



Научная статья / Original Article

УДК 629.78:004.94:519.876

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188119>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WDGNBC>

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В МНОГОСПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ

**Ю.В. Малюсин**✉

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия

✉ [yvmalyusin@mai.education](mailto:yvmalyusin@mai.education)

---

**Цитирование:** Малюсин Ю.В. Комплексный подход к оценке эффективности алгоритмов маршрутизации в многоспутниковой системе связи // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188119>

---

**Аннотация.** Активное развертывание многоспутниковых группировок, обеспечивающих различные коммуникационные сервисы, ставит перед разработчиками задачу стабильной и качественной маршрутизации данных. В данной статье предлагается метод комплексной оценки эффективности алгоритмов маршрутизации в спутниковых системах связи, основанный на ключевых показателях эффективности с использованием регрессионного анализа и нечеткой логики. Рассмотрены основные показатели эффективности, такие как пропускная способность, задержка, надежность, энергоэффективность, адаптивность, масштабируемость, и предложена формальная математическая модель. Представлены методы интеграции разнородных метрик в итоговую оценку, и рассмотрен пример численного эксперимента, позволяющего проиллюстрировать применение разработанного подхода. Результаты работы можно использовать в исследовательской сфере, в процессе проектирования и при эксплуатации многоспутниковых систем связи.

**Ключевые слова:** многоспутниковая система связи; маршрутизация; ключевые показатели эффективности; регрессионный анализ; нечеткая логика; пропускная способность; задержка; энергоэффективность.

---

# AN INTEGRATED APPROACH TO EVALUATING THE EFFICIENCY OF ROUTING ALGORITHMS IN MULTI-SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Yu.V. Malusin✉

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ [yvmalyusin@mai.education](mailto:yvmalyusin@mai.education)

---

**Цитирование:** Malusin, Yu.V. An Integrated Approach to Evaluating the Efficiency of Routing Algorithms in Multi-Satellite Communication Systems // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188119>

---

**Abstract.** The active deployment of multi-satellite constellations providing various communication services poses the challenge of ensuring stable and high-quality data routing. This paper proposes a method for the comprehensive evaluation of the efficiency of routing algorithms in satellite communication systems, based on key performance indicators using regression analysis and fuzzy logic. The main performance indicators are considered, such as throughput, delay, reliability, energy efficiency, adaptability, and scalability, and a formal mathematical model is proposed. Methods for integrating heterogeneous metrics into a final evaluation are presented, and an example of a numerical experiment illustrating the application of the developed approach is provided. The results of this work can be used in research, as well as in the design and operation of multi-satellite communication systems.

**Keywords:** multi-satellite communication systems; routing; key performance indicators; regression analysis; fuzzy logic; throughput; delay; energy efficiency.

---

## Введение

Современные многоспутниковые системы связи предъявляют возрастающие требования к пропускной способности, надежности и глобальности покрытия [1–3]. Несмотря на значительный прогресс в создании крупных орбитальных группировок [4], проблема эффективной маршрутизации данных сохраняет актуальность. Динамичное изменение топологии спутниковой сети, высокие скорости движения космических аппаратов на низкой околоземной орбите, ограниченные зоны радиовидимости и неравномерная загрузка каналов связи существенно усложняют поиск оптимальных маршрутов при передаче данных [2,5,6,8].

Данная статья посвящена разработке комплексной методики оценки алгоритмов маршрутизации в многоспутниковых системах связи. Она позволит анализировать их эффективность и на этой основе принимать решения по модернизации и улучшению алгоритмов. В наземных сетях связи широко применяются различные подходы для многокритериальной маршрутизации [9], однако их использование в космических системах неэффективно из-за жёстких энергетических ограничений, движения спутников и неоднородности каналов связи [2,6].

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Определить ключевые показатели эффективности.
2. Разработать способы агрегации этих показателей с использованием взвешенной суммы, множественной регрессии и нечёткого логического вывода.
3. Продемонстрировать процедуру вычисления показателей и формирования интегрального показателя на упрощённой модели из четырех спутников связи.
4. Сформулировать перспективные направления дальнейших исследований и практического применения данной методики в многоспутниковых системах связи.

Основные требования к обеспечению качества обслуживания в многоспутниковых системах связи, которые должна учитывать маршрутизация, обобщены в таблице 1 [2,3,11].

Таблица 1

Ключевые показатели обеспечения качества обслуживания для многоспутниковых систем связи

Показатель обеспечения качества обслуживания	Требование к показателю	Значимость показателя для многоспутниковых систем связи
Сквозная задержка (End-to-End Delay)	$\leq 150$ мс для голоса, $\leq 300$ мс для интерактивных данных (рекомендация ITU-T G.114)	Из-за больших расстояний задержка распространения составляет десятки миллисекунд; неоптимальная маршрутизация может превысить порог обеспечения качества обслуживания
Джиттер (Delay Variation)	$\leq 30$ мс для потокового аудио/видео	Частые переключения каналов и неравномерная загрузка спутников делают параметр важным для качества потоковых сервисов
Потери пакетов (Packet Loss Rate)	$< 1$ % для видео уровня HD, $< 0.1$ % для данных управления	Ошибки и ограничения зоны радиовидимости повышают риск потери пакетов данных; маршрутизация должна минимизировать этот риск при выборе пути
Гарантированная пропускная способность (Bandwidth Guarantee)	от 10–50 Мбит/с (HD-/4K-стриминг), $\geq 100$ Мбит/с для backhaul-сценариев	Каналы неоднородны; алгоритм должен выбирать путь, способный обеспечить требуемую полосу пропускания
Доступность канала (Link Availability)	$\geq 99.9$ % в расчёте на месяц	При периодических «окнах видимости» маршрутизация должна быстро перестраиваться, чтобы обеспечивать заданный уровень доступности

Традиционные методы, ориентированные на оптимизацию лишь одного-двух ключевых показателей, например, минимизацию задержки ( $D$ ) или увеличение пропускной способности ( $B$ ), не учитывают системных компромиссов между показателями [9]. Поэтому в работе используется совокупность из шести ключевых показателей, охватывающая все уровни функционирования сети, от физических и канальных параметров до системно-эксплуатационных характеристик. Нормированные ключевые показатели эффективности – это метрики, которые агрегируются линейной свёрткой, множественной регрессией и методом нечеткой логики, что обеспечивает одновременный учёт и статистических данных, и экспертных оценок. Отказ от алгоритмов искусственного интеллекта был обусловлен их непредсказуемостью в условиях дефицита телеметрии и высоких рисков сбоев [2]. Методика апробирована на упрощённых моделях, показав свою работоспособность и адаптивность к реальным сценариям.

Для оценки эффективности маршрутизации в многоспутниковых системах связи выделим шесть ключевых показателей: пропускная способность ( $B$ ), задержка ( $D$ ), надёжность ( $R$ ), энергоэффективность ( $E$ ), адаптивность ( $A$ ) и масштабируемость ( $S$ ). Их математические модели описываются выражениями (1)-(6). Такой набор охватывает как ресурсные ограничения спутников, так и требования обеспечения качества обслуживания, а также способность сети подстраиваться под изменения топологии.

Выбор именно этих шести показателей обеспечивает комплексную, сбалансированную оценку алгоритмов маршрутизации в многоспутниковых системах связи.

### **Методологические основания и математическое моделирование ключевых показателей эффективности**

В многоспутниковых системах связи пропускная способность ( $B$ ) является одним из ключевых факторов из-за динамики изменения каналов и неравномерности загрузки [1,3]. Пропускная способность системы за интервал времени  $t \in [0, T]$  может быть выражена так:

$$B = \sum_{(i,j) \in E} \int_0^T C_{ij}(t) dt, \quad (1)$$

где  $C_{ij}(t)$  – это моментальная пропускная способность канала связи между  $i$  – спутниками или  $j$  – наземными станциями в момент времени  $t$ , а  $E$  – множество всех доступных каналов связи.

Вторая метрика – это задержка ( $D$ ), которая характеризует время доставки данных от отправителя к получателю. С учётом данных факторов полная задержка ( $D$ ) обычно представляется в виде суммы нескольких составляющих:

$$D = \sum_{k=1}^K (D_k + D_{trans,k} + D_{proc,k} + D_{queue,k}), \quad (2)$$

где  $D_k$  – задержка распространения,  $D_{trans,k}$  – передача,  $D_{proc,k}$  – обработка,  $D_{queue,k}$  – ожидание в очереди,  $K$  – число сегментов маршрута.

С учётом потенциально возможных неблагоприятных условий, таких как отказы спутников или помехи в каналах связи, немаловажной метрикой остаётся надёжность ( $R$ ) [2,3]. Вероятность успешной доставки данных через  $K$  сегментов маршрута можно представить в виде:

$$R = \prod_{k=1}^K P_k, \quad (3)$$

где  $P_k$  – это вероятность прохождения данных без ошибок и потерь, на каком либо участке сети.

Спутники связи на низких орбитах обладают весьма ограниченным запасом энергии. По этой причине энергоэффективность ( $E$ ) в маршрутизации многоспутниковых системах связи становится ключевым фактором для обеспечения стабильной и длительной работоспособности сети [2,13]. В метрике ( $E$ ) это отношение переданных данных к затраченной энергии:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i}{\sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta t}, \quad (4)$$

где  $\Phi_i$  – объём данных, которые успешно переданы  $i$ -м спутником за время  $\Delta t$ ,  $P_i$  – мощность, которую он расходовал в процессе передачи.

Адаптивность ( $A$ ) показывает количественную быстроту перестройки маршрутов, и обычно ее задают обратной величиной времени восстановления [2,13]:

$$A = \frac{1}{T_{\text{recovery}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{recovery}}$  – это время, за которое спутниковая сеть возвращается к стабильному функционированию после сбоя.

Масштабируемость ( $S$ ) можно оценивать через изменение основных ключевых параметров при росте количества узлов сети  $N$ :

$$S(N) = \frac{f(N)}{f(N_0)}, \quad (6)$$

где  $f(N)$  – параметр производительности сети (пропускная способность, средняя задержка и т.д.) для системы из  $N$  спутников,  $f(N_0)$  – базовый уровень при некотором эталонном числе узлов ( $N_0$ ) [8,6].

### **Интеграция показателей и оценка эффективности**

Определив ключевые показатели, необходимо объединить их в единую систему для количественной оценки алгоритмов маршрутизации в многоспутниковых системах связи [3]. Часто рассматривать каждый показатель по отдельности оказывается недостаточно для принятия проектных решений или детальной сравнительной оценки алгоритма. Поэтому здесь нужен подход, который позволяет учесть различные компромиссы между этими метриками и получить обобщённый «балл» или «уровень» производительности сети [3,15].

В наземных системах связи каждую метрику либо оптимизируют отдельно, либо ее сводят в многокритериальную функцию (с определёнными весами) [2,4]. В многоспутниковых системах динамика и неоднородность сети значительно выше, поэтому наиболее эффективным подходом является комплексная оценка алгоритмов маршрутизации, нежели анализ отдельных метрик.

Комплексный учёт всех ключевых показателей является развитием монокритериальной оптимизации, при которой, например, высокая пропускная способность достигается ценой снижения надёжности. Использование весовых коэффициентов или параметров регрессионных/нечётких моделей позволяет подстраивать систему оценок под конкретные задачи и сценарии.

Одним из наиболее распространённых способов агрегирования ключевых показателей считается модель со взвешенными коэффициентами [9]. Пусть

$K_1, K_2, \dots, K_m$  – нормированные (обычно в пределах  $[0,1]$ ) значения выбранных показателей, а  $w_1, w_2, \dots, w_m$  – их весовые коэффициенты, удовлетворяя условию  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$  [9]. А итоговая оценка будет выражена формулой:

$$S_{base} = \sum_{i=1}^m w_i \cdot K_i, \quad (7)$$

Каждый показатель вносит вклад в общий результат, а вес  $w_i$  регулирует его значимость. Для многоспутниковых систем можно, например, установить повышенный вес  $w_{energy}$  для энергоэффективности, если сеть работает в режиме жёстких ограничений по питанию, или же увеличить  $w_{capacity}$  для необходимости в пиковых нагрузках сети.

Для того чтобы более гибко описать влияние каждого ключевого показателя на общую эффективность, можно привлечь методы множественной регрессии [2,3,6]. Пусть  $Y$  – интегральный индекс, характеризующий алгоритм маршрутизации с учётом совокупных показателей качества обслуживания и качество восприятия, а  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – метрики (либо те же  $K_1, \dots, K_m$ , либо их некоторые преобразованные формы). Тогда регрессионная модель может иметь вид:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \phi_i(x_i) + \sum_{i \neq j} \gamma_{ij} (\phi_i(x_i) \times \phi_j(x_j)) + \dots + \varepsilon, \quad (8)$$

где  $\phi_i(\cdot)$  – некоторые нелинейные преобразования, такие как логарифмические и степенные, а  $\gamma_{ij}$  – коэффициенты учёта различного взаимодействия между метриками  $x_i$  [3,11,16].

Поэтому практическая ценность регрессионного анализа заключается в определении коэффициентов  $\beta_i, \gamma_{ij}$  на основе реальных или симуляционных данных и возможности дальнейшего прогнозирования изменения итоговой оценки  $Y$  при изменении одного из ключевых показателей.

Ряд экспертов в области космических систем связи отмечает сложность достоверной оценки для определённых параметров, поэтому в целях интеграции неточных или частично неточных экспертных данных применяется метод нечеткой логики [13].

## Сочетание методов и формирование итоговой оценки

На практике полезно комбинировать перечисленные подходы, такие как взвешенная сумма, регрессионная модель и нечёткая логика. Типичным компромиссным решением будет:

$$S_{final} = \lambda \cdot S_{base} + (1 - \lambda) \cdot S_{fuzzy}, \quad (9)$$

где  $S_{base}$  – классический взвешенный вариант,  $S_{fuzzy}$  – результат нечётко-логического моделирования, а  $\lambda$  ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ) позволяет определить, какие соображения были более значимы, объективные «жёсткие» данные или гибкие экспертные правила [1,3,6,13,16]. Если же имеются широкие статистические выборки измерений, то в этот же «финальный» показатель можно добавлять компоненту из регрессионного анализа, например, которые учитывают нелинейные эффекты.

После определения набора ключевых показателей возникает необходимость интегрировать все показатели в единую структуру, которая позволяет давать количественную и комплексную оценку алгоритмов маршрутизации [6].

### Алгоритм комплексной оценки

Сначала происходит выбор ключевого показателя на основе реальных данных системы, а если речь будет идти о моделировании, то данные будут генерироваться симулятором (NS-3, OPNET, агентное моделирование) [2,5].

Каждая метрика переводится в отрезок  $[0,1]$  для упрощения их последующей интеграции. Например,  $K_i = (K_i - K_{i,min}) / (K_{i,max} - K_{i,min})$ .

Далее происходит назначение весов  $w=(w_1, \dots, w_m)$ . Приоритеты задаются экспертно, методом парных сравнений (АНР) или статистическим анализом [13].  
Расчёт базовой оценки:

$$S_{base} = \sum_{i=1}^m w_i K_i. \quad (10)$$

И на этом этапе будет видно, какие алгоритмы имеют высокую совокупную оценку, а какие – нет. Однако могут проигрываться тонкости нелинейных взаимодействий. Построение модели:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \phi_i(K_i) + \sum_{i < j} \gamma_{ij} (\phi_i(K_i) \times \phi_j(K_j)) + \dots + \varepsilon. \quad (11)$$

Здесь  $\phi_i$  – возможно нелинейные функции,  $\gamma_{ij}$  – коэффициенты взаимодействия показателей.

В регрессионной модели полученный результат  $Y_{reg}$  интерпретируется как скорректированная оценка, учитывающая комплексные зависимости [11]. Например, если задержка ( $K_D$ ) возрастает вместе с пропускной способностью ( $K_B$ ), то итоговый показатель может существенно снизиться, если регрессия показывает сильную негативную взаимосвязь.

В нечеткой логике для каждого ключевого показателя задаются категории («низкая», «средняя», «высокая») и функции принадлежности (треугольные, трапециевидные или гауссовские). Например, если  $K_B$  «Высокая»,  $K_D$  «Низкая» и  $K_A$  «Высокая», то итоговая оценка «Отлично» [13].

Полученная нечеткая оценка (fuzzy score) переводится в числовую шкалу [0,1] (или [0,100]). Обозначим этот итог  $S_{fuzzy}$ .

Поскольку каждый из описанных методов (взвешенная сумма, регрессия, нечеткая логика) даёт свою трактовку, стоит сформировать комбинированную итоговую оценку:

$$S_{final} = \alpha \cdot S_{base} + \beta \cdot Y_{reg} + \gamma \cdot S_{fuzzy}, \text{ где } \alpha + \beta + \gamma = 1. \quad (12)$$

–  $\alpha$  определяет вес линейного подхода;

–  $\beta$  – вклад регрессионного анализа, отражающего эмпирически выявленные взаимодействия;

–  $\gamma$  – степень доверия нечётко-логическим (экспертным) суждениям.

Проводится сопоставление итоговых оценок для разных алгоритмов маршрутизации (А, В, С и т.д.) [3,15,16].

При необходимости анализируется чувствительность, варьируя веса  $w$  и коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma$ . рисунок 1.

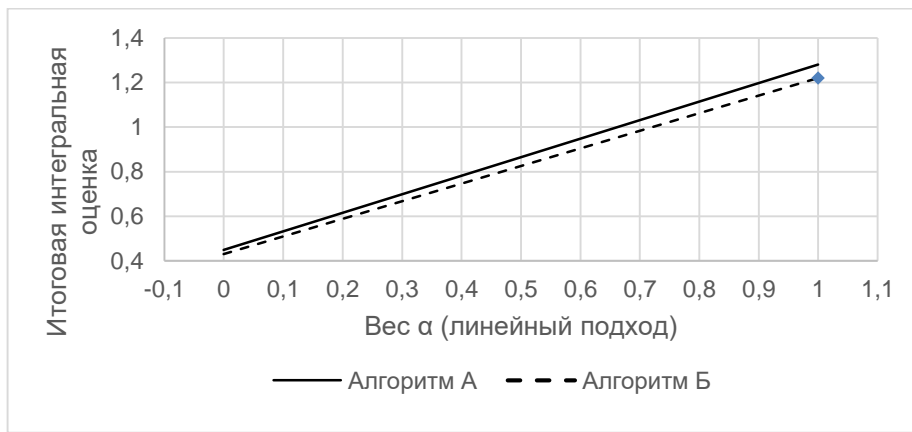


Рисунок 1 – Анализ чувствительности итоговой оценки к изменению весовых коэффициентов (алгоритмы А и В) (Разработано автором)

По результатам выбирается алгоритм, набравший наибольший  $S_{final}$ , либо формируются условия (когда А эффективнее, а когда В). Первоначально используется взвешенная сумма, а затем при необходимости учесть сложные зависимости и неопределённости добавляются регрессия или нечеткая логика [9].

Блок-схема интеграции методов оценки ключевых показателей для алгоритма маршрутизации в многоспутниковой системе представлена на рисунке 2.

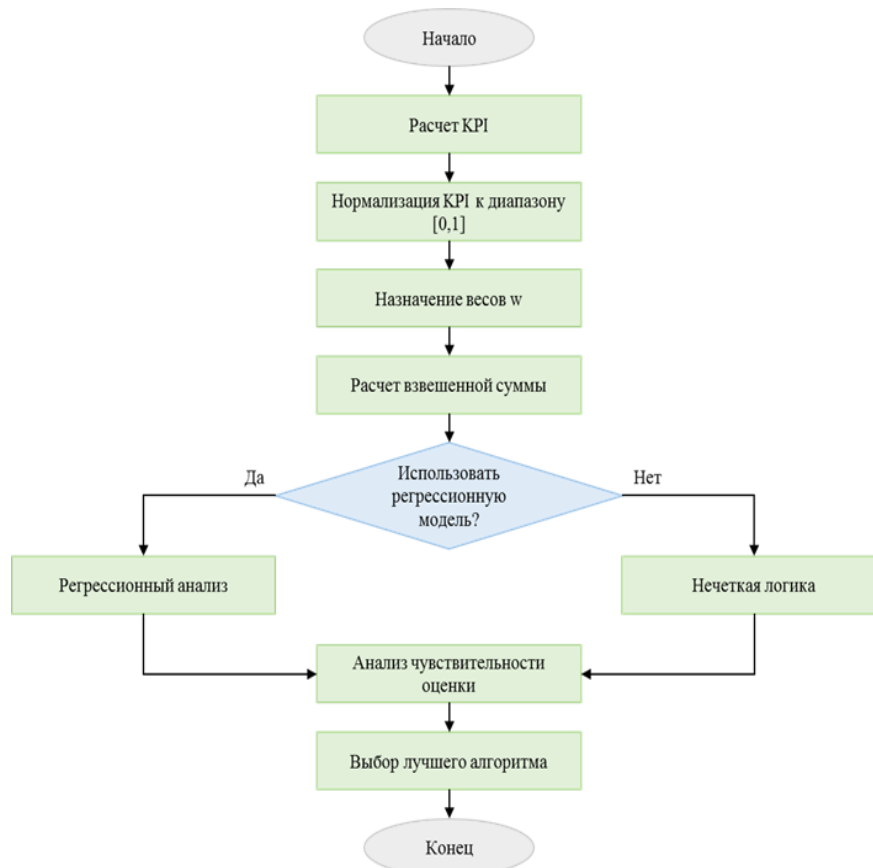


Рисунок 2 – Блок-схема интеграции методов оценки ключевых показателей для алгоритма маршрутизации в многоспутниковой системе (Разработано автором)

Таким образом, предложенный алгоритм интегрированной оценки содержит как формальные (взвешенные и регрессионные) модели, так и гибкий инструмент (нечеткую логику) для учёта экспертных оценок и неопределённостей.

Для демонстрации и валидации изложенных ранее методов и интегрированного подхода к оценке эффективности маршрутизации в многоспутниковой системе целесообразно рассмотреть пример упрощённого, но достаточно показательного эксперимента. Цель эксперимента – показать расчёт ключевых показателей, их интеграцию и влияние на оценку алгоритмов маршрутизации.

### **Комплексный анализ и выбор архитектуры и параметров сети**

Реальные системы с сотнями и тысячами спутников сложны для представления в формате одной иллюстративной статьи, поэтому для наглядной демонстрации предложенной методики ограничимся упрощённой моделью из 4-5 спутников на низкой орбите. Временная динамика не учитывается – рассматривается статическая топология сети в фиксированный момент времени [2,6].

В рамках данного примера были приняты следующие основные допущения: расстояния между космическими аппаратами связи соответствуют типовым значениям для заданной орбиты, мощность передатчиков фиксирована, энергопотребление пропорционально времени передачи. Такой подход позволяет сосредоточиться на расчёте ключевых показателей без погружения в детали орбитальной механики.

### **Исходные данные и топология сети**

Рассмотрим гипотетическую группировку из четырёх спутников  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , расположенных на низкой околоземной орбите и одной наземной станции  $G$ . Связи между спутниками либо существуют (принимая их пропускную способность больше нуля), либо отсутствуют (пропускная способность равна нулю). Для этого упрощения возьмём таблицу параметров каналов,

соответствующих времени « $t=0$ » (условная моментальная конфигурация), представленных в таблице 2.

Таблица 2

Параметры каналов упрощенной модели

Канал	Пропускная способность $C_{ij}$ (Мбит/с)	Расстояние $d_{ij}$ (км)	Вероятность безошибочной передачи $P_{ij}$	Примечания
$S_1 - S_2$	20	700	0.98	Ориентировочно близкое расположение на орбите
$S_2 - S_3$	10	600	0.94	Средняя дальность, смешанные условия видимости
$S_3 - S_4$	15	850	0.96	Умеренная дальность, возможна частичная тень
$S_1 - S_3$	8	550	0.95	Дополнительная связь, но пропускная способность ограничена
$S_2 - S_4$	5	1000	0.92	Довольно далёкое положение, слабый сигнал
$S_1 - S_G$	12	800	0.97	Прямая видимость с наземной станцией, но не оптимальный угол над горизонтом
$S_4 - S_G$	18	900	0.96	Более сильная антенная система, но значительная дальность

В контексте предложенной топологии спутники  $S_2$  и  $S_3$  могут служить промежуточными узлами при передаче данных между  $S_1$  и  $S_4$ , либо при связи с наземной станцией  $G$ , которая позволяет выходить в глобальную сеть [3]. На основании этих данных мы можем вычислить набор ключевых показателей, определённый в предыдущих разделах.

Основной смысл метрики «пропускная способность» – оценить суммарный потенциал сети в текущий момент времени. Мы суммируем пропускные способности всех доступных каналов (учитывая, что каналы двунаправленные, но здесь считаются как одна совокупная полоса пропускания):

$$B = (20 + 10 + 15 + 8 + 5 + 12 + 18) \text{ Мбит/с} = 88 \text{ Мбит/с}. \quad (13)$$

Анализ значения  $B \approx 88$  Мбит/с показывает, что это теоретический верхний предел, если все каналы задействовать параллельно, что практически не всегда возможно в реальной маршрутизации, но служит ориентиром для оценки «ёмкости» сети [13].

Задержка в каждом канале складывается из задержки распространения ( $D = \frac{d}{c}$ ) и передачи пакета ( $D_{trans} = \frac{L}{c}$ ), а также может включать задержки обработки ( $D_{proc}$ ) и ожидания в очереди ( $D_{queue}$ ). Для иллюстрации возьмём пакет длиной  $L = 10^4$  бит, а задержку обработки и ожидания априори

приравняем к некоторому небольшому значению (например,  $D_{proc}=0.5$  мс,  $D_{queue}=1.0$  мс).

Для канала  $S_1 - S_2$ :

$$D_{1-2} = \frac{700 \times 10^3}{3 \times 10^8} \approx 2.33 \text{ мс}, D_{trans,1-2} = \frac{10^4 \text{ бит}}{20 \times 10^6 \text{ бит/с}} = 0.5 \text{ мс} \quad (14)$$

Тогда совокупная задержка

$$D_{1-2} \approx 2.33 + 0.5 + 0.5 + 1.0 = 4.33 \text{ мс} \quad (15)$$

Аналогичные вычисления (с учётом реальных расстояний и пропускных способностей) проводят для оставшихся каналов, получая набор значений  $\{D_{1-3}, D_{2-3}, \dots, D_{4-G}\}$ . В итоге при определении маршрута учитывается суммарная задержка по цепочке каналов, что способствует выбору оптимального пути для передачи данных (например,  $S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$  или  $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4$  и т. п.).

В данном примере надёжность – это вероятность безошибочной передачи  $P_{ij}$ , указанная в 4-м столбце таблицы 2. Предположим, необходимо передать данные от  $S_1$  к  $G$ . Возможны разные маршруты, например:

1. Маршрут А:  $S_1 \rightarrow G$  напрямую (вероятность 0.97).

2. Маршрут В:  $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow G$ .

Вероятность такого пути будет  $0.98 \times 0.94 \times 0.96 \times 0.96 \approx 0.851$ .

3. Маршрут С:  $S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow G$  ( $0.95 \times 0.96 \times 0.96 \approx 0.874$ ).

Видно, что прямой маршрут «А» обеспечивает наибольшую надёжность, хотя и может уступать другим в пропускной способности или задержке.

Предположим, что спутник  $S_1$  потребляет  $P_1=50$  Вт при активной передаче, а спутник  $S_4$  – 60 Вт. Пусть за 1 секунду работы ( $\Delta t=1$  с) спутник  $S_1$  смог передать  $\Phi_1=2 \times 10^7$  бит, а  $S_4$  –  $\Phi_4=3 \times 10^7$  бит. Тогда, суммарно:

$$E = \frac{\Phi_1 + \Phi_4}{P_1 \cdot \Delta t + P_4 \cdot \Delta t} = \frac{2 \times 10^7 + 3 \times 10^7}{50 + 60} = \frac{5 \times 10^7}{110} \approx 4.545 \times 10^5 \text{ бит/Дж}. \quad (16)$$

Если же при другом алгоритме маршрутизации распределение нагрузки меняется (и другой спутник, например,  $S_2$ , включается интенсивнее), значение  $E$  может повыситься или понизиться, сигнализируя о большей или меньшей энергоэффективности сети.

Для иллюстрации предположим, что разрыв канала  $S_3 - S_4$  (из-за прохождения спутника  $S_4$  над горизонтом) обнаруживается и компенсируется алгоритмом маршрутизации за  $T_{recovery}=0.2c$ . Тогда

$$A = \frac{1}{T_{recovery}} = \frac{1}{0.2} = 5c^{-1}. \quad (17)$$

Другой алгоритм, допускающий более длительный период обнаружения и перестройки, может иметь  $T_{recovery} \approx 1c$ , что даёт  $A=1c^{-1}$  и указывает на существенно меньшую способность адаптироваться к изменениям.

Допустим, мы решили смоделировать добавление пятого спутника  $S_5$ . При этом суммарная пропускная способность сети вырастает до  $B=100$  Мбит/с (за счёт новых каналов  $S_5$  к остальным), а в «базовой» конфигурации из 1 спутника (условный эталон) имелся уровень  $B_0=10$  Мбит/с. Тогда

$$S(N = 5) = \frac{100}{10} = 10. \quad (18)$$

Если одновременно выяснится, что задержка и надёжность при расширении сети практически не ухудшаются, можно сказать, что алгоритм маршрутизации имеет хорошую масштабируемость.

После расчёта всех метрик (или их усреднения по нескольким типовым маршрутам и условиям) можно нормализовать полученные значения  $\{K_B, K_D, K_R, K_E, K_A, K_S\}$  к интервалу  $[0,1]$ . Далее, согласно методологии из предыдущего раздела:

1. Взвешенная сумма:  $S_{base} = \sum_i w_i K_i$ .

2. Регрессионная корректировка: если имеются расширенные данные (результаты симуляции разных сценариев), строится модель  $Y = \beta_0 + \sum \beta_i \phi_i(K_i)$  и уточняется итоговая оценка  $S_{reg}$  [2,6].

3. Нечёткая логика: на основании заданных лингвистических правил (например, «пропускная способность Высокая» + «задержка Низкая» + «надёжность Средняя» = «Оценка Хорошая») получается  $S_{fuzzy}$  [13,11].

В итоге, при необходимости, все три вида интегрированных значений могут быть сведены в окончательную оценку  $S_{final}$  по схеме:

$$S_{final} = \alpha \cdot S_{base} + \beta \cdot S_{reg} + \gamma \cdot S_{fuzzy}, \quad (19)$$

где  $\alpha+\beta+\gamma=1$  отражают приоритет различных методов.

На примере показано, что даже в условной конфигурации из 4–5 спутников можно наглядно продемонстрировать значение пропускной способности, важность задержек, критический вклад надёжности, роль энергопотребления, необходимость быстрой адаптации и сохранение эффективности при увеличении числа узлов.

Описанная процедура расчёта и интеграции ключевых показателей в дальнейшем может быть повторена для различных алгоритмов маршрутизации. Сравнивая их значения  $S_{final}$ , мы получаем объективную основу для оценки: какой алгоритм лучше подходит под текущие требования.

### Интерпретация результатов и формирование интегрированной оценки

Чтобы сравнить работу алгоритмов, сначала нормируют ключевые показатели к диапазону [0,1] и сопоставляют их с идеальными значениями рисунок 3.

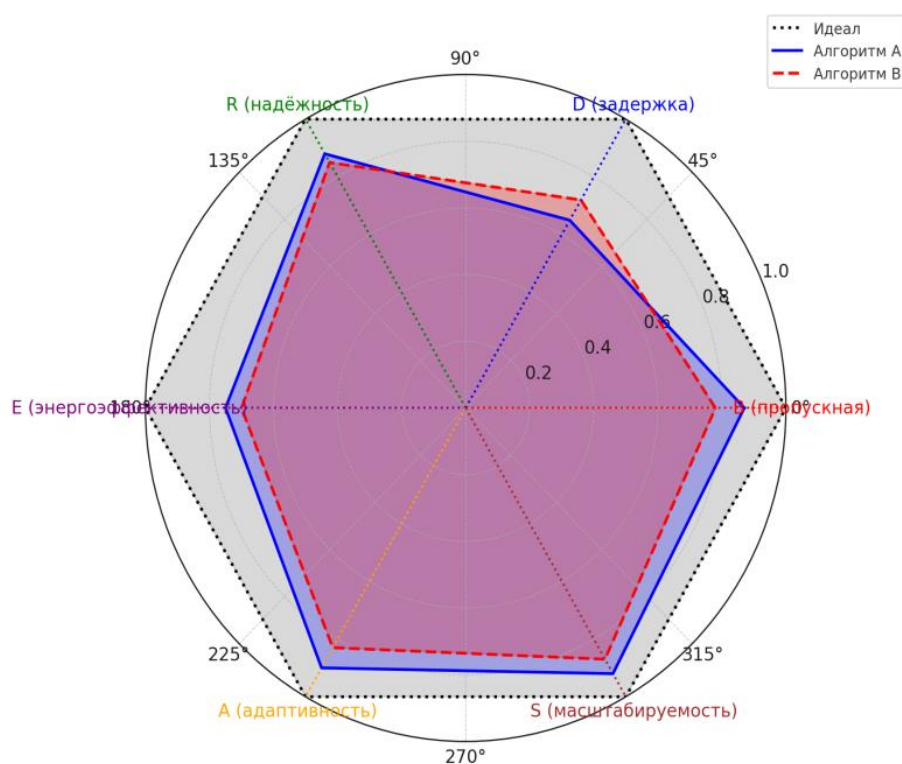


Рисунок 3 – Сравнительный анализ ключевых показателей алгоритмов маршрутизации (А и В) с идеальными показателями (Разработано автором)

Затем строят сравнительную таблицу (таблица 3), которая показывает, какие метрики лучше у каждого алгоритма.

Сравнительные значения нормированных КПЭ алгоритмов маршрутизации (А и В)

Метрика	Алгоритм А	Алгоритм В	Лучшая оценка
Пропускная способность	0.85	0.90	В
Задержка	0.75	0.60	А
Надёжность	0.80	0.85	В
Энергоэффективность	0.65	0.70	В
Адаптивность	0.90	0.50	А
Масштабируемость	0.88	0.80	А

Из таблицы следует, что А выигрывает по задержке, адаптивности и масштабируемости, а В – по пропускной способности, надёжности и энергоэффективности. Между показателями существуют противоречия: улучшение одного показателя может приводить к ухудшению другого [9].

В простейшем случае итоговую оценку  $S_{base}$  вычисляют так:

$$S_{base}(A) = w_B \cdot 0.85 + w_D \cdot 0.75 + w_R \cdot 0.80 + w_E \cdot 0.65 + w_A \cdot 0.90 + w_S \cdot 0.88, \quad (20)$$

$$S_{base}(B) = w_B \cdot 0.90 + w_D \cdot 0.60 + w_R \cdot 0.85 + w_E \cdot 0.70 + w_A \cdot 0.50 + w_S \cdot 0.80, \quad (21)$$

где  $\sum_i w_i = 1$ . Подбор различных комбинаций весов (например, увеличивая  $w_D$  и  $w_A$  для приоритета адаптивности и минимальной задержки) позволяет получить разные итоги и выявляет, когда выигрывает тот или иной алгоритм [3][10].

Если накапливать данные о работе алгоритмов в различных сценариях (моделируя разные уровни загрузки, орбитальные конфигурации), можно применить регрессионный анализ. Иными словами, «обучить» модель, которая бы выводила обобщённый индекс качества  $Y$  на базе вектора  $K = (K_B, K_D, \dots, K_S)$  [2,6]. Например:

$$Y = \beta_0 + \beta_B K_B + \beta_D \log(K_D) + \beta_R K_R + \beta_E K_E + \beta_A K_A + \beta_S K_S + \varepsilon, \quad (22)$$

где  $\beta_i$  – эмпирически оцененные коэффициенты. Если окажется, что  $\beta_D$  сильно отрицательно, значит регрессия показывает: при увеличении задержки итоговое качество резко падает, что отражает критичность метрики задержки для данного профиля сети.

Третий вариант, обсуждавшийся ранее, – нечёткая логика: Значения ключевых показателей переводят в лингвистические категории («Низкая», «Средняя», «Высокая»), а затем на основе набора правил (например, «если В Высокая и D Низкая и А Высокая, то Оценка Отличная») получают итоговую

нечёткую оценку [0,1] [8,11,13]. Это учитывает качественные и экспертные факторы.

Эксперты могут напрямую закладывать «пороговые значения», смягчая при этом ступенчатость переходов. В итоге получается оценка, хорошо учитывающая расплывчатые или качественные критерии, не всегда точно выраженные в числах.

Как отмечалось ранее в алгоритме комплексной оценки, предпочтительно комбинировать несколько подходов, особенно когда доступны и статистические, и экспертные данные.

Часто итоговую оценку  $S_{final}$  берут как взвешенную сумму нескольких результатов:

$$S_{final}(K) = \alpha \cdot S_{base}(K) + \beta \cdot Y_{reg}(K) + \gamma \cdot S_{fuzzy}(K), \alpha + \beta + \gamma = 1. \quad (23)$$

где  $\alpha$  отражает доверие к классической модели,  $\beta$  вклад регрессии, а  $\gamma$  силу нечетких правил.

Сравнение  $S_{final}(A)$  и  $S_{final}(B)$  позволяет определить, какой алгоритм лучше при данных приоритетах. При необходимости можно корректировать параметры (например, снижать число активных ретрансляторов для снижения энергопотребления) и повторять расчёты, чтобы увидеть изменения в метриках.

В реальной практике проектирования орбитальных систем такой анализ помогает определить, какой алгоритм маршрутизации использовать в качестве основного, или какие правила переключения с одного алгоритма на другой (например, при возрастании нагрузки или проблемах с задержкой) следует внедрить на уровень управления группировкой [1,6,16].

В итоге такой подход даёт оператору сети, формализованный способ учёта множества ключевых показателей и позволяет адаптировать выбор алгоритма маршрутизации под разные условия (нагрузку, орбитальную конфигурацию, ресурсные ограничения). Это ключевой этап методики оценки эффективности в многоспутниковых системах связи, когда отдельные метрики сливаются в понятную и практически значимую интегральную оценку [3].

## Заключение

Представленная в работе методика комплексной оценки эффективности алгоритмов маршрутизации позволяет учитывать специфику многоспутниковых систем связи, что затруднительно при прямом переносе подходов, разработанных для наземных сетей. Анализ показывает, что при динамичной топологии, ограниченных ресурсах и высоких требованиях к обеспечению качества обслуживания важно учитывать несколько ключевых показателей [1,2,6].

В рамках численного эксперимента показано, как данные ключевых показателей эффективности могут быть рассчитаны на упрощённом примере из четырёх-пяти спутников. Такой эксперимент хотя и не претендует на полноту моделирования реальных мегагруппировок, но демонстрирует практический механизм вычисления и дальнейшей интерпретации метрик, позволяя выявлять компромиссы между пропускной способностью и задержкой, надёжностью и энергопотреблением, адаптивностью и масштабируемостью [3,15].

Таким образом, ценность данной работы состоит в том, что предложенный многоаспектный подход к оценке алгоритмов маршрутизации сочетает ясную математическую формализацию ключевых показателей с набором методов их агрегирования, что даёт разработчикам и операторам многоспутниковых систем связи инструмент для сравнительного анализа и дальнейшей оптимизации спутниковых сетей [13,11]. Практическая польза проявляется в возможности гибко конфигурировать алгоритмы маршрутизации, исходя из конкретных условий эксплуатации, и в том, что каждый из представленных инструментов (взвешенная сумма, регрессия, нечёткая логика) может быть использован в зависимости от доступности данных и степени неопределённости исходной информации [6,16].

Дальнейшее развитие предложенной методики может идти по пути ее апробации на реалистичных симуляционных моделях, в том числе с привлечением телеметрических данных действующих спутниковых группировок и перспективных технологий, например, квантовой криптографии, кэширования на орбите, интеграции с наземными сетями 5G/6G [4,16,18,19].

Все это будет способствовать дальнейшему развитию космических телекоммуникационных систем, отвечающих растущим потребностям пользователей по всему миру.

---

### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

### **Список источников**

1. Cao X., et al. Dynamic routings in satellite networks: an overview // Sensors (Basel). — 2022. — Vol. 22, No. 12. — P. 4552. — DOI: 10.3390/s22124552.
2. Hu T., et al. Delay-packet-loss-optimized distributed routing using spiking neural networks in LEO satellite networks // Sensors. — 2022. — Vol. 23, No. 1. — P. 310. — DOI: 10.3390/s23010310.
3. Wang G., et al. Performance evaluation of routing algorithm in satellite self-organizing network on OMNeT++ platform // Electronics. — 2024. — Vol. 13, No. 19. — P. 3963. — DOI: 10.3390/electronics13193963.
4. Starlink satellites: facts, tracking and impact on astronomy [Электронный ресурс]. — Space.com. — URL: <https://www.space.com/starlink-satellites> (дата обращения: 27.02.2025).
5. Панков Д. А., Денисова Л. А. Разработка и исследование алгоритма маршрутизации в многофункциональном комплексе связи // Омский научный вестник. — 2017. — № 6. — С. 143–145.
6. Иванов С. В. Алгоритм централизованной многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в низкоорбитальных спутниковых системах связи // Системы управления, связи и безопасности. — 2018. — № 3. — С. 69–105.
7. Карсаев О. В. Анализ оперативности информационных взаимодействий в низкоорбитальных многоспутниковых группировках // Труды СПИИРАН. — 2019. — Т. 18, № 4. — С. 858–886.
8. Навар М., Воронова Л. И., Воронов В. И. Моделирование маршрутизации в кластеризованном рое БПЛА с использованием генетического алгоритма //

Первая мила. — 2023. — № 6 (114). — С. 46–53. — DOI: 10.22184/2070-8963.2023.114.6.46.52.

9. Alwan N. A. S., et al. Performance analysis of Dijkstra-based weighted sum minimization routing for wireless mesh networks using different dynamic programming algorithms // Journal of Engineering. — 2014. — Vol. 20, No. 2. — P. 49–60.

10. А.И. Остапюк, Ю.В. Малюсин, И.В. Усовик, П.О. Дроздова, Д.Р. Эфендиева Исследование генетического алгоритма маршрутизации в контексте многоспутниковых систем связи и передачи данных Научно-технический вестник Поволжья. -2024г.-№2.-С. 94-98

11. Wu Y., et al. Multi-objective optimization in multi-QoS routing strategy for software-defined satellite network // Sensors (Basel). — 2021. — Vol. 21, No. 19. — P. 6356. — DOI: 10.3390/s21196356.

12. Nithya N. S., et al. A new multi-criteria decision making method for the selection of construction contractors using interval valued fuzzy set // Complex & Intelligent Systems. — 2024. — DOI: 10.1007/s40747-024-01029-7.

13. Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Планирование целевого функционирования орбитальной группировки КА ДЗЗ с использованием генетического алгоритма // В книге: Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXIII международной научной конференции. 2018, С. 183-186.

14. Поселенцева Д. Ю., Замятина Е. Б. Опыт исследования алгоритмов маршрутизации и передачи данных в ad-hoc-сетях // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. — 2019. — № 4 (47). — С. 76–85. — DOI: 10.17072/1993-0550-2018-4-76-85.

15. Потюпкин А. Ю., Тимофеев Ю. А., Волков С. А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2021. — Т. 8, вып. 3. — С. 11–19. — DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19.

16. Zhang J., et al. Survey on routing technology of mega constellation // Space-Integrated-Ground Information Networks. — 2024. — Vol. 5, No. 1. — P. 2–13. — DOI: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024001.

17. Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин Анализ и формирование показателей эффективности в задаче распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 28-31

18. Radhakrishnan R., et al. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: physical layer to network layer [Электронный ресурс]. — URL: <https://arxiv.org/abs/1609.08583> (дата обращения: 31.03.2025).

19. Singh J., et al. OCI-OLSR: an optimized control interval-OLSR-based efficient routing mechanism for ad-hoc networks // Processes. — 2023. — Vol. 11, No. 5. — P. 1419. — DOI: 10.3390/pr11051419.

## References

1. Cao, X., et al. Dynamic routings in satellite networks: an overview. *Sensors (Basel)*, 2022, vol. 22, no. 12, p. 4552. DOI: 10.3390/s22124552.

2. Hu, T., et al. Delay-packet-loss-optimized distributed routing using spiking neural networks in LEO satellite networks. *Sensors*, 2022, vol. 23, no. 1, p. 310. DOI: 10.3390/s23010310.

3. Wang, G., et al. Performance evaluation of routing algorithm in satellite self-organizing network on OMNeT++ platform. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 19, p. 3963. DOI: 10.3390/electronics13193963.

4. Starlink satellites: facts, tracking and impact on astronomy. *Space.com*. Available at: <https://www.space.com/starlink-satellites> (accessed: 27.02.2025).

5. Pankov, D. A., Denisova, L. A. Development and research of a routing algorithm in a multifunctional communication complex. *Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 6, pp. 143–145. (In Russian)

6. Ivanov, S. V. Algorithm for centralized multipath routing with load balancing in low-orbit satellite communication systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 69–105. (In Russian)

7. Karsaev, O. V. Analysis of information interaction efficiency in low-orbit multi-satellite constellations. SPIIRAS Proceedings, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 858–886. (In Russian)
8. Navar, M., Voronova, L. I., Voronov, V. I. Modeling routing in a clustered UAV swarm using a genetic algorithm. First Mile, 2023, no. 6 (114), pp. 46–53. DOI: 10.22184/2070-8963.2023.114.6.46.52. (In Russian)
9. Alwan, N. A. S., et al. Performance analysis of Dijkstra-based weighted sum minimization routing for wireless mesh networks using different dynamic programming algorithms. Journal of Engineering, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 49–60.
10. Ostapiuk, A. I., Malyusin, Yu. V., Usovik, I. V., Drozdova, P. O., Efendieva, D. R. Investigation of a genetic routing algorithm in the context of multi-satellite communication and data transmission systems. Scientific and Technical Volga region Bulletin, 2024, no. 2, pp. 94-98. (In Russian)
11. Wu, Y., et al. Multi-objective optimization in multi-QoS routing strategy for software-defined satellite network. Sensors (Basel), 2021, vol. 21, no. 19, p. 6356. DOI: 10.3390/s21196356.
12. Nithya, N. S., et al. A new multi-criteria decision making method for the selection of construction contractors using interval valued fuzzy set. Complex & Intelligent Systems, 2024. DOI: 10.1007/s40747-024-01029-7.
13. Malyshev, V. V., Smolyaninov, Yu. A., Starkov, A. V. Planning the target functioning of an Earth remote sensing satellite constellation using a genetic algorithm. In: System Analysis, Control and Navigation: Abstracts of the XXIII International Scientific Conference, 2018, pp. 183-186. (In Russian)
14. Poselentseva, D. Yu., Zamyatina, E. B. Experience in researching routing and data transmission algorithms in ad-hoc networks. Bulletin of Perm University. Series: Mathematics. Mechanics. Computer Science, 2019, no. 4 (47), pp. 76–85. DOI: 10.17072/1993-0550-2018-4-76-85. (In Russian)
15. Potyupkin, A. Yu., Timofeev, Yu. A., Volkov, S. A. Group control of a multi-satellite orbital constellation based on the concept of joint operation modes. Rocket-Space Device Engineering and Information Systems, 2021, vol. 8, iss. 3, pp. 11–19. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19. (In Russian)

16. Zhang, J., et al. Survey on routing technology of mega constellation. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, vol. 5, no. 1, pp. 2–13. DOI: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024001.

17. Emelyanov, A. A., Malyshev, V. V., Starkov, A. V., Grishantseva, L. A., Zubkova, K. I., Zay Yar Win. Analysis and formation of performance indicators in the problem of distributing target information flows during the operation of Earth remote sensing space systems. Scientific and Technical Volga region Bulletin, 2019, no. 8, pp. 28-31. (In Russian)

18. Radhakrishnan, R., et al. Survey of inter-satellite communication for small satellite systems: physical layer to network layer. Available at: <https://arxiv.org/abs/1609.08583> (accessed: 31.03.2025).

19. Singh, J., et al. OCI-OLSR: an optimized control interval-OLSR-based efficient routing mechanism for ad-hoc networks. Processes, 2023, vol. 11, no. 5, p. 1419. DOI: 10.3390/pr11051419.

### Информация об авторах

**Юрий Владимирович Малюсин**, аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: [yvmalyusin@mai.education](mailto:yvmalyusin@mai.education)

### Information about the authors

**Yuri V. Malusin**, postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: [yvmalyusin@mai.education](mailto:yvmalyusin@mai.education)

---

Получено 16 декабря 2025 ● Принято к публикации 25 февраля 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026  
Received 16 December 2025 ● Accepted 25 February 2026 ● Published 30 April 2026

---