Параметры качества обслуживания				
	время установления соединения, с	вероятность разрыва соединения	задержка, мс	джиттер, мс	вероятность потери данных
IP-телефония	0,5–1	10^{-3}	25–500	100–150	10^{-3}
Видеоконференция	0,5–1	10^{-3}	30	30–100	10^{-3}
Цифровое видео по запросу	0,5–1	10^{-3}	30	30–100	10^{-3}
Передача данных	0,5–1	10^{-6}	50–1000	–	10^{-6}
Телевизионное вещание	0,5–1	10^{-8}	1000	–	10^{-8}

Таблица 2

Требования к качеству услуг, предоставляемых мультисервисными сетями связи

Тип данных	Название услуги	Требуемая скорость передачи	Параметры качества услуги		
			задержка, мс	джиттер	потери, %
Аудио	Телефония	4–64 кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)	<1 мс	<3 %
	Передача голоса	4–32 кбит/с	<1 с (для воспроизведения); <2 с (для записи)	<1 мс	<3 %
	Звуковое вещание	16–128 кбит/с	<10 с	<<1 мс	<1 %
Видео	Видео-конференция	>384 кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)	–	<1 %
Данные	Просмотр WEB-страниц	10 кБ	<2 с/стр. (отличное QoS); <4 с/стр. (допустимое QoS)	–	0
	Передача файлов	10кБ –10 МБ	<15 с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	–	0
	Передача изображений	100 кБ	<15 с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	–	0
	Доступ к электронной почте	<10 кБ	<2 с (отличное QoS); <4 с (допустимое QoS)	–	0
	Факс	10 кБ	<30 с/стр.	–	< 10^{-6} BER

параметры качества обслуживания мультисервисного трафика представлены в табл. 1 и 2 [8].

При исследовании телекоммуникационной нагрузки в наземном сегменте многоспутниковых ОГ КА учитываются прогнозные значения параметров пользовательского трафика.

На втором этапе производится прогноз движения КА из состава многоспутниковой ОГ. Для

этого необходимо определить временной интервал для которого проводится расчет установления соединения передачи информационных потоков $t \in (t_n, t_k)$, где t_n, t_k — точное значение всемирного координированного времени (UTC) начала и окончания моделирования. Далее для заданной многоспутниковой ОГ на основе данных TLE файла с использованием модели SGP4

производится прогноз движения КА на временном интервале моделирования $t \in (t_n, t_k)$. Расчет текущего положения, и значений вектора скорости КА выполняется с использованием встроенной библиотеки Aerospace Toolbox MATLAB [5].

На третьем этапе рассчитываются возможные варианты установления соединения в многоспутниковой ОГ КА. Алгоритм формирова-

ния соединения на третьем этапе представлен на рис. 2.

На шаге 1 осуществляется запуск работы алгоритма формирования многоинтервального соединения в многоспутниковой ОГ КА.

На шаге 2 осуществляется регистрация всех КА, находящихся в зоне радиовидимости ЗС-отправителя, для угла места антенной системы ко-

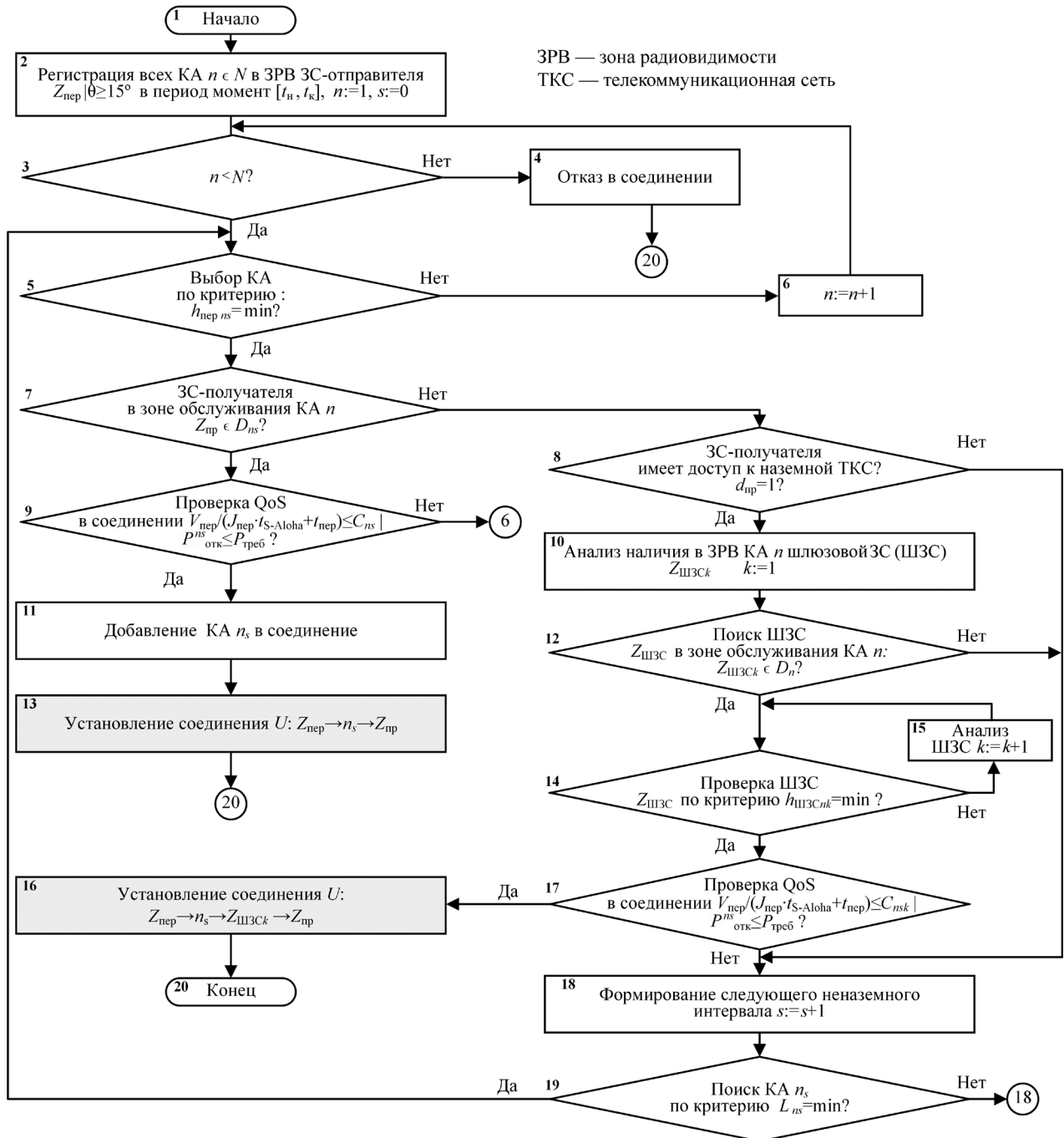


Рис. 2. Алгоритм формирования многоинтервального соединения в многоспутниковой ОГ КА

торого действует ограничение $\theta \geq 15^\circ$. Выбор такого критерия для значений угла места обоснован использованием низких круговых орбит (с высотой порядка 500 км) и допущением о том, что Земля имеет форму шара. На этом же шаге присваиваются первоначальные значения счетчику числа КА, используемых для формирования соединения ($n=1$), и счетчику числа интервалов в соединении ($s=0$).

На шаге 3 проверяется принадлежность анализируемого КА к текущей ОГ ($n < N$?). Если условие выполняется, КА принадлежит ОГ, алгоритм переходит к шагу 5, в противном случае осуществляется отказ в соединении, в виду перебора всех КА в ОГ и не возможности выполнения условий передачи информации требуемого объема с заданным качеством. Выходом из оператора шага 4 является шаг 20 — конец работы алгоритма. ЗС обращается к другой ОГ КА или к этой же ОГ КА на новом интервале моделирования, пытаясь установить соединение по представленному алгоритму.

На шаге 5 выполняется проверка критерия минимальной дальности от ЗС-отправителя до КА ($h_{\text{перн}} = \min$). Если для первого произвольного КА условие выполняется, то происходит переход к шагу 7, иначе — к шагу 6, который заключается в анализе следующего КА, находящегося в зоне радиовидимости ЗС-отправителя (счетчик КА увеличивается на единицу $n = n + 1$).

На шаге 7 алгоритм проверяет нахождение в зоне обслуживания выбранного КА ЗС-получателя ($Z_{\text{пр}} \in D_{ns}$?) по формуле расчета зоны обслуживания КА [9]:

$$D_{ns} = 2R_3 \left\{ \arcsin \left[\left(1 + \frac{h_{ns}}{R_3} \right) \sin \left(\frac{\alpha_{ns}}{2} \right) - \frac{\alpha_{ns}}{2} \right] \right\}.$$

При положительном выполнении условия, осуществляется переход к шагу 9, в противном случае — к шагу 8, где проверяется доступность магистральной наземной телекоммуникационной инфраструктуры для ЗС-получателя по показателю $d_{\text{пр}}$.

На шаге 9 выполняется сравнение пропускной способности создаваемого соединения C_{ns} с требуемой пропускной способностью для передачи информации $V_{\text{пер}}$ за время, предоставляемое для этой передачи $t_{\text{пер}}$, а также с учетом временных издержек на доступ к КА в соответствии

с реализуемым протоколом множественного доступа (в статье выбран протокол S-Aloha — $(V_{\text{пер}} \times J_{\text{пер}} \times t_{S-Aloha}) < C_{ns}$) при ограничениях на значения вероятности отказа в обслуживании $P_{\text{отк}}^{ns} < P_{\text{треб}}$ [8, 13]. Если сформулированное на шаге 9 требование выполняется, то на шаге 11 анализируемый КА добавляется в соединение, а на последующем шаге 13 устанавливается соединение $U: Z_{\text{пер}} \rightarrow n_s \rightarrow Z_{\text{пр}}$. После этого алгоритм завершает работу (шаг 20), начинается информационный обмен в соответствии с установленным соединением.

Если условие шага 9 не выполняется, осуществляется переход к шагу 6.

На шаге 8, в результате проверки значения параметра доступности наземной телекоммуникационной среды для ЗС-получателя, при выполнении требования $d_{\text{пр}} = 1$ происходит переход на шаг 10, где проводится анализ наличия в зоне обслуживания КА n шлюзовой ЗС $Z_{\text{шзск}}$, а также присваивается первоначальное значение счетчика шлюзовых ЗС $k := 1$.

На следующем шаге 12 алгоритм производит поиск шлюзовой ЗС (ШЗС) $Z_{\text{шзс}}$ в зоне обслуживания КА n , проверяя ее размещение в зоне обслуживания КА ($Z_{\text{шзск}} \in D_n$?). При выполнении этого условия, на шаге 14 осуществляется выбор шлюзовой ЗС $Z_{\text{шзс}}$ с минимальной наклонной дальностью по отношению к текущему КА ($h_{\text{шзск}} = \min$?).

Если требования минимальной дальности выполняются, то алгоритм переходит на шаг 16, начиная проверку обеспечения качества обслуживания для передаваемой информации с учетом пропускной способности соединения и при ограничениях на вероятность отказа в нем (по аналогии с процедурами шага 9). При успешном выполнении требований шага 16, происходит переход на шаг 17, в ходе которого формируется соединение $U: Z_{\text{пер}} \rightarrow n_s \rightarrow Z_{\text{шзск}} \rightarrow Z_{\text{пр}}$. После этого алгоритм завершает работу (шаг 20), начинается информационный обмен в соответствии с установленным соединением.

При невыполнении условия шага 14, и наклонная дальность между текущим КА и анализируемой шлюзовой ЗС не является минимальной, то выполняется переход на шаг 15, в ходе которого проводится анализ следующей шлюзовой ЗС, что сопровождается увеличением счетчика шлюзовых ЗС $k = k + 1$.

В случаях, когда требования условий шагов 8, 12, 16 не выполняются, алгоритм переходит к шагу 18 — формирования следующего наземного интервала, начинающегося с увеличения счетчика интервалов $s = s + 1$.

На шаге 19 проверяется выполнение условия, определяющего поиск КА n_s , по критерию минимального расстояния между КА ($L_{ns} = \min$). Выполнение данного условия переводит алгоритм на шаг 5, запуская цикл проверок на нахождение в зоне обслуживания очередного КА ЗС-получателя, а также выполнение требований QoS передаваемой информации с учетом пропускной способности формируемого соединения. Выход из этого цикла завершается либо формированием соединения на шаге 13, либо переходом к анализу следующего КА (шаг 6). В случае, если условие шага 19 не выполняется, осуществляется переход к шагу 18 с увеличением счетчика интервалов и переходом к рассмотрению следующего КА, соседнего с текущим, запуская повторение цикла проверок с шага 7 по шаг 13.

Таким образом, полученная методика позволяет сформировать множество вариантов установления многоинтервального соединения в многоспутниковой ОГ КА с учетом доступности магистральной наземной телекоммуникационной сети ЗС-получателю и может быть использована при оценивании характеристик перспективных сетей спутниковой связи, ориентированных на предоставление глобального высокоскоростного информационного обмена.

Заключение

Представленная в статье методика формирования многоинтервального соединения в многоспутниковой ОГ КА является обобщенной и имеет ограничения, в первую очередь, в отношении динамики перемещения рассматриваемых объектов. Маршрутизация в сетях связи с высокой динамикой, изменения топологии при выполнении требований к качеству обслуживания передаваемого трафика, энергетического потенциала перспективных КА и ЗС, их массогабаритные показатели и параметры надежности определяют сложную многокритериальную техническую задачу, требующую поиска компромиссных решений, поиск которых составляет направление дальнейших исследований.

Список источников

1. Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А., Павлов А.Н. и др. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 266 с.
2. Фоминов И.В., Хлебников С.Г. Анализ технологических проблем построения роя малых космических аппаратов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 1 (141). С. 24–28.
3. Павлов А.Н., Соколов Б.В., Осипенко С.А. и др. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. 360 с.
4. Мырова Л.О., Ментус О.В., Давыдов А.Б. и др. Низкоорбитальные спутниковые системы связи Starlink и OneWeb // Труды Научно-исследовательского института радио. 2021. № 2. С. 36–45.
5. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб.: Корона принт, 2004. 380 с.
6. 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. № 6 (1). С. 22–31.
7. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход. М.: Вузовская книга, 2014. 143 с.
8. Аганесов А.В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 99–134. URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-02/04-Aganesov.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
9. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. М.: Альбина Паблишер, 2004. 536 с.
10. Невдяев Л.М., Смирнов А.А. Персональная спутниковая связь. М.: ТЭК, 1998. 216 с.
11. Муфтиев Р.Г., Хасанов В.Х., Закирьянова Г.Т. Беспроводные сети: монография. Уфа: Уфимский институт (филиал) российского государственного торгово-экономического университета, 2011. 233 с.

12. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ.; под ред. Б.С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. 600 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.

References

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

2. Fominov I.V., Khlebnikov S.G. Analysis of technological problems of building a swarm of small spacecraft // Defense complex — scientific and technical progress of Russia. 2019. No 1 (141). Pp. 24–28.

3. Pavlov A.N., Sokolov B.V., Osipenko S.A. et al. System analysis of organizational and technical systems for space purposes: textbook. St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky, 2018. 360 p.

4. Myrova L.O., Mentus O.V., Davydov A.B. et al. Low-orbit satellite communication systems Starlink and OneWeb // Proceedings of the Radio Research Institute. 2021. No 2. Pp. 36–45.

5. Ryzhikov Yu.I. Simulation modeling. Theory and Technology. St. Petersburg: Crown Print, 2004. 380 p.

6. Akmolov A.F., Kovalsky A.A., Efimov S.N. Proposals for the creation and functioning of a multi-satellite communication system based on a different-height orbital grouping // Proceedings of educational communication institutions. 2020. No 6 (1). Pp. 22–31.

7. Tsimbal V.A. Information exchange in data communication networks. Markov approach: Monograph. M.: Vuzovskaya kniga, 2014. 143 p.

8. Aganesov A.V. Model of Satellite Network with S-Aloha Protocol // Systems of Control, Communication and Security. 2015. No 2. Pp. 99–134. URL: <http://journals.intelgr.com/scs/archive/2015-02/04-Aganesov.pdf> (date of access: 25.06.2025).

9. Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. Satellite Communications Networks. Moscow: Albina Publ., 2004. 536 p.

10. Nevdyayev L.M., Smirnov A.A. Personal Satellite Communications. Moscow: TEK Publ., 1998. 216 p.

11. Muftiev R.G., Khasanov V.H., Zakiryanova G.T. Wireless networks: monograph. Ufa: Ufa Institute (branch) Russian State University of Commerce and Economics, 2011, 233 p.

12. Kleinrock L. Computing systems with queues. Transl. from English / Ed. B.S. Tsybakov. M.: World, 1979. 600 p.

13. Abazina E.S., Zinnurov S.H. The choice of a prototype routing protocol for a telecommunications network subsystem of information support for a complex ergatic system // Proceedings of the XLIII Russian Scientific and Technical Conference «Problems of efficiency and safety of complex technical and information systems». Serpukhov, 2024. Pp. 106–111.