

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A WIRELESS NETWORK BASED ON TETHERED UAVS

V. M. Vishnevsky^{*,**}, Y. A. Avramenko^{*}, V. H. Nguyen^{**}, N. S. Kalmykov^{*}

^{*}Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
117997, Moscow, Russia,

^{**}Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
141700, Dolgoprudny, Russia

DOI: 10.24412/2073-0667-2025-1-60-77

EDN: DISNNV

This paper describes the advantages of implementing a broadband wireless network based on a tethered drone and evaluates its performance characteristics. It includes calculations for the expansion of the telecommunications coverage area (line-of-sight area) and the channel parameters between the base station (BS) on the drone and the ground station (GS) within line-of-sight. A stochastic polling model with batch packet servicing is proposed, which adequately describes the operation of the broadband wireless network with a centralized management mechanism. The network architecture and the protocol for interaction between the BS and GS are outlined to provide the necessary data for numerical calculations. A new approach for performance evaluation and numerical analysis is developed, combining machine learning methods with simulation modeling.

Key words: tethered drone, wireless network, line-of-sight, stochastic polling.

References

1. Arif M., Kim W. Analysis of Fluctuating Antenna Beamwidth in UAV-Assisted Cellular Networks // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. N 22. P. 4706.
2. Vladimirov S. [et al.]. The Model of WBAN Data Acquisition Network Based on UFP // *Lecture Notes in Computer Science. Distributed Computer and Communication Networks*. Springer International Publishing, 2020. P. 220–231.
3. Wang Y. [et al.]. A Channel Rendezvous Algorithm for Multi-Unmanned Aerial Vehicle Networks Based on Average Consensus // *Sensors*. 2023. Vol. 23, N 19. P. 8076.
4. Zhao W., Zhang J., Li D. Clustering and Beamwidth Optimization for UAV-Assisted Wireless Communication // *Sensors*. 2023. Vol. 23, N 23.
5. Zhu C. [et al.]. A Fairness-Enhanced Federated Learning Scheduling Mechanism for UAV-Assisted Emergency Communication // *Sensors*. 2024. Vol. 24, N 5. P. 1599.
6. Belmekki B. E. Y., Alouini M.-S. Unleashing the Potential of Networked Tethered Flying Platforms: Prospects, Challenges, and Applications // *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2022. V. 3. P. 278–320.
7. Marques M. N. [et al.]. Tethered Unmanned Aerial Vehicles A Systematic Review // *Robotics*. 2023. Vol. 12, N 4. P. 117.
8. Bushnaq O. M. [et al.]. Optimal Deployment of Tethered Drones for Maximum Cellular Coverage in User Clusters // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. Vol. 20, N 3. P. 2092–2108.

9. Dinh T. D. [et al.]. Structures and Deployments of a Flying Network Using Tethered Multicopters for Emergencies // *Lecture Notes in Computer Science. Distributed Computer and Communication Networks*. Vol. 12563. Springer International Publishing, 2020. P. 28–38.
10. Kishk M., Bader A., Alouini M.-S. Aerial Base Station Deployment in 6G Cellular Networks Using Tethered Drones: The Mobility and Endurance Tradeoff // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2020. Vol. 15, N 4. P. 103–111.
11. Safwat N. E.-D., Hafez I. M., Newagy F. 3D placement of a new tethered UAV to UAV relay system for coverage maximization // *Electronics*. 2022. Vol. 11, N 3. P. 385.
12. Vishnevsky V. [et al.]. Reliability Assessment of Tethered High-altitude Unmanned Telecommunication Platforms: k-out-of-n Reliability Models and Applications // *Springer Nature*, 01/2024. P. 167.
13. Borst S., Boxma O. Polling: past, present, and perspective // *Top*. 2018. Vol. 26. P. 335–369.
14. Vishnevsky V., Semenova O. Polling Systems and Their Application to Telecommunication Networks // *Mathematics*. 2021. Vol. 9, N 2.
15. Vishnevsky V. [et al.]. Analysis of a MAP/M/1/N Queue with Periodic and Non-Periodic Piecewise Constant Input Rate // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, N 10.
16. Vishnevsky V. M. [et al.]. Investigation of the ForkJoin System with Markovian Arrival Process Arrivals and Phase-Type Service Time Distribution Using Machine Learning Methods // *Mathematics*. 2024. Vol. 12, N 5.
17. Efrosinin D., Vishnevsky V., Stepanova N. Optimal Scheduling in General Multi-Queue System by Combining Simulation and Neural Network Techniques // *Sensors*. 2023. Vol. 23, N 12.
18. Vishnevsky V. [et al.]. Performance Evaluation of the Priority MultiServer System MMAP/PH/M/N Using Machine Learning Methods // *Mathematics*. 2021. Vol. 9, N 24.
19. Friis H. T. A Note on a Simple Transmission Formula // *Proceedings of the IRE*. 1946. Vol. 34, N 5. P. 254–256.
20. Johnson R. *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, 1984. P. 1408.
21. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications / ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition*.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ НА БАЗЕ ПРИВЯЗНЫХ БПЛА

В. М. Вишнеvский^{*,**}, Ю. А. Авраменко^{*}, В. Х. Нгуен^{**}, Н. С. Калмыков^{*}

^{*}Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
117997, Москва, Россия,

^{**}Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский
университет),
141700, Долгопрудный, Россия

УДК 519.872

DOI: 10.24412/2073-0667-2025-1-60-77

EDN: DISNNV

В настоящей работе дано описание преимуществ реализации широкополосной беспроводной сети на базе привязного дрона и оценки характеристик ее производительности. Приводится расчет увеличения зоны телекоммуникационного покрытия (зоны прямой видимости) и параметров канала связи между базовой станцией (БС), расположенной на дроне, и наземной станцией (НС) в пределах прямой видимости. Предложена модель стохастического поллинга с групповым обслуживанием пакетов, адекватно описывающая функционирование широкополосной беспроводной сети с централизованным механизмом управления. Дано описание архитектуры сети и протокола взаимодействия БС и НС с целью получения исходных данных при проведении численных расчетов. Для оценки производительности сети и проведения численных расчетов разработан новый подход, базирующийся на комбинации методов машинного обучения и имитационного моделирования.

Ключевые слова: привязной дрон, беспроводная сеть, прямая видимость, стохастический поллинг.

Введение. В настоящее время широкое применение, как в гражданских, так и в оборонных отраслях получили автономные беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Особенно эффективно они используются для создания современных широкополосных беспроводных сетей и различных систем связи [1–5]. Основным недостатком автономных БПЛА и, соответственно, телекоммуникационных сетей на их основе, является ограниченное время функционирования (в пределах 1 часа), которое связано с малым ресурсом аккумуляторной батареи, установленной на борту БПЛА. В связи с этим, такие БПЛА не могут эффективно использоваться в системах, где требуется длительное время функционирования, например, в системах управления безопасностью и охраны критически важных объектов (атомных станций, аэродромов, протяженных мостов и участков границы).

Длительное функционирование могут обеспечивать привязные БПЛА (привязные высотные беспилотные платформы), электропитание двигательных установок и аппаратуры полезной нагрузки которых осуществляется от наземных источников энергии по кабельному тросу. Привязные высотные беспилотные платформы занимают промежуточное положение между спутниковыми системами и наземными системами, оборудование которых (базовые станции сотовой связи, радиорелейное и радиолокационное оборудование и т.д.)

располагаются на высотных сооружениях. По сравнению с дорогостоящими спутниковыми системами привязные БПЛА обладают высокой экономичностью, а наземные телекоммуникационные системы превосходят по обширности зон телекоммуникационного и видео покрытия.

В последних обзорах [6, 7] по тематике привязных высотных платформ приведены ссылки на многочисленные статьи по методам проектирования и архитектуре таких платформ на базе высотных аэростатов, дирижаблей и самолетов. Однако слабо освещена тематика привязных высотных беспилотных платформ, в качестве высотного модуля которых используются мультироторные беспилотные летательные аппараты (привязные дроны). Привязные дроны (англ. *tethered UAV* или *tUAV*), интенсивное развитие которых началось последнее десятилетие, способны решать множество новых задач, как в гражданских, так и в оборонных отраслях [8–12]. Преимуществом таких сетей является быстрое и гибкое развертывание, повышение надежности беспроводной связи, контролируемая мобильность, снижение эксплуатационных затрат и т. д. Проектирование и реализация широкополосных беспроводных сетей на базе привязных дронов является перспективным направлением в рамках создания сетей нового поколения 5G/6G.

В настоящей работе приводится оценка производительности широкополосной беспроводной сети на базе привязного дрона с использованием оригинальной модели стохастического поллинга. В разделе 1 статьи дано описание преимуществ реализации беспроводной сети на базе привязного дрона. Приводится расчет увеличения зоны телекоммуникационного покрытия и параметров канала. Связь между базовой станцией, расположенной на дроне, и наземной станцией в пределах прямой видимости. В разделе 2 рассмотрена структура широкополосной беспроводной сети, представляющая собой радиосоту, в центре которой находится базовая станция со всенаправленной или секторной антенной, на которую сфокусированы антенны абонентских станций. Приводится краткое описание протокола циклического опроса АС (протокола поллинга) и его параметров, которые в дальнейшем используются для моделирования и численных расчетов характеристик производительности беспроводной сети. В разделе 3 в отличие от известных работ [13–15] рассматривается модель поллинга с групповым обслуживанием очередей пакетов абонентов, адекватно описывающая функционирование широкополосной беспроводной сети с централизованным механизмом управления. Сформулирована задача отыскания основных характеристик беспроводной сети на базе привязного дрона, включая среднее время пребывания, вероятность потери пакетов в системе и т. д. В разделе 4 дано описание нового подхода для отыскания характеристик производительности широкополосной беспроводной сети с централизованным механизмом управления, модель которой была представлена в предыдущем разделе. Указанный подход базируется на комбинации методов машинного обучения и имитационного моделирования и подтвердил свою эффективность при исследовании ряда сложных систем массового обслуживания [16–18].

1. Расчет зоны телекоммуникационного покрытия и характеристик канала связи беспроводной сети на базе привязной высотной беспилотной платформы. Привязные дроны нового поколения обеспечивают возможность подъема и длительного функционирования на высотах до 100–150 м полезной телекоммуникационной нагрузки значительного веса (до 10–15 кг). В качестве полезной нагрузки может использоваться: аппаратура связи дециметрового диапазона радиоволн для организации связи с наземными или воздушными абонентами на расстоянии 100 км и более; базовая станция сотовой связи для оперативного создания современной телекоммуникационной инфраструктуры

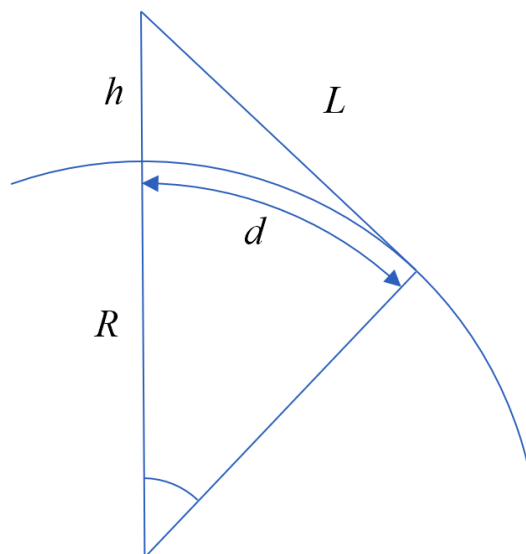


Рис. 1. Зона прямой видимости

на обширной территории или аппаратура сети, функционирующей под управлением протоколов IEEE 802.11 в режиме «точка — многоточка» в сантиметровом диапазоне радиоволн. Эффективная работа телекоммуникационной аппаратуры в указанных частотных диапазонах обеспечивается за счет увеличения зоны прямой видимости между антеннами приемной и передающей аппаратуры и сокращения уровня помех.

Максимальная дальность связи, зависящая от высоты подъема привязного дрона, практически совпадает с расстоянием до видимого горизонта (см. рис. 1).

Указанное расстояние определяется из следующих простых геометрических соотношений (1):

$$d = R \arctan \left(\sqrt{\left(1 + \frac{h}{R}\right)^2 - 1} \right); L = \sqrt{h^2 + 2Rh}, \quad (1)$$

где h — высота размещения БС, L — максимальная дальность связи, d — длина дуги по поверхности Земли между проекцией коптера на поверхность земли и линией, ограничивающей зону прямой видимости.

Полагая, что форма земли — идеальный шар радиуса $R \approx 6.37 \times 10^6$ м, получим следующие данные по размеру зоны прямой видимости (табл. 1, рис. 2).

Таким образом, использование высотных беспилотных привязных платформ, с высотой подъема 100–150 метров позволяет получить зону прямой видимости 35–43 км. Указанный расчет произведен для случая, когда антенны приемной аппаратуры находятся на уровне земли.

Для эффективного функционирования канала связи в пределах рассчитанной выше зоны прямой видимости (области телекоммуникационного покрытия) необходимо оценить величину мощности передатчика, величину потерь в линии связи, коэффициенты усиления приемной и передающей антенн. Мощность, получаемую на входе приемника, можно определить по формуле Фрииса [19]. Упрощенный вариант этой формулы имеет вид:

Таблица 1
Радиус зоны прямой видимости

h, m	l, m	d, m
1	3569	3569
10	11287	11287
50	25239	25239
100	35693	35693
150	43715	43715

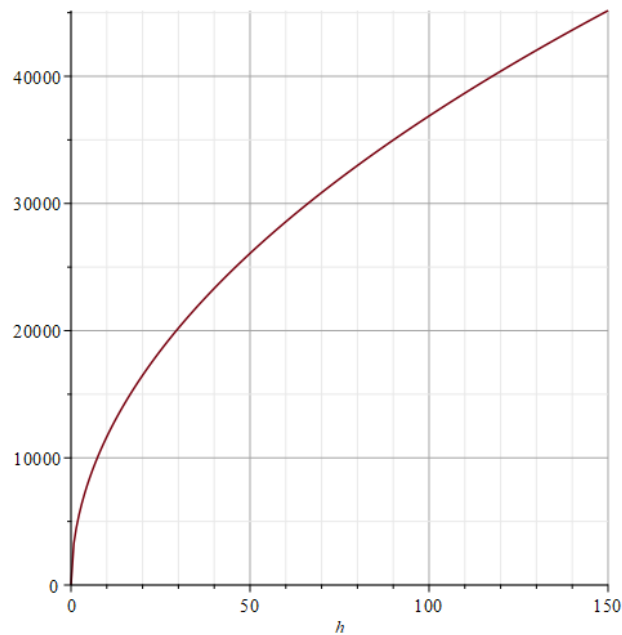


Рис. 2. Зависимость зоны прямой видимости от высоты подъема привязного дрона

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2, \quad (2)$$

где P_t — мощность передатчика, G_t и G_r — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, λ — длина волны и L — расстояние между приемной и передающей антеннами. В формуле (2) коэффициенты усиления антенн — безразмерные величины, а единицы измерения длины волны (λ) и расстояние (L) должны быть одинаковыми. Основной причиной «потерь» является снижение мощности сигнала за счет равномерного распространения радиоволн. Затухание сигнала пропорционально квадрату расстояния. Логарифмируя (2) формулу Фрииса, можно преобразовать [20] к виду:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - \Pi, \quad (3)$$

где P_r и P_t выражены в децибелах относительно милливатта, а коэффициенты усиления передающей и приемной антенн G_t и G_r — в децибелах по отношению к изотропному излучателю. Параметр Π (4) определяет затухание в беспроводной линии:

Таблица 2

Затухание сигнала

Частота, МГц	Затухание П, дБ		
	для 25 км	для 35 км	для 43 км
100	100,41	103,33	105,12
200	106,43	109,35	111,14
400	112,45	115,37	117,16
800	118,47	121,39	123,18
1000	120,41	123,33	125,12
2000	126,43	129,35	131,14
4000	132,45	135,37	137,16
6000	135,97	138,89	140,68
8000	138,47	141,39	143,18
10000	140,41	143,33	145,12

$$\Pi = 20 \times \log_{10}\left(4\pi \frac{L}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где λ — длина волны и L — расстояние между приемной и передающей антеннами, выраженные в одинаковых единицах.

В табл. 2 приведены значения затухания Π в зависимости от расстояния между приемником и передатчиком для различных частотных диапазонов.

Для устойчивой радиосвязи и, как следствие, качественной передачи данных требуется, чтобы уровень сигнала, поступающий на вход приемника, превышал уровень шумов. Будем полагать, что уровень шумов для диапазонов 2–6 ГГц не превышает минус 90 дБм и оптимальное превышение уровня сигнала над уровнем шума составляет 10 дБ. Таким образом, минимальный уровень мощности сигнала на входе приемника $P_r = -80$ дБм.

Приведем пример расчета мощности передатчика для организации канала связи между базовой станцией, расположенной на привязном дроне, и наземной абонентской станцией. Будем полагать, что беспроводная связь реализуется на частоте 6000 МГц, антенна передатчика с круговой диаграммой направленности имеет коэффициент усиления $G_t = 6$ дБи, а направленная антенна наземного оборудования имеет коэффициент усиления G_r в пределах 15–25 дБи. Тогда из табл. 2 и формулы (3) получаем, что для уверенного приема сигнала ($P_r = -80$ дБм) на расстоянии 35 км, затухании $\Pi = 138,89$ дБ требуемая мощность передатчика P_t составляет: 27,9–37,9 дБм.

2. Архитектура широкополосной беспроводной сети на базе привязного дрона. Структура широкополосной беспроводной сети на базе привязного дрона представляет собой радиосоту, в центре которой находится базовая станция (БС) со всенаправленной или секторной антенной, на которую сфокусированы антенны абонентских станций (АС). В условиях такой сети абонентские станции зачастую не имеют взаимной радиовидимости и являются скрытыми друг от друга, а взаимодействие между ними осуществляется только через базовую станцию. Топологически структура такой сети является звездообразной. Для эффективного управления доступом к беспроводному каналу передачи данных разработаны международные стандарты IEEE 802.11 [21] и их дополнения.

Далее рассматривается широкополосная беспроводная сеть с централизованным механизмом управления. БС осуществляет циклический опрос абонентских станций в соот-

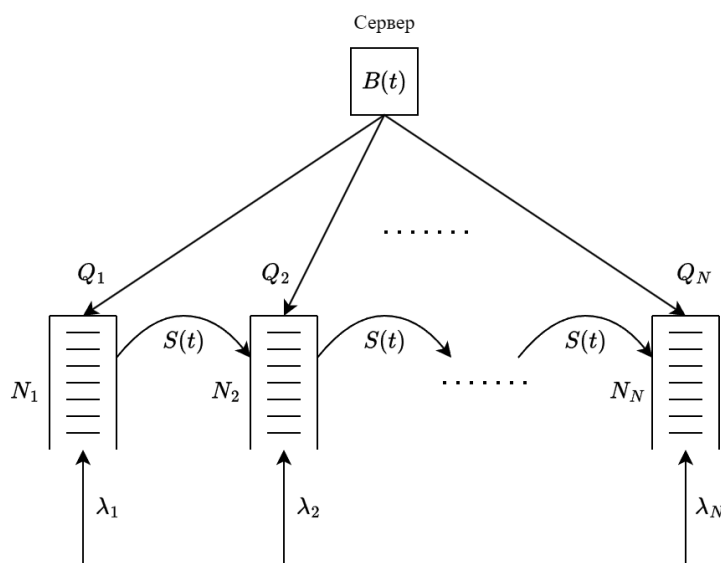


Рис. 3. Модель поллинга

ветствии с таблицей опроса, что позволяет эффективнее использовать пропускную способность сети, обеспечивать приоритетную передачу данных и минимизировать интерференцию. Время одного цикла делится на два интервала. В течение первого интервала (T_1) осуществляется передача от БС к абонентам (нисходящий поток), а в течение второго (T_2) — передачу данных ведут абонентские станции (восходящий поток). Длительность цикла и, соответственно, соотношение интервалов передачи нисходящего/восходящего потоков устанавливается на этапе конфигурирования, т. е. до начала эксплуатации сети.

Каждый временной интервал (T_1, T_2) делится на временные отрезки (слоты) фиксированной длительности. Каждый слот содержит служебный интервал (T_3), в котором передается таблица опроса, определяющая последовательность передачи данных абонентским станциям. Последовательность передачи данных от АС к БС определяется этой же таблицей опроса. Количество слотов, выделяемых для каждой АС, может зависеть от их приоритета. Переход от одного цикла к другому осуществляется через защитный интервал (T_4), предназначенный для завершения обслуживания наиболее удаленного абонента (вычисляется из соотношения 3,5 мкс на километр).

Для численной оценки характеристик производительности беспроводной сети на базе привязного дрона (осуществляемая в следующем разделе) будем полагать:

- длительность цикла составляет 5000 мкс;
- длительность слота — выбрана 250 мкс;
- длительность служебного и защитного интервалов составляет 30 мкс и 17,5 мкс.

3. Математическая модель стохастического группового поллинга для оценки производительности беспроводной сети на базе привязного дрона. В качестве математической модели, адекватно описывающей функционирование широкополосных беспроводных сетей с централизованным механизмом управления, рассматривается модель стохастического поллинга с одним сервером и N ($N \geq 2$) очередями от Q_1 до Q_N (см. рис. 3).

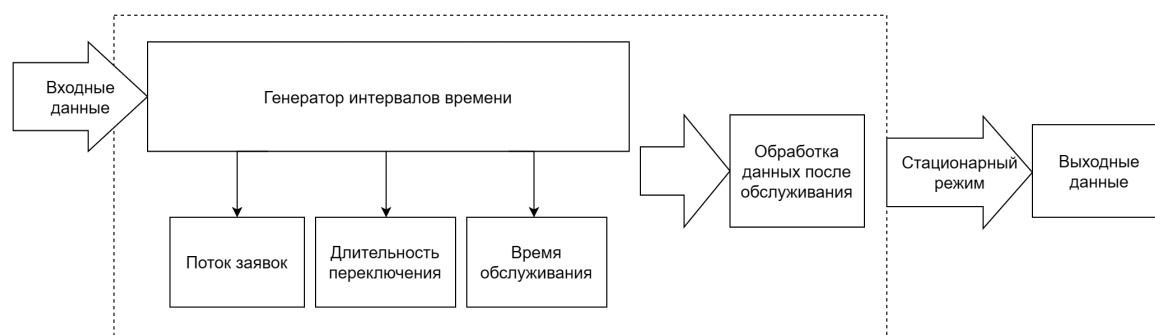


Рис. 4. Структура имитационной модели

Предполагается, что на вход каждой очереди поступает пуассоновский поток пакетов. Размер буфера каждой очереди ограничен величиной N_i . В отличие от известных публикаций [13–15], рассматривается групповое обслуживание пакетов в беспроводной сети. Предполагается также, что обслуживание групп пакетов распределено по произвольному закону $B(t)$, одинаковому для всех очередей. Сервер осуществляет последовательное обслуживание очередей, начиная с первой до последней, и затем возвращается к первой очереди. Переход обслуживания от одной очереди к другой осуществляется за случайное время с заданной функцией распределения $S(t)$.

Задача состоит в поиске основных характеристик производительности беспроводной сети, включая среднее время пребывания, вероятность потери пакетов в системе и т. д.

4. Оценка производительности протокола беспроводной широкополосной сети на базе привязной высотной беспилотной платформы с использованием модели группового поллинга. Для сложных моделей, подобных представленной в этой статье, получение аналитических результатов с использованием традиционных математических методов теории очередей затруднительно. Поэтому в данном разделе для оценки производительности сети и проведения численных расчетов разработан новый подход, базирующийся на комбинации методов машинного обучения и имитационного моделирования. В рамках указанного подхода разработана имитационная модель для оценки характеристик систем группового поллинга, которая затем обучается с использованием различных алгоритмов машинного обучения (например, метод дерева решений и градиентного бустинга).

4.1. *Оценка производительности систем группового поллинга методом имитационного моделирования.* Метод имитационного моделирования Монте-Карло является универсальным средством для исследования характеристик сложных систем. Имитационная модель для исследования основных характеристик систем группового поллинга была реализована на языке C++ с использованием платформы OMNeT++, которая представляет собой модульную компонентную библиотеку и среду моделирования компьютерных сетей. Структура имитационной модели показана на рис. 4.

Входные параметры системы передаются в генератор временных интервалов для создания потока поступления пакетов, потока переключения сервера между очередями и потока обслуживания пакетов в очередях. Когда система достигает стационарного состояния, модель передает результаты на пользовательский интерфейс в виде таблицы.

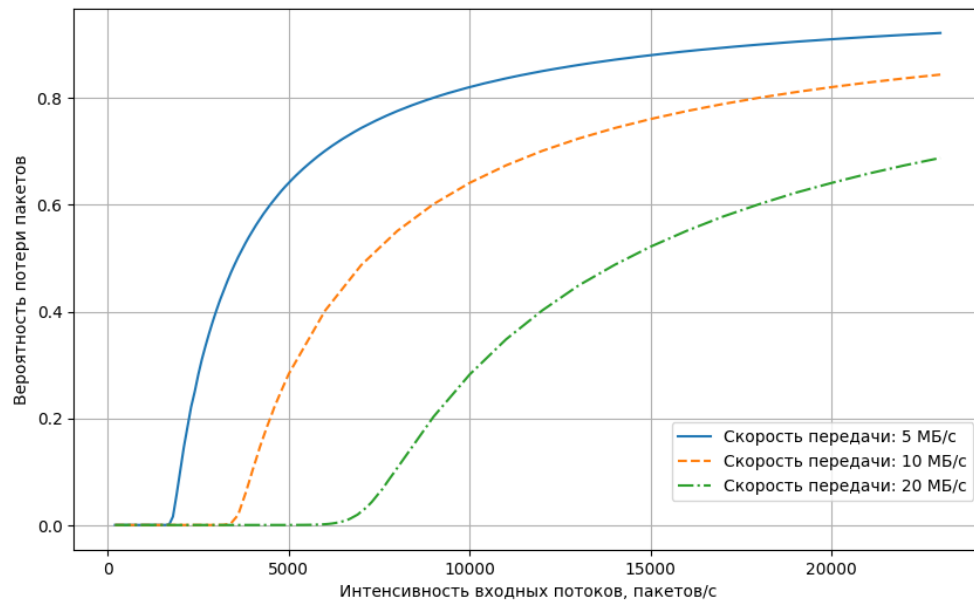


Рис. 5. График зависимости вероятности потери пакетов от интенсивности входных потоков при числе очередей — 10

В качестве примера рассмотрим симметричную систему поллинга, состоящую из 10 очередей. Размер буфера каждой очереди составляет 10 КБ, а размер каждого пакета — 256 байт. Длительность цикла составляет 5000 мкс. Каждый слот имеет фиксированный размер 250 мкс. $T_3 = 30$ мкс и $T_4 = 17.5$ мкс. Каждой очереди будет выделено 2 слота. На рис. 5 и рис. 6 представлена зависимость вероятности потери пакетов и их среднего времени пребывания в системе от интенсивности входного потока в каждую очередь при скоростях передачи данных 5 МБ/с, 10 МБ/с и 20 МБ/с.

На рис. 5 и рис. 6 видно, что при увеличении скорости передачи данных количество обслуживаемых пакетов за одно посещение очереди сервером увеличивается, что снижает вероятность потери пакетов и их среднее время пребывания. Поскольку система симметрична, вероятность потери и среднее время пребывания пакетов в разных очередях одинаковы.

Рассмотрим далее пример асимметричной системы поллинга, состоящей из 15 очередей. Остальные параметры системы остаются прежними. Поскольку количество слотов не изменяется, первым 5 очередям будет выделено 2 слота, а остальным — только 1 слот. На рис. 7 и рис. 8 также представлена зависимость вероятности потери и среднего времени пребывания пакетов в системе от интенсивности входного потока в каждую очередь при трех различных скоростях передачи данных. Все эти графики имеют аналогичный вид, что и в случае симметричных систем.

Однако, поскольку очереди в данном примере распределены по разному количеству слотов, вероятность потери и среднее время пребывания пакетов в разных очередях различны. Пример представлен на рис. 9 для случая скорости передачи данных 5 МБ/с. Поскольку первым 5 очередям выделено 2 слота, у сервера будет больше времени для обслуживания пакетов в этих очередях, что снизит вероятность потери и среднее время пребывания пакетов в этих очередях по сравнению с остальными.

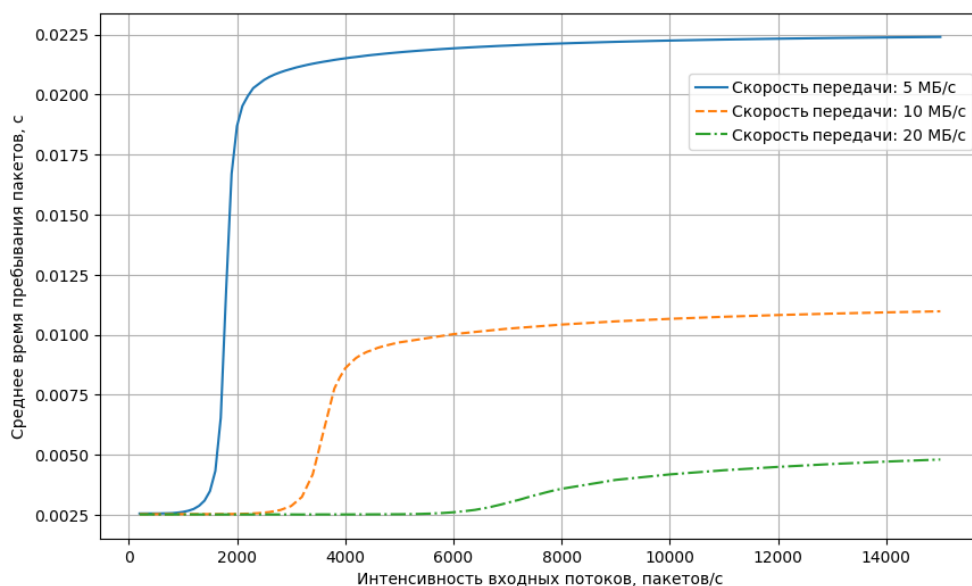


Рис. 6. График зависимости среднего времени пребывания пакетов от интенсивности входных потоков при числе очередей — 10

Время каждого моделирования может длиться от нескольких секунд до нескольких часов, в зависимости от значений входных параметров.

4.2. *Применение методов машинного обучения для оценки производительности беспроводной сети на базе привязного дрона.* При проектировании широкополосных беспроводных сетей, в частности сети на базе привязной высотной беспилотной платформы, исходные данные обычно являются неизвестными. Для проверки многих вариантов исходных данных нужны многократные расчеты характеристик производительности. Поэтому использование имитационного моделирования для многократных расчетов приводит к значительным временным затратам. Этот недостаток имитационного моделирования преодолевается путем использования машинного обучения, где расчет результатов практически мгновенен, от миллисекунд до нескольких секунд, и стабилен, независимо от значения входных параметров. В данной работе для предсказания среднего времени пребывания пакетов использованы модель дерева решений и модель градиентного бустинга.

Для обучения и тестирования моделей собирается набор данных (dataset), который состоит из 20000 точек, сгенерированных моделью имитационного моделирования. Эти наборы разделяются на три части: обучающий набор, проверочный набор и тестовый набор, с соотношениями 70 %, 20 % и 10 % соответственно. Набор данных имеет 9 значений входных параметров и 1 выходной параметр, который представляет собой среднее время пребывания пакетов в системе.

Диапазон значений входных параметров показан в табл. 3.

Одной из наиболее широко используемых моделей для решения задач как классификации, так и регрессии, является модель дерева решений. Она работает путем разбиения обучающих данных на подмножества и последующего построения дерева, где каждый узел представляет собой условие по одному из признаков, а каждое ребро (ветвь) соответствует результату этого условия. В данной работе модель построена на языке Python с использо-

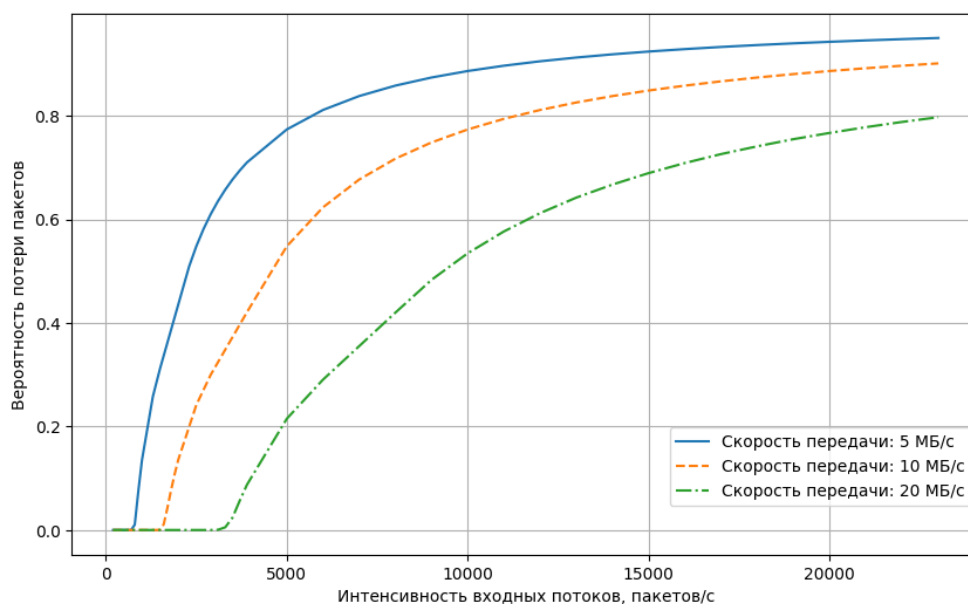


Рис. 7. График зависимости вероятности потери пакетов от интенсивности входных потоков при числе очередей — 15

Таблица 3

Диапазон значений входных параметров

Входные параметры	Диапазон
Число очередей	1 — 20
Интенсивность входных потоков	500 — 20000 пакетов/с
Скорость передачи данных	0,5 — 20 МБ/с
Размеры пакетов	64 — 1024 Байт
Размер буфера	10240 Байт
Длительность цикла	5000 мкс
Длительность слота	250 мкс
Длительность служебного интервала	30 мкс
Длительность защитного интервала	17,5 мкс

ванием библиотеки `scikit-learn`. В процессе обучения оптимальное значение максимальной глубины дерева равно 11.

Градиентный бустинг — мощный метод машинного обучения для решения задач как классификации, так и регрессии. Основная идея этого метода заключается в последовательном добавлении новых деревьев к ансамблю, каждое из которых настраивается на остатки предыдущего дерева с целью минимизации функции потерь. В отличие от отдельного дерева решений, градиентный бустинг часто обладает более высокой точностью и устойчивостью к переобучению благодаря композиционному подходу и встроенной регуляризации. Аналогично модели дерева решений, модель градиентного бустинга также построена на Python с использованием библиотеки `scikit-learn`. Оптимальное значение максимальной глубины дерева — 10.

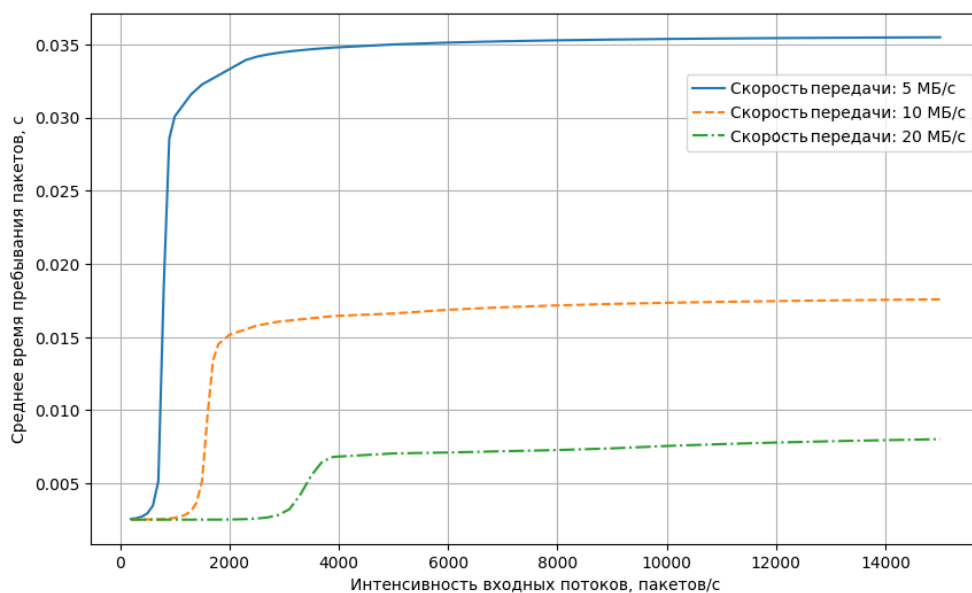


Рис. 8. График зависимости среднего времени пребывания пакетов от интенсивности входных потоков при числе очередей — 15

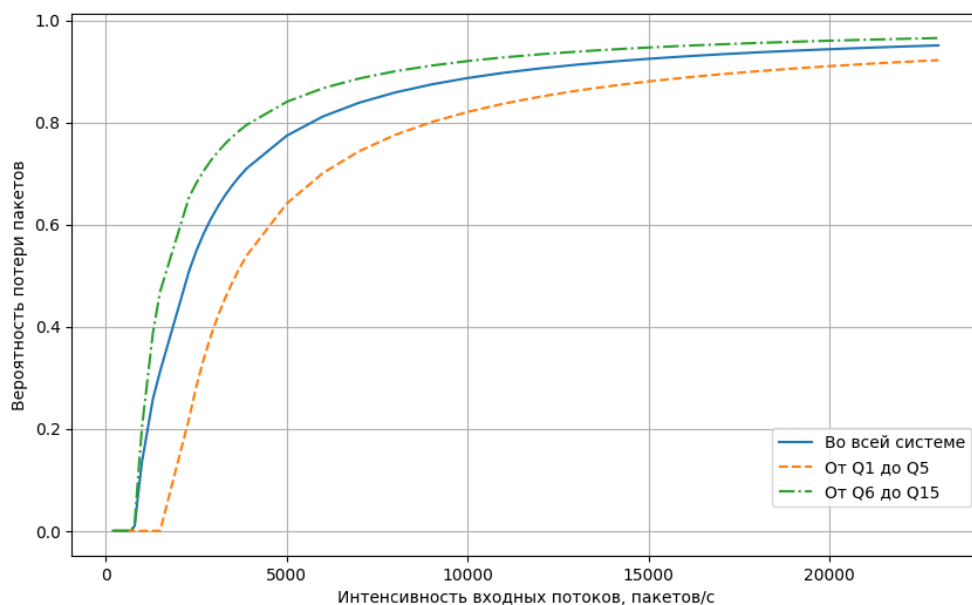


Рис. 9. График зависимости вероятности потери пакетов в разных очередях от интенсивности входных потоков при числе очередей — 15

Для оптимизации времени обучения, предотвращения переобучения и повышения обобщающей способности применена стратегия ранней остановки с параметром $\text{patience}=10$. Основная идея заключается в том, чтобы прекратить процесс обучения модели, когда производительность на проверочном наборе данных перестает улучшаться. Время обучения составляет 2,3 секунд для модели дерева решений и 15,7 секунды для модели градиентного бустинга.

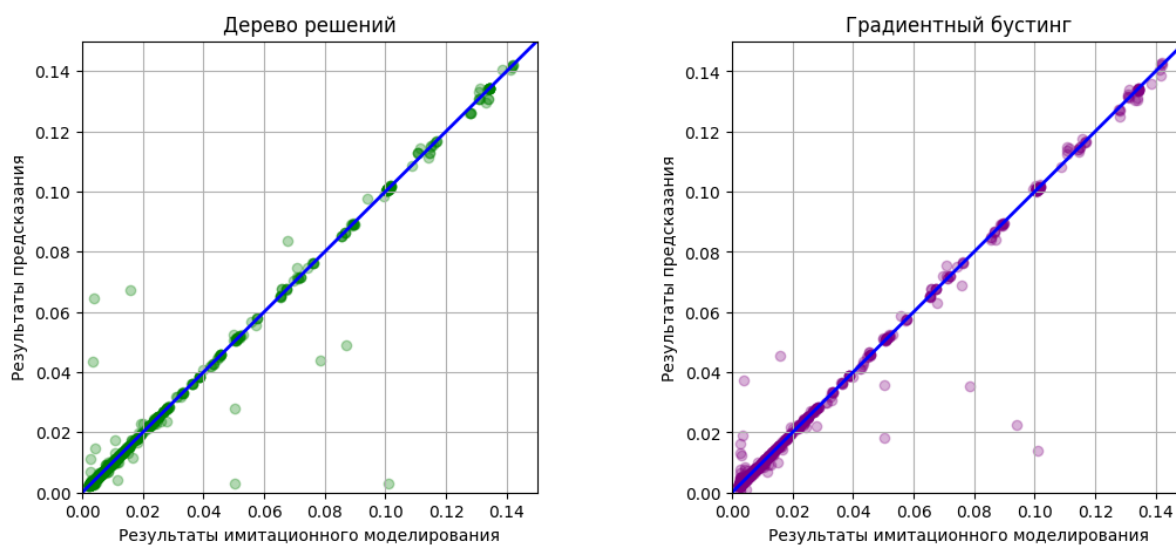


Рис. 10. Результат предсказания на тестовом наборе данных

Таблица 4

Показатели точности моделей на тестовом наборе данных

Показатели	Дерево решений	Градиентный бустинг
MSE	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-5}$
MAE	0,0012	0,0007
RMSE	0,0056	0,0052
R^2	0,9935	0,9944

Таблица 5

Время расчета результатов в секундах

Методы	Время, с
Имитационное моделирование	82
Дерево решений	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Градиентный бустинг	$2,9 \cdot 10^{-4}$

После обучения модели используются для прогнозирования результатов на тестовом наборе, результаты которого показаны на рис. 10.

Синяя линия функции $y = x$ указывает на то, что предсказанный результат совпадает с результатом моделирования. Чем больше расстояние от точки до этой линии, тем больше ошибка прогнозирования.

Показатели точности данной модели на тестовом наборе представлены в табл. 4.

Замечено, что результаты прогнозирования на тестовом наборе данных с помощью модели градиентного бустинга немного лучше, чем с помощью модели дерева решений.

Далее используем эти две модели для прогнозирования среднего времени пребывания пакетов на новом наборе данных. Время, необходимое для каждого моделирования и прогнозирования с одним и тем же набором входных параметров, представлено в табл. 5.

Результаты прогнозирования представлены на рис. 11.

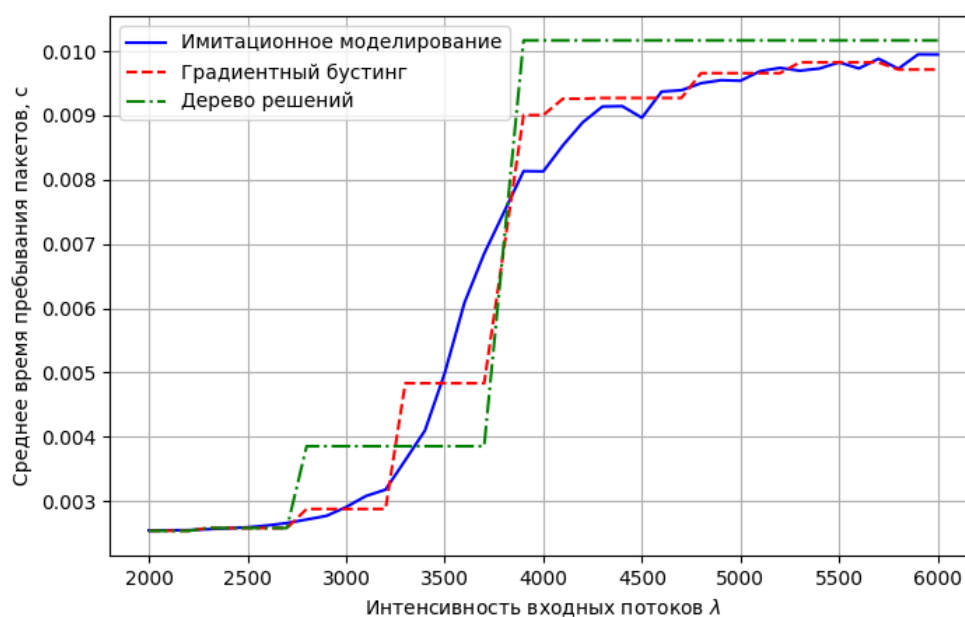


Рис. 11. Сравнение результатов

Видно, несмотря на более длительное время обучения и предсказания, модель градиентного бустинга дает более точные прогнозы по сравнению с моделью дерева решений. Обе модели показывают относительно хорошие результаты прогнозирования по сравнению с результатами, полученными от имитационного моделирования, при этом значительно сокращая время на вычисления.

Заключение. В настоящей работе приводится оценка производительности широкополосной беспроводной сети на базе привязного дрона с использованием оригинальной модели стохастического поллинга. В отличие от известных работ [13–15], рассматривается модель поллинга с групповым обслуживанием очередей пакетов абонентов беспроводной сети. Дано описание протокола взаимодействия базовой станции и абонентских устройств широкополосной беспроводной сети на базе привязного дрона, позволяющее получить исходные данные для проведения численных расчетов. Для оценки производительности сети и проведения численных расчетов разработан новый подход, базирующийся на комбинации методов машинного обучения и имитационного моделирования. Приводится также инженерный расчет максимального радиопокрытия, необходимой мощности, коэффициентов усиления антенн приемно-передающих устройств беспроводной сети на базе привязного дрона.

Список литературы

1. Arif M., Kim W. Analysis of Fluctuating Antenna Beamwidth in UAV-Assisted Cellular Networks // *Mathematics*. 2023. Т. 11, № 22. С. 4706.
2. Vladimirov S. [и др.]. The Model of WBAN Data Acquisition Network Based on UFP // *Lecture Notes in Computer Science. Distributed Computer and Communication Networks*. Springer International Publishing, 2020. С. 220–231.
3. Wang Y. [и др.]. A Channel Rendezvous Algorithm for Multi-Unmanned Aerial Vehicle Networks Based on Average Consensus // *Sensors*. 2023. Т. 23, № 19. С. 8076.

4. Zhao W., Zhang J., Li D. Clustering and Beamwidth Optimization for UAV-Assisted Wireless Communication // *Sensors*. 2023. Т. 23, № 23.
5. Zhu C. [и др.]. A Fairness-Enhanced Federated Learning Scheduling Mechanism for UAV-Assisted Emergency Communication // *Sensors*. 2024. Т. 24, № 5. С. 1599.
6. Belmekki B. E. Y., Alouini M.-S. Unleashing the Potential of Networked Tethered Flying Platforms: Prospects, Challenges, and Applications // *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2022. Т. 3. С. 278–320.
7. Marques M. N. [и др.]. Tethered Unmanned Aerial Vehicles — A Systematic Review // *Robotics*. 2023. Т. 12, № 4. С. 117.
8. Bushnaq O. M. [и др.]. Optimal Deployment of Tethered Drones for Maximum Cellular Coverage in User Clusters // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. Т. 20, № 3. С. 2092–2108.
9. Dinh T. D. [и др.]. Structures and Deployments of a Flying Network Using Tethered Multicopters for Emergencies // *Lecture Notes in Computer Science. Distributed Computer and Communication Networks*. Т. 12563. Springer International Publishing, 2020. С. 28–38.
10. Kishk M., Bader A., Alouini M.-S. Aerial Base Station Deployment in 6G Cellular Networks Using Tethered Drones: The Mobility and Endurance Tradeoff // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2020. Т. 15, № 4. С. 103–111.
11. Safwat N. E.-D., Hafez I. M., Newagy F. 3D placement of a new tethered UAV to UAV relay system for coverage maximization // *Electronics*. 2022. Т. 11, № 3. С. 385.
12. Vishnevsky V. [и др.]. Reliability Assessment of Tethered High-altitude Unmanned Telecommunication Platforms: k-out-of-n Reliability Models and Applications. Springer Nature, 01/2024. С. 167.
13. Borst S., Boxma O. Polling: past, present, and perspective // *Top*. 2018. Т. 26. С. 335–369.
14. Vishnevsky V., Semenova O. Polling Systems and Their Application to Telecommunication Networks // *Mathematics*. 2021. Т. 9, № 2.
15. Vishnevsky V. [и др.]. Analysis of a MAP/M/1/N Queue with Periodic and Non-Periodic Piecewise Constant Input Rate // *Mathematics*. 2022. Т. 10, № 10.
16. Vishnevsky V. M. [и др.]. Investigation of the Fork-Join System with Markovian Arrival Process Arrivals and Phase-Type Service Time Distribution Using Machine Learning Methods // *Mathematics*. 2024. Т. 12, № 5.
17. Efrosinin D., Vishnevsky V., Stepanova N. Optimal Scheduling in General Multi-Queue System by Combining Simulation and Neural Network Techniques // *Sensors*. 2023. Т. 23, № 12.
18. Vishnevsky V. [и др.]. Performance Evaluation of the Priority Multi-Server System MMAP/PH/M/N Using Machine Learning Methods // *Mathematics*. 2021. Т. 9, № 24.
19. Friis H. T. A Note on a Simple Transmission Formula // *Proceedings of the IRE*. 1946. Т. 34, № 5. С. 254–256.
20. Johnson R. *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, 1984. С. 1408.
21. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications / ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition*. 1999 Edition



Вишневский Владимир

Миронович в 1971 г. окончил Московский институт электроники и математики. В 1974 г. получил ученую степень кандидата технических наук, а в 1988 г. — доктора технических наук в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). С 1989 г. —

профессор ИПУ РАН и Московского физико-технического института. С 1990 по 2010 гг. — заведующий лабораторией, заместитель директора Института проблем передачи информации РАН (ИППИ РАН). С 2010 г. по настоящее время — заведующий лабораторией «Управление сетевыми системами» ИПУ РАН. Является членом IEEE Communication Society, International Telecommunications Academy и

профессор ИПУ РАН и Московского физико-технического института. С 1990 по 2010 гг. — заведующий лабораторией, заместитель директора Института проблем передачи информации РАН (ИППИ РАН). С 2010 г. по настоящее время — заведующий лабораторией «Управление сетевыми системами» ИПУ РАН. Является членом IEEE Communication Society, International Telecommunications Academy и

New York Academy of Science. Член редколлегий журналов «Автоматика и телемеханика», «Проблемы управления», «Электроника», «Проблемы информатики», главный редактор сборников LNCS и CCIS «Distributed Computer and Communication Networks» издательства Springer. В 2019 г. В. М. Вишнеvскому присвоено звание «Залуженный деятель науки Российской Федерации».

Автор более 350 публикаций, включая 10 монографий. Член программных комитетов международных конференций IEEE ICUMT, RTUWO, председатель программного комитета конференции IEEE DCCN. Область научных интересов: компьютерные сети, стохастические системы, дискретная математика (теория экстремальных графов, математическое программирование) и широкополосные беспроводные сети.

Vladimir M. Vishnevsky received the Engineering degree in applied mathematics from the Moscow Institute of Electronics and Mathematics (Russia) in 1971, the Ph. D. degree in queuing theory and telecommunication networks and the D. Sc. degree in telecommunication networks from the V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (ICS RAS), in 1974 and 1988, respectively. He became a Full Professor with ICS RAS in 1989 and the Moscow Institute of Physics and Technology in 1990. He was the Head of Laboratory and the Deputy Director of the Institute of Information Transmission Problems of RAS from 1990 to 2010. Since 2010 through the present, he is the Head of Network systems control Laboratory, ICS RAS. He is a member of IEEE Communication Society, International Telecommunications Academy and New York Academy of Science, a member of the editorial boards of journals “Automation and Remote Control”, “Control Problems”, “Electronics”, “Problems of Informatics”, editor-in-chief of the LNCS and CCIS series “Distributed Computer and Communication Networks” published by Springer. In 2019, V. M. Vishnevsky was awarded the title of Honored Scientist of the Russian Federation.

He is an author of more than 300 papers and 10 books. He is a Co-Chair of IEEE Conferences (ICUMT, RTUWO) and the General Chair of

IEEE DCCN Conference. His research interests lie in the area of computer networks, stochastic systems, discrete mathematics (extremal graph theory, mathematical programming) and broadband wireless telecommunication networks.



Авраменко Юрий Алексеевич в 1995 г. окончил Харьковский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника». С 1995 г. по 2011 г. — младший научный сотрудник отдела Акустических свойств твердых тел Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины (ФТИНТ НАНУ). С 2023 г. по настоящее время — ведущий инженер Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Соавтор более 10 публикаций. Область научных интересов: сети передачи данных, широкополосные беспроводные сети, машинное обучение, Интернет вещей.

Yuriy A. Avramenko received the degree in Radiophysics and Electronics from the V. N. Karazin Kharkov State University (Ukraine) in 1995. From 1995 to 2011 he was a Junior scientific researcher of the Acoustic properties of solids department in B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine. From 2023 to nowadays he is a Leading engineer of the Network systems control Laboratory in the V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (ICS RAS). He is an co-author of more than 10 papers. His research interests are: telecommunication networks, broadband wireless telecommunication networks, machine learning, IoT.



Нгуен Ван Хиеу в 2020 году окончил Московский физико-технический институт (МФТИ) по специальности «Прикладные математика и физика». С 2020 г. по настоящее время обучается в аспирантуре МФТИ по специальности «Математическое

моделирование, численные методы и комплексы программ». Область научных интересов: теория массового обслуживания, прикладные стохастические модели, имитационное моделирование, машинное обучение, широкополосные беспроводные сети.

Nguyen Van Hieu graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) in 2020 with a degree in “Applied Mathematics and Physics”. Since 2020, he has been pursuing a PhD at MIPT in the field of “Mathematical Modeling, Numerical Methods, and Software Complexes”. His research interests include queueing theory, applied stochastic models, simulation modeling, machine learning, and broadband wireless networks.



Калмыков Никита Сергеевич в 2014 году закончил Инженерно-экономический институт МАИ (ИНЖЭКИН МАИ) по специальности инженер-экономист (специа-

лист) (организация и планирование внешне-экономической деятельности). С 2014 года по настоящее время — научный сотрудник института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Автор 4 патентов и 9 публикаций. Сфера научных интересов: разработка новых типов беспилотных летательных аппаратов, разработка методов и алгоритмов локальной навигации беспилотных летательных аппаратов.

Nikita S. Kalmykov graduated from the MAI Institute of Engineering and Economics in 2014, majoring in Economics engineer (specialist) (organization and planning of foreign economic activity). From 2014 to the present — researcher in the V. A. Trapeznikov Institute of control Sciences of Russian Academy of Sciences (ICS RAS). Author of 4 patents and 9 publications. Research interests: development of new types of unmanned aerial vehicles, development of methods and algorithms for local navigation of unmanned aerial vehicles.

Дата поступления — 08.08.2024