

Научная статья

УДК 004.05

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-18-25



# Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи

Александр Александрович Березкин, berezkin.aa@sut.ru

Роман Михайлович Вивчарь, vivchar.rm@sut.ru

Руслан Валентинович Киричек, kirichek@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Аннотация:** В настоящее время отмечается активный рост использования беспилотных систем в различных сферах деятельности. Качественное выполнение беспилотными системами своих целевых задач зависит от эффективности функционирования каналов информационного обмена для управления ими, которая складывается из нескольких критериев, что обуславливает отнесение задачи ее оценки к классу многокритериальных. В данной статье представлена соответствующая методика оценки, в основе которой лежит использование вероятности достижения комплекса целей функционирования в качестве обобщенного показателя эффективности. Для определения вероятности применяется широко распространенный метод ядерной оценки Розенблатта – Парзена. Описаны основные этапы методики и предложены рекомендации по ее использованию в рамках обеспечения качественного выполнения беспилотными системами своих целевых задач.

**Ключевые слова:** гибридные сети, беспилотные средства, система управления, многокритериальное оценивание, эффективность

**Ссылка для цитирования:** Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 18–25. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-18-25. EDN:VLZDQC

## Multi-Criteria Evaluation of UAV Control Efficiency in Hybrid Communication Networks

Aleksandr Berezhkin, berezkin.aa@sut.ru

Roman Vivchar, vivchar.rm@sut.ru

Ruslan Kirichek, kirichek@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Abstract:** Currently, there is an active growth in the use of unmanned systems in various spheres of activity. The qualitative fulfillment by unmanned systems of their target tasks depends on the efficiency of information exchange channels for their control, which consists of several criteria, which makes the problem of its evaluation a multi-criteria one. This article presents the corresponding evaluation methodology, which is based on the use of the probability of achieving a set of functioning goals as a generalized efficiency indicator. To determine the probability, the widely used Rosenblatt-Parzen nuclear estimation method is used. The main stages of the methodology are described and recommendations for its use in the framework of ensuring qualitative fulfillment by unmanned systems of their target tasks are offered.

**Keywords:** hybrid networks, unmanned vehicles, control system, multi-criteria evaluation, efficiency

**For citation:** Berezkin A., Vivchar R., Kirichek R. Multi-Criteria Evaluation of UAV Control Efficiency in Hybrid Communication Networks. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2024;10(1):18–25. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-18-25. EDN:VLZDQC

## Введение

Растущие потребности пользователей в объемах и качестве передачи данных, а также повсеместное внедрение телекоммуникационных сетей на объектах критической инфраструктуры приводят к необходимости внедрения на сетях связи инновационных архитектурных решений, автоматизации управления их работой и обеспечения безопасности информации.

Одним из наиболее значимых направлений технологического и рыночного развития сферы связи становится появление гибридных орбитально-наземных сетей связи (ГОНСС), включающие в свой состав негеостационарные спутниковые группировки и наземные сегменты различных сетей связи (Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2023 года № 3339-р). В силу своих технологических особенностей и взаимодействия с наземной инфраструктурой связи такие спутниковые и орбитально-наземные системы связи в перспективе окажут существенное влияние на рынки не только спутниковой, но также фиксированной и мобильной связи во всем мире.

В настоящее время работы по развитию многоспутниковых группировок ведутся госкорпорацией «Роскосмос» и ее дочерними структурами в рамках федерального проекта «Комплексное развитие космических информационных технологий» (проект «Сфера») госпрограммы «Космическая деятельность России», «SPUTNIX», «Бюро 1440» и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва».

Одним из активных пользователей таких сетей могут выступать различные беспилотные системы (БС), основным назначением которых является получение информации, а также проведение различных манипуляций на удалении от оператора. На рисунке 1 представлен вариант схемы ГОНСС для управления БС от первого лица, где в состав центра управления включена станция внешнего пилота (СВП), а также центральная (ЦССС) и региональные (РССС) станции спутниковой связи.

Методам взаимодействия, управления, а также построения перспективных сенсорных и летающих сетей на базе БПЛА для различных приложений посвящено множество публикаций [1–5]. Однако на текущий момент особую актуальность приобретает задача обоснования проектных решений по созданию каналов информационного обмена для управления БС в ГОНСС (далее – Каналов).

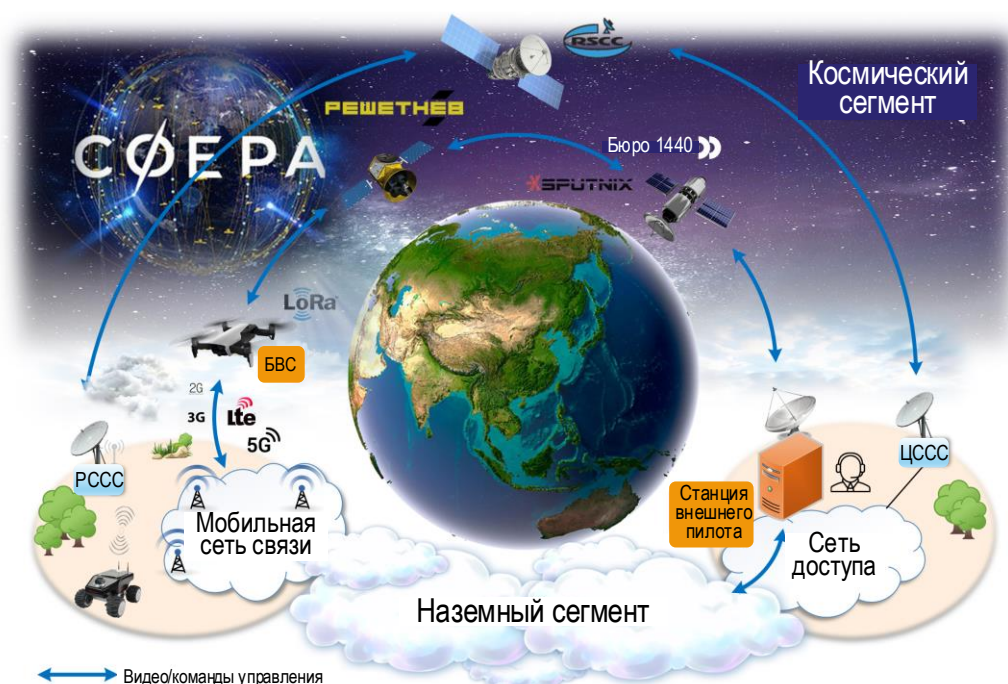


Рис. 1. Структура ГОНСС

Fig. 1. HSTNs Structure

Для эффективного выполнения БС своих целевых задач они должны быть оснащены качественными каналами информационного обмена для управления, в большинстве случаев основанными на использовании FPV-систем (*аббр. от англ. First Person View* – вид от первого лица).

**Обоснование вероятности достижения целей как обобщенного показателя эффективности функционирования каналов информационного обмена для управления беспилотными системами**

Обоснование управляющих решений по созданию Каналов связано с необходимостью удовлетворения требований к значениям показателей их эффективности, к которым относятся [6]:

$T_3^B$  – величина задержки при передаче видеопотока;

$T_3^Y$  – величина задержки при передаче управляющих воздействий;

$SSIM$  – показатель структурного сходства кадров видеопотока;

$PSNR$  – пиковое отношение сигнала к шуму;

$P_{сбоя}$  – вероятность сбоя передачи кадра.

Так как количество показателей эффективности отлично от одного, то задача обоснования управляющих решений по созданию Каналов принадлежит к классу многокритериальных задач. Анализ научно-методического обоснования предметной области показал, что для решения таких задач в настоящее время разработано большое число различных методов, сущность большинства которых основывается на свертке критериев к одному [7, 8]. Например, к таким методам относятся метод анализа иерархий и метод ELECTRA [9], метод главного критерия [10]. Однако применение этих методов сопряжено с различными сложностями, основные из которых связаны:

- с учетом важности критериев, например, при использовании методов главного критерия и анализа иерархий;

- с определением экспертных весовых коэффициентов для каждого из критериев при сведении их к одному и последующей его оптимизации.

Так как процесс функционирования Каналов подвержен влиянию различных случайных факторов – это обуславливает также случайный характер значений показателей эффективности их функционирования. Поэтому в качестве обобщенного показателя эффективности целесообразно использовать вероятность попадания значений показателей эффективности функционирования Каналов  $\{T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбоя}\}$  в область заданных требований  $P_k$ ,  $k = \overline{1,5}$ :

$$P[(T_3^B \in P_1), (T_3^Y \in P_2), (SSIM \in P_3), (PSNR \in P_4), (P_{сбоя} \in P_5)], \quad (1)$$

где  $P_1, \dots, P_5$  – области заданных требований к каждому из показателей эффективности функционирования Каналов.

Использование в качестве обобщенного показателя эффективности функционирования Каналов вероятности (1) позволяет уйти от трудностей, обусловленных применением существующих подходов к многокритериальному оцениванию качества функционирования Каналов, а также получить решение, при котором вероятность удовлетворения одновременно сразу всех требований будет максимальной [11].

Определение вероятности (1) связано с необходимостью нахождения плотности вероятности системы случайных величин. В общем случае найти эту плотность, зная плотности вероятности случайных величин, входящих в систему, не представляется возможным вследствие необходимости нахождения условных плотностей вероятностей этих величин. Получение последних возможно только по результатам натурных или вычислительных экспериментов.

Стоит отметить, что определение вероятности (1) также связано с трудностями, обусловленными работой с многомерными случайными величинами, для исследования которых необходимы значительные вычислительные мощности. Их привлечение при работе с многомерными случайными величинами связано с получением исходных данных о значениях этих величин и обработкой этих данных. До относительно недавнего времени для исследователей было большой проблемой организовать выделение таких мощностей. Однако стремительное развитие компьютерной техники в настоящее время привело к тому, что архитектура современных ЭВМ без особого труда позволяет решать указанные выше задачи. Следовательно, существует необходимость совершенствования научно-методического аппарата, позволяющего с помощью существующей вычислительной техники определить вероятность достижения комплекса целей функционирования БС.

Целью данной статьи является представление методики, позволяющей определить эту вероятность и на ее основе обосновать оптимальное решение по созданию Каналов в ГОНСС.

**Описание основных этапов методики**

Методика многокритериального оценивания эффективности Каналов в ГОНСС включает в себя выполнение четырех этапов, логика выполнения которых представлена на рисунке 2. В ее основе лежит имитационное моделирование процесса функционирования Каналов, которое позволяет учесть возможное влияние различных факторов неопределенности присущих этому процессу [11].

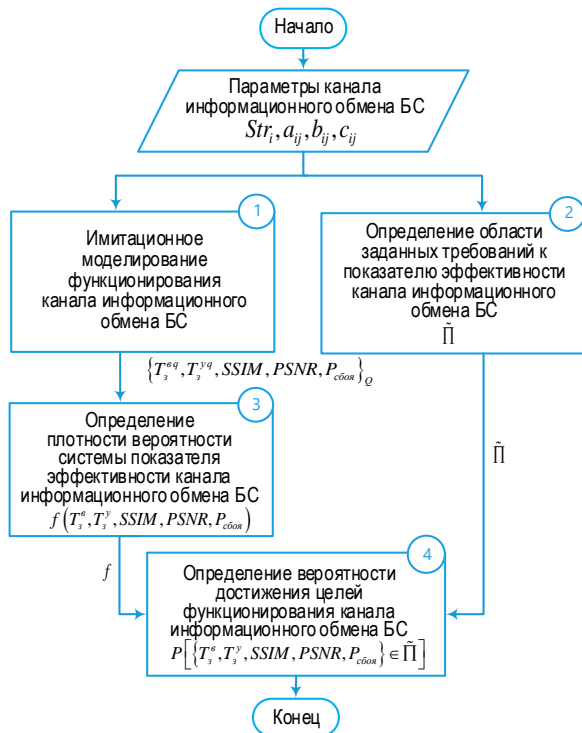


Рис. 2. Структурно-логическая схема методики

Fig. 2. Structural and Logical Diagram of the Methodology

Исходными данными для работы методики являются параметры, характеризующие облик Каналов (рисунок 3), к которым относятся [6]:  
 $Str = \{str_i\}_I$  – множество  $I$  структур сети передачи данных;  
 $A = \{a_i\}_{I_A}$  – множество  $I_A$  моделей сжатия видеопотока;  
 $a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iJ_{ai}}]^T$  – вектор, характеризующий параметры  $a_{ij}$   $i$ -й модели сжатия видеопотока;  
 $J_{ai}$  – количество параметров  $i$ -й модели сжатия/разжатия видеоданных;

$B = \{b_i\}_{I_B}$  – множество  $I_B$  моделей предсказания видеопотока;

$b_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iJ_{bi}}]^T$  – вектор, характеризующий параметры  $b_{ij}$   $i$ -й модели предсказания видеопотока;

$J_{bi}$  – количество параметров  $i$ -й модели предсказания видеопотока;

$F = \{f_i\}_{I_F}$  – множество  $I_F$  моделей сверхвысокого разрешения;

$f_i = [f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{iJ_{fi}}]^T$  – вектор, характеризующий параметры  $f_{ij}$   $i$ -й модели сверхвысокого разрешения;  
 $J_{fi}$  – количество параметров  $i$ -й модели сверхвысокого разрешения;

$C = \{c_i\}_{I_C}$  – множество  $I_C$  вариантов автоэнкодеров;

$c_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iJ_{ci}}]^T$  – вектор, характеризующий параметры  $c_{ij}$   $i$ -го автоэнкодера;

$J_{ci}$  – количество параметров  $i$ -го автоэнкодера.

Эти параметры служат входными данными для имитационного моделирования процесса функционирования Каналов, осуществляемого на первом этапе методики, целью которого является получение выборки показателей эффективности функционирования этой системы:

$$\{T_z^{B,q}, T_z^{Y,q}, SSIM^q, PSNR^q, P_{сбоя}^q\}_Q, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество «прогонов» имитационной модели процесса функционирования каналов информационного обмена для управления БС ( $q \in Q$ ).

Вторым этапом методики является определение области заданных требований к показателям эффективности функционирования системы управления БС:

$$\tilde{\Pi} = \{\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5\}. \quad (3)$$

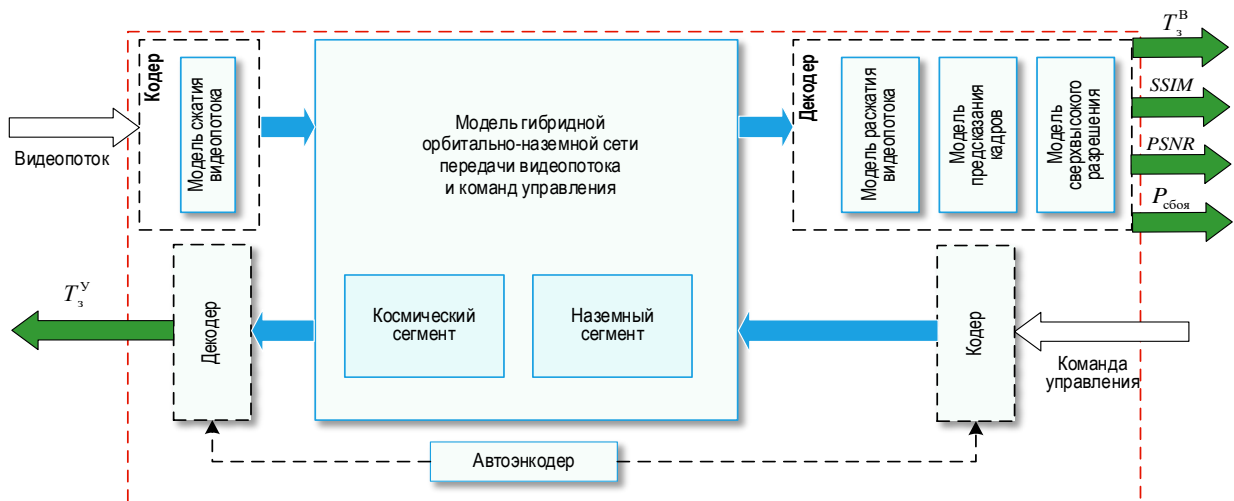


Рис. 3. Модель КИО для управления БС

Fig. 3. Information Exchange Model for Controlling Unmanned Systems



Для определения этой области можно использовать экспертные методы, а также различные методики, основанные на анализе процесса функционирования сходных каналов информационного обмена для управления.

В случае, если показатели эффективности функционирования Каналов являются независимыми – вероятность попадания значений этих показателей в область заданных требований вычисляется как:

$$P[\{T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбо́я}\} \in \tilde{\Pi}] = \\ = P_1[T_3^B \in \Pi_1] P_2[T_3^Y \in \Pi_2] P_3[SSIM \in \Pi_3] \times \\ \times P_4[PSNR \in \Pi_4] P_5[P_{сбо́я} \in \Pi_5]. \quad (4)$$

Нахождение  $P_1, \dots, P_5$  по результатам имитационного моделирования не представляет особого труда. Однако для того, чтобы воспользоваться выражением (2), необходимо убедиться в независимости случайных величин, для чего выполнить определенные процедуры (корреляционный анализ и обработка его результатов), сложность которых при количестве показателей эффективности, равном пяти, значительна, вследствие необходимости попарного оценивания зависимости показателей.

В этой связи необходимо включить в состав методики *третий* этап, сущность которого заключается в нахождении плотности вероятности системы показателей эффективности функционирования Каналов  $f(T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбо́я})$ , последующее интегрирование которой и позволяет получить искомую вероятность (1).

Для нахождения плотности вероятности системы случайных величин существует два класса методов: *параметрические методы восстановления плотности вероятности и непараметрические*.

Параметрические методы [12–14] предполагают на основе информации о виде функции плотности распределения случайной величины с определенными параметрами нахождение оценок этих параметров по имеющейся выборке данных. Однако для функции плотности распределения системы случайных величин практически невозможно априорно выбрать соответствующий ей вид [12].

Поэтому для нахождения плотности вероятности  $f(T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбо́я})$  целесообразно использовать непараметрические методы, среди которых наибольшее применение нашли гистограммный ме-

тод [15, 16] и ядерная оценка плотности Парзена – Розенблатта [11, 17, 18].

Использование гистограммного метода способно обеспечить высокое качество восстановления плотности вероятности, но только в случае больших значений выборки исходных данных. Поэтому для нахождения плотности вероятности системы показателей эффективности функционирования Каналов в предложенной методике использован метод ядерной оценки плотности вероятности.

Исходными данными для использования метода ядерной оценки плотности вероятности является выборка (2), полученная по результатам имитационного моделирования (*первый* этап методики).

Сущность метода заключается в нахождении искомой плотности вероятности с помощью выражения (5), где  $T_{3q}^B, T_{3q}^Y, SSIM_q, PSNR_q, P_{сбо́я\ q}$  – реализация каждого из показателей эффективности функционирования Каналов в  $q$ -ом опыте;  $h_1, \dots, h_5$  – ширины пропускания каждой случайной величины;  $Y_1, \dots, Y_5$  – ядерные функции.

В практике наибольшее распространение нашли такие ядерные функции как равномерная, треугольная, Епанечникова, Гауссова, трикубическая [18]. Важным моментом при использовании ядерной оценки плотности вероятности является выбор параметра  $h_k$ , так как неправильный выбор этого параметра может повлиять на адекватность оценки плотности вероятности. При использовании Гауссовой ядерной функции значение ширины пропускания вычисляется по правилу Сильвермана [11]:

$$h_k = 0,9 A_k I^{-0,2},$$

где  $A_k$  – вычисляется как минимальное из значений стандартного отклонения  $k$ -й последовательности выборки исходных данных и интерквартильного диапазона этой же последовательности, разделенного в последствии на 1,34.

Данные, полученные на *втором* и *третьем* этапах методики, являются исходными для *четвертого* этапа, на котором путем интегрирования плотности вероятности  $f(T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбо́я})$  по выражению (6) определяется вероятность попадания значений показателей эффективности функционирования Каналов в область заданных требований.

$$f(T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбо́я}) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \left( \frac{1}{h_1 h_2 h_3 h_4 h_5} Y_1\left(\frac{T_3^B - T_{3q}^B}{h_1}\right) Y_2\left(\frac{T_3^Y - T_{3q}^Y}{h_2}\right) Y_3\left(\frac{SSIM - SSIM_q}{h_3}\right) \right. \\ \left. Y_4\left(\frac{PSNR - PSNR_q}{h_4}\right) Y_5\left(\frac{P_{сбо́я} - P_{сбо́я\ q}}{h_5}\right) \right). \quad (5)$$

$$P = \underbrace{\int \int \int \int \int}_{\tilde{\Pi}} (T_3^B, T_3^Y, SSIM, PSNR, P_{сбо́я}) dP_{сбо́я} dPSNR dSSIM dT_3^Y dT_3^B. \quad (6)$$

В настоящее время существуют различные способы вычисления интеграла (4). В работе [11] для интегрирования используются специализированные функции различных прикладных программ, например, Matlab. Однако такие функции позволяют осуществить, как правило, только одно- или двукратное интегрирование. Интегрирование же более высокого порядка кратности предложено проводить с помощью вложенных интегралов. Но такой способ имеет существенный недостаток при использовании его для сложных подынтегральных функций, который заключается в значительных вычислительных сложностях и невысокой точности, особенно для больших порядков кратности.

Проведенные исследования показали, что для определения вероятности (4) в данной работе целесообразно использовать метод численного интегрирования на основе применения метода Монте-Карло [19], сущность которого заключается в том, что в случайно выбранных точках  $I$ -мерного пространства вычисляются значения подынтегральной функции, и на основе которых определяется ее среднее значение. Значение интеграла при этом равно произведению среднего значения функции на объем тела, определенного числом этих точек [20].

Полученная с помощью представленной методики вероятность попадания значений показателей эффективности функционирования Каналов в область заданных требований позволит в дальнейшем на основе ее оценки обосновать оптимальные значения параметров, характеризующих их облик.

#### Список источников

1. Динь Ч.З., Киричек Р.В. Метод взаимодействия БПЛА в быстро разворачиваемых летающих сетях для экстренных служб // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2019. Т. 1(74). С. 141–143. EDN:NGMFMM
2. Киричек Р.В. Сети беспилотных летательных аппаратов как элемент инфраструктуры умных городов // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, Россия, 20–28 апреля 2017). СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017. С. 166–167. EDN:ZOOMHR
3. Долгушев Р.А., Киричек Р.В., Владыко А.Г., Кучерявый А.Е. Программно-конфигурируемая архитектура взаимодействия наземного сегмента и беспилотного летательного аппарата в летающих сенсорных сетях // 2-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Интернет вещей и 5G" (INTHITEN 2016, Санкт-Петербург, Россия, 07 декабря 2016). СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2016. С. 1–6. EDN:XGFKCD
4. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей // Электросвязь. 2015. № 7. С. 9–11. EDN:UAYFNH
5. Кучерявый А.Е., Аль-Кадами Н.А. Покрытие, связность и плотность в двумерных и трехмерных беспроводных сенсорных сетях // Электросвязь. 2015. № 9. С. 6–10. EDN:UIQKIR
6. Березкин А.А. Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Модель системы управления мобильными роботизированными комплексами различного назначения // Электросвязь. 2023. № 6. С. 2–7. DOI:10.34832/ELSV.2023.45.8.002. EDN:XXOJNM
7. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991.
8. Титова А.А. Исследование многокритериальной задачи принятия решения о выборе франшизы для инвестирования при помощи метода FUZZY VICOR // Инженерный вестник Дона. 2021. № 1(73). С. 87–94. EDN:BFJNAS

#### Заключение

Применение вероятности достижения комплекса целей функционирования каналов информационного обмена с БС в качестве обобщенного показателя их эффективности позволило уйти от трудностей, обусловленных использованием существующих подходов к многокритериальному оцениванию качества стохастических систем, а также получить решение, при котором вероятность удовлетворения одновременно сразу всех требований будет максимальной.

В основе определения вероятности достижения комплекса целей функционирования каналов управления БС лежит широко распространенный метод ядерной оценки Розенблатта – Парзена. Использование этого метода позволило обеспечить более высокое, по сравнению с другими методами, качество аппроксимации плотности вероятности системы показателей эффективности Каналов.

Разработанный научно-методический аппарат позволит оценить эффективность функционирования каналов информационного обмена и на основе этой оценки в дальнейшем обосновать их оптимальные параметры, что обеспечит решение беспилотными системами своих целевых задач.

Предложенная методика гипотетически может быть использована для оценки эффективности функционирования различных стохастических объектов, характеризующихся двумя и более показателями эффективности.

9. Нефедов А.С. Сравнительный анализ метода ELECTRE III и метода анализа иерархий при решении многокритериальных задач // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 2. С.9–15. EDN:TAPLSW
10. Шварц Д.Т. Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Обзор // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 4. С.245–264. EDN:QZHКPV
11. Вивчарь Р.М., Птушкин А.И., Соколов Б.В. Методика многокритериального оценивания эффективности функционирования стохастических сложных технических систем // Авиакосмические приборостроение. 2022. № 7. С. 3–14. DOI:10.25791/aviakosmos.7.2022.1286. EDN:XCYDAI
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1969. 552 с.
13. Вивчарь Р.М., Решетников Д.В. Оценивание влияния параметров системы эксплуатации технологического оборудования РКК на вероятность выполнения технологической операции за заданное время // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 668. С. 197–207. EDN:BFSARU
14. Маслаков М.Л., Терновая А.К. Построение плотности распределения вероятностей КАМ сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 36–40. EDN:FIACYQ
15. Акимов С.С., Трипкош В.А. Коэффициенты корректировки метода гистограмм для определения законов распределения вероятности // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 10. С. 15–17. EDN:TCJQSL
16. Сызранцев В.Н., Невелев Я.П., Голофаст С.Л. Адаптивные методы восстановления функции плотности распределения вероятности // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. № 12. С. 3–11. EDN:TXOKPN
17. Давыдов В.С. Распознавание зарождающихся дефектов в узлах корабельных механизмов в результате вибродиагностирования на основе оптимальных решающих правил // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 19–24. DOI:10.1134/S0130308219030047. EDN:YYTLZZ
18. Поршнева С.В., Колосов А.С. Использование аппроксимации Розенблатта-Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 92. С. 1–27. EDN:RNEGGN
19. Вивчарь Р.М., Птушкин А.И., Соколов Б.В. Методика оценивания адекватности статистических имитационных моделей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2023. Т. 15. № 3. С. 5–14. DOI:10.14529/mmph230301. EDN:NLPLYR
20. Модебейкин А.А., Суханов А.А. Вычисление интегралов по методу Монте-Карло // E-SCIO. 2022. № 6(69). С. 553–565. EDN:FJGJSR

## References

1. Dinh T.D., Kirichek R.V. Method of UAV interaction in rapidly deployable flying networks for emergency services. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference of the Saint-Petersburg Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications Named after A.S. Popov, Dedicated to the Day of Radio*. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" Publ.; 2019. vol.1(74). p.141–143. EDN:NGMFMM
2. Kirichek R.V. Networks of unmanned aerial vehicles as an element of the infrastructure of smart cities. *Proceedings of the 72nd All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to Radio Day, 20–28 April 2017, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" Publ.; 2017. p.166–167. EDN:ZOOMHR
3. Dolgushev R.A., Kirichek R.V., Vladiko A.G., Kucheryavyi A.E. Software-configurable architecture for interaction between the ground segment and an unmanned aerial vehicle in flying sensor networks. *Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Internet of Things and 5G", INTHITEN 2016, 07 December 2016, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: SPbSUT Publ.; 2016. p.1–6. EDN:XGFKCD
4. Kucheryavy A.E., Vladiko A.G., Kirichek R.V. Theoretical and practical research trends in the field of flying ubiquitous sensor networks. *Electrosvyaz Magazine*. 2015;7:9–11. EDN:UAYFNH
5. Kucheryavy A.E., Al-Kadami N.A. Coverage, connectivity and density in 2D and 3D wireless sensor networks. *Electrosvyaz Magazine*. 2015;9:6–10. EDN:UIQKIR
6. Berezkin A.A., Vivchar R.M., Kirichek R.V. Model of the mobile robotic complex management system. *Electrosvyaz Magazine*. 2023;6:2–7. DOI:10.34832/ELSV.2023.45.8.002. EDN:XXOJNM
7. Saaty T.L., Kearns K.P. *Analytical Planning. The Organization of Systems*. Pergamon Press; 1985.
8. Titova A.A. Research of a multicriteria problem of decision about selecting a franchise to investment by using method of Fuzzy VICOR. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021;1(73):87–94. EDN:BFJNAS
9. Nefedov A.S. Comparative analysis of the ELECTRE III method and the method of hierarchy analysis in solving multicriteria problems. *Trudy bratskogo gosudarstvennogo universiteta seriia estestvennye i inzhenernye nauki*. 2018;2:9–15. EDN:TAPLSW
10. Schwartz D.T. Interactive methods for solving the problem of multicriteria optimisation. Review. *Science and Education of Bauman MSTU*. 2013;4:245–264. EDN:QZHКPV
11. Vivchar' R.M., Ptushkin A.I., Sokolov B.V. The technique for multi-criteria evaluation of the performance of stochastic complex technical systems. *Aerospace Instrument-Making*. 2022;7:3–14. DOI:10.25791/aviakosmos.7.2022.1286. EDN:XCYDAI
12. Wentzel E.S. *Probability Theory*. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1969. 552 p.


13. Vivchar R.M., Reshetnikov D.V. Estimation of influence of parameters of the system of operation of the technological equipment of the rocket-space complex on the probability of fulfilment of technological operation for the given time. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2019;668:197–207. EDN:BFSARU
14. Maslakov M.L., Ternovaya A.K. Estimation of the probability density function of QAM signals. *Digital Signal Processing*. 2021;3:36–40. EDN:FIACYQ
15. Akimov S.S., Tripkosh V.A. Correction factors for the histogram method for determining the laws of probability distribution. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021;10:15–17. EDN:TCJQSL
16. Syzrantsev V.N., Nevelev Y.P., Golofast S.L. Adaptive methods of restoration of the probability distribution density function. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2006;12:3–11. EDN:TXOKPN
17. Davydov V.S. Recognition of incipient defects in the units of ship machinery by vibrodiagnostics based on optimum decision rules. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(3):185–191. DOI:10.1134/S1061830919030045. EDN:RZNYWR
18. Porshnev S.V., Koposov A.S. Using Rozenblatt-Parzen approximation for recovering a cumulative distribution function of continuous random variable with a bounded single-mode distribution rule. *Scientific journal of KubSAU*. 2013;92:1–27. EDN:RNEGGN
19. Vivchar R.M., Ptushkin A.I., Sokolov B.V. Methodology for assessing the adequacy of statistical simulation models. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*. 2023;15(3):5–14. DOI:10.14529/mmph230301. EDN:NLPYLR
20. Modebeikin A.A., Sukhanov A.A. Calculation of integrals by Monte Carlo method. *E-SCIO*. 2022;6(69):553–565. EDN:FJGJSR

Статья поступила в редакцию 06.02.2024; одобрена после рецензирования 14.02.2024; принята к публикации 19.02.2024.


The article was submitted 06.02.2024; approved after reviewing 14.02.2024; accepted for publication 19.02.2024.

## Информация об авторах:


**БЕРЕЗКИН**  
**Александр Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0000-0002-1748-8642>

**ВИВЧАРЬ**  
**Роман Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0000-0003-3865-9102>

**КИРИЧЕК**  
**Руслан Валентинович**

доктор технических наук, доцент, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
 <https://orcid.org/0000-0002-8781-6840>