

УДК 621.39

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-2-32-42>

EDN: ZUDPTT

Выбор стратегии передачи в гетерогенной сети Интернета вещей с применением нечеткого многокритериального анализа

✉ Хоанг Ф. Н., ✉ Парамонов А. И.

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

Постановка задачи. Статья посвящена решению задачи выбора оптимальной стратегии передачи данных в гетерогенных сетях Интернета вещей. Для оценки и выбора стратегий с учетом таких противоречивых факторов, как энергопотребление, задержки и потери пакетов, предложен подход на основе нечеткого многокритериального анализа, позволяющий находить эффективные компромиссные решения в условиях неопределенности и нечеткости исходных данных, характерных для сетей Интернета вещей. **Метод исследования:** нечеткий многокритериальный анализ, обеспечивающий учет и обработку множества критериев и нечетких данных. **Результаты:** доказана эффективность предложенного подхода для определения стратегий передачи, обеспечивающих оптимальный баланс между энергопотреблением, задержками и потерями пакетов, что способствует повышению общей производительности сети. **Практическая значимость:** разработанный подход может применяться для оптимизации передачи данных в реальных сетях Интернета вещей, в том числе для снижения энергопотребления и задержек при сохранении высокой вероятности доставки, что актуально для приложений умного города и промышленной автоматизации.

Ключевые слова: Интернет вещей, гетерогенные сети, стратегия передачи, нечеткий анализ, многокритериальная оптимизация

Актуальность

Современный этап развития телекоммуникационных технологий характеризуется стремительным ростом экосистемы Интернета вещей (ИВ), объединяющей миллиарды взаимодействующих устройств в различных сферах применения [1]. Увеличение масштаба и функциональное разнообразие подключенных устройств приводят к усложнению сетевой инфраструктуры, особенно в условиях гетерогенности, когда устройства различаются по технологиям связи, протоколам, вычислительным и энергетическим ресурсам. Это формирует запрос на разработку новых подходов к управлению передачей данных, способных обеспечить требуемую эффективность и устойчивость функционирования сети [2–5].

Библиографическая ссылка на статью:

Хоанг Ф. Н., Парамонов А. И. Выбор стратегии передачи в гетерогенной сети Интернета вещей с применением нечеткого многокритериального анализа // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 2. С. 32–42. DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-2-32-42. EDN: ZUDPTT

Reference for citation:

Hoang Ph. N., Paramonov A. Transmission Strategy Selection in a Heterogeneous Internet of Things Network Using Fuzzy Multi-Criteria Analysis // Telecom IT. 2025. Vol. 13. Iss. 2. PP. 32–42 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-2-32-42. EDN: ZUDPTT

Одной из ключевых задач управления в гетерогенных сетях ИВ является выбор оптимальной стратегии передачи данных. Такая стратегия должна учитывать множество зачастую противоречивых факторов, включая энергопотребление конечных устройств, время задержки доставки информации и потери пакетов [6–8]. Традиционные подходы к оптимизации, основанные на строгих математических моделях, не всегда эффективны в реальных условиях эксплуатации сетей ИВ из-за присущей им неопределенности, вызванной динамическими изменениями состояния каналов связи, ограниченностью ресурсов устройств и неполнотой данных о параметрах сети. Следовательно, возникает потребность в разработке методов принятия решений, способных адекватно обрабатывать неполную, неточную информацию или данные, имеющие описательный характер, и находить компромисс между конфликтующими критериями оптимизации.

В этом контексте перспективным инструментом для решения поставленной задачи представляется применение методов, основанных на теории нечетких множеств и многокритериальном анализе. Аппарат нечеткой логики позволяет формализовать качественные оценки и экспертные знания, а методы многокритериального анализа обеспечивают основу для принятия обоснованных решений при наличии нескольких критериев [9]. Такой подход особенно актуален для сетей ИВ, где точные количественные значения параметров могут быть недоступны или их получение сопряжено со значительными затратами, а решения по выбору стратегии передачи часто требуется принимать оперативно с учетом приоритетов конкретного приложения.

Предлагаемый подход направлен на оценку эффективности альтернативных стратегий передачи по трем ключевым показателям – энергопотреблению, времени задержки и вероятности потерь пакетов – и выбор наиболее сбалансированного варианта. Ожидается, что применение разработанной методики позволит повысить общую производительность сети и обеспечить ее эффективную эксплуатацию в реальных условиях.

Цель данной работы – повышение эффективности функционирования гетерогенной сети ИВ высокой плотности; задача – разработка и исследование методики выбора стратегии передачи данных в гетерогенной сети ИВ на основе нечеткого многокритериального анализа.

Модель сети и постановка задачи

В данной работе рассматривается модель гетерогенной сети ИВ, обеспечивающей передачу данных между узлом-источником и узлом-приемником. Предполагается, что связь между узлами может осуществляться одновременно по множеству параллельных независимых подканалов, которые могут различаться по своей физической природе (например, радиоканалы различных диапазонов, оптические, акустические и т. д.). Каждый подканал характеризуется набором ключевых показателей производительности: средним энергопотреблением на передачу единицы данных, средней задержкой доставки и вероятностью потери пакетов на подканале. Совокупность подканалов, используемых для передачи

в конкретный момент времени, определяет стратегию передачи. На рисунке 1 приведена модель гетерогенной сети.

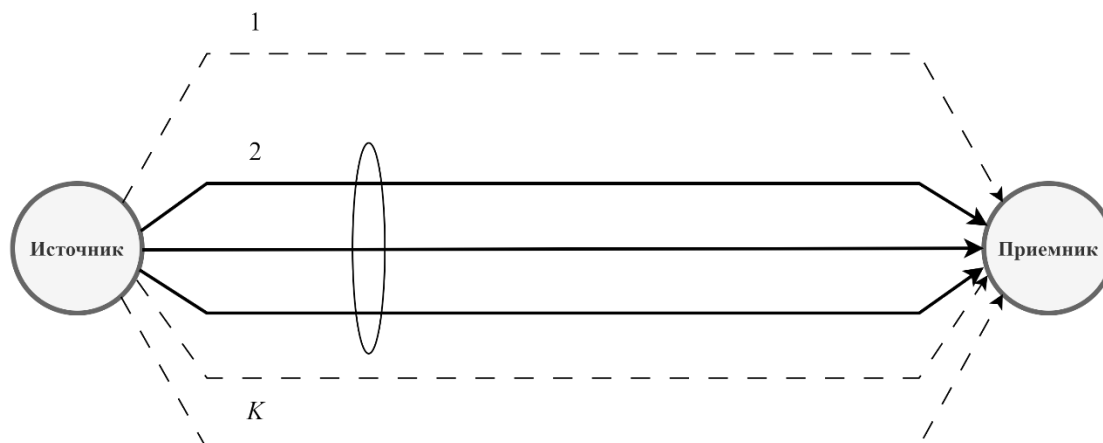


Рис 1. Модель гетерогенной сети

Для формализации задачи выбора оптимальной стратегии передачи введем пространство допустимых стратегий $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$. Каждая стратегия $P_i \in P$ представляет собой некоторое подмножество доступных подканалов, т. е. $P_i \subseteq \{1, 2, \dots, K\}$, которое может быть использовано для передачи данных. Отметим, что общее число возможных непустых стратегий равно $2^K - 1$. Поскольку полный перебор всех комбинаций при большом значении K является вычислительно сложной задачей, в данной работе предполагается, что рассматривается ограниченный пул из m предварительно отобранных наиболее перспективных стратегий.

Задача оптимизации формулируется как многокритериальная, поскольку необходимо одновременно минимизировать энергопотребление, задержку доставки, и потери пакетов при передаче. Для этого вводится множество целевых функций:

$$O = \{O_e, O_t, O_r\},$$

где O_e – суммарное энергопотребление, связанное с выбранной стратегией; O_t – время доставки, определяемое максимальной задержкой среди всех подканалов, задействованных в стратегии; O_r – общая вероятность потерь пакетов для стратегии, рассчитываемая на основе вероятностей потерь на каждом из подканалов.

Для учета относительной значимости каждого из критериев при сравнении альтернативных стратегий вводится нормированный вектор весовых коэффициентов $W = (\omega_e, \omega_t, \omega_r)$, компоненты которого отражают приоритеты, задаваемые лицом, принимающим решение, или требованиями приложения. Весовые коэффициенты удовлетворяют условию нормировки $\omega_e + \omega_t + \omega_r = 1$ ($\omega_e, \omega_t, \omega_r \geq 0$). Использование вектора W позволяет гибко управлять компромиссом между энергопотреблением, задержкой и потерями пакетов. Таким образом, описанная модель сети и формализованная постановка задачи создают необходимую основу

для разработки и применения методов многокритериального анализа с целью выбора оптимальной стратегии передачи данных.

Нечеткий многокритериальный анализ (Fuzzy Multi-Criteria Analysis) – это подход к принятию решений, который объединяет теорию нечетких множеств с методами многокритериального анализа. Он предназначен для оценки и выбора наилучшей альтернативы из доступного множества в условиях, когда цели, критерии оценки или исходные данные являются неполными, неточными или заданы в описательной форме.

Перейдем к количественной оценке эффективности каждой стратегии $P_i \in P$. Для этого определим формализованную процедуру вычисления агрегированных (интегральных) характеристик стратегии на основе параметров составляющих ее подканалов. В соответствии с поставленными целями оптимизации для каждой стратегии P_i рассчитываются три ключевых показателя: суммарное энергопотребление, максимальная задержка и итоговая вероятность потери пакетов.

Суммарное энергопотребление для стратегии P_i рассчитывается по аддитивной модели как сумма энергозатрат по всем подканалам, включенным в стратегию $k \in P_i$. Общие энергозатраты являются простой суммой затрат на передачу по отдельным подканалам, используемым в рамках стратегии:

$$e_i = \sum_{k \in P_i} e_k.$$

Показатель задержки для стратегии P_i определяется исходя из предположения о параллельной передаче данных по всем подканалам $k \in P_i$. В этом случае общая задержка доставки сообщения лимитируется самым медленным подканалом. Таким образом, итоговая задержка равна максимальной из задержек подканалов, входящих в стратегию:

$$t_i = \max_{k \in P_i} t_k.$$

Такой подход соответствует сценарию, когда приемник может обработать полное сообщение только после получения последнего из переданных фрагментов.

Итоговая вероятность потерь пакетов для стратегии P_i определяется как вероятность того, что сообщение не будет успешно доставлено при использовании выбранного набора подканалов. В рамках данной модели принимается допущение, что передача считается неуспешной (пакеты потеряны), если данные потеряны хотя бы в одном из подканалов $k \in P_i$. При дополнительном предположении о независимости возникновения ошибок в различных подканалах общая вероятность потерь пакетов вычисляется на основе вероятностей потерь на каждом из задействованных подканалов:

$$r_i = 1 - \prod_{k \in P_i} (1 - r_k),$$

следовательно, стратегия не реализуется (происходит потеря пакетов), если хотя бы один из выбранных подканалов не смог доставить данные корректно.

После расчета показателей эффективности (e_i, t_i, r_i) для каждой из m рассматриваемых стратегий $(i = 1, \dots, m)$ формируется матрица эффективности. Каждая строка этой матрицы соответствует стратегии P_i и содержит ее количественные оценки по трем критериям:

$$S_m = \begin{bmatrix} e_1 & t_1 & r_1 \\ e_2 & t_2 & r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_m & t_m & r_m \end{bmatrix}.$$

Указанная матрица представляет собой исходные данные для последующего этапа многокритериального анализа, целью которого является ранжирование стратегий и выбор наиболее предпочтительной из них с учетом заданных приоритетов.

Следующим шагом является преобразование значений показателей эффективности, имеющих разные физические единицы и диапазоны изменения, к единой безразмерной шкале для обеспечения возможности их сопоставления и агрегирования. Для этого применяется процедура нормализации, в результате которой для каждого критерия строится функция принадлежности.

В случае критерия энергозатрат, который подлежит минимизации, нормирование осуществляется следующим образом: обозначим через $e_f = \min_{1 \leq i \leq m} e_i$ и $e_p = \max_{1 \leq i \leq m} e_i$, соответственно, минимальное и максимальное значения энергозатрат среди всех стратегий, тогда функция принадлежности задается формулой:

$$\eta_{e_i} = \begin{cases} 1, & e_i \leq e_f \\ \frac{e_p - e_i}{e_p - e_f}, & e_f \leq e_i \leq e_p. \\ 0, & e_i \geq e_p \end{cases} \quad (1)$$

Аналогичным образом выполняется нормирование для критерия задержки. Пусть $t_f = \min_{1 \leq i \leq m} t_i$ и $t_p = \max_{1 \leq i \leq m} t_i$. Тогда функция принадлежности определяется как:

$$\eta_{t_i} = \begin{cases} 1, & t_i \leq t_f \\ \frac{t_p - t_i}{t_p - t_f}, & t_f \leq t_i \leq t_p. \\ 0, & t_i \geq t_p \end{cases} \quad (2)$$

Для критерия потерь пакетов, который также подлежит минимизации, нормирование осуществляется аналогично критериям энергозатрат и задержки. Обозначив $r_f = \min_{1 \leq i \leq m} r_i$ и $r_p = \max_{1 \leq i \leq m} r_i$, получаем:

$$\eta_{r_i} = \begin{cases} 1, & r_i \leq r_f \\ \frac{r_p - r_i}{r_p - r_f}, & r_f \leq r_i \leq r_p, \\ 0, & r_i \geq r_p \end{cases} \quad (3)$$

Применение формул нормализации (1–3) ко всем стратегиям позволяет сформировать нечеткую матрицу решений:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \eta_{e_1} & \eta_{t_1} & \eta_{r_1} \\ \eta_{e_2} & \eta_{t_2} & \eta_{r_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta_{e_m} & \eta_{t_m} & \eta_{r_m} \end{bmatrix},$$

в которой каждая строка соответствует одной стратегии и отражает степень ее соответствия оптимальным значениям по каждому из рассматриваемых критериев.

Для проведения сравнительного анализа альтернатив вводится идеальный (эталонный) вектор \bar{G} , определяющий наилучшие возможные значения среди всех стратегий. Компоненты этого вектора представляют собой максимальные значения функций принадлежности по каждому критерию:

$$\bar{G} = \left(\max_i \eta_{e_i}, \max_i \eta_{t_i}, \max_i \eta_{r_i} \right),$$

каждый элемент \bar{G}_j (где $j \in \{e, t, r\}$) представляет собой наивысшую степень принадлежности, достигнутую хотя бы одной из стратегий по соответствующему критерию. Эталонный вектор служит точкой отсчета при вычислении степени близости каждой стратегии к «идеальному» варианту и используется на последующих этапах агрегирования и ранжирования решений в рамках метода нечеткого многокритериального анализа.

Оценка и выбор оптимальной стратегии

Выбор оптимальной стратегии передачи данных в гетерогенных сетях ИВ требует количественной оценки и сравнения альтернатив $P_i \in P$ с учетом всех рассматриваемых критериев (e, t, r) и их относительной важности ($\omega_e, \omega_t, \omega_r$). На предыдущем этапе каждой стратегии были сопоставлены векторы нормализованных нечетких оценок $\bar{R}_i = (\eta_{e_i}, \eta_{t_i}, \eta_{r_i})$. Совокупность этих векторов и служит основой для дальнейшего сравнения.

Для количественного сопоставления каждой альтернативной стратегии с идеальным решением \bar{G} вычисляется метрика расстояния между ними в пространстве нормализованных оценок. В качестве такой метрики используется взвешенное расстояние Хэмминга [10], учитывающее веса критериев:

$$D_\omega(\bar{R}_i, \bar{G}) = \omega_e |\eta_{e_i} - \bar{G}_1| + \omega_t |\eta_{t_i} - \bar{G}_2| + \omega_r |\eta_{r_i} - \bar{G}_3|,$$

где $\omega_e, \omega_t, \omega_r$ – веса критериев, отражающие относительную значимость каждого из них в общей оценке.

На основе вычисленного расстояния D_ω рассчитывается интегральный коэффициент относительной близости стратегии к идеальному решению:

$$N_{H_i} = 1 - D_\omega(\overline{R}_i, \overline{G}),$$

где коэффициент N_{H_i} принимает значения в диапазоне $[0, 1]$; чем выше его значение, тем ближе стратегия к идеальному решению в многокритериальном пространстве, и следовательно, тем более предпочтительной она считается.

Окончательное определение оптимальной стратегии P^* из множества P осуществляется путем выбора альтернативы P_{i^*} , имеющей максимальное значение коэффициента N_{H_i} :

$$i^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq m} N_{H_i}, \quad P^* = P_{i^*},$$

где i^* – индекс оптимальной стратегии.

Таким образом, предложенный подход, основанный на нечетком многокритериальном анализе и концепции расстояния до идеальной точки, позволяет систематически ранжировать доступные стратегии передачи данных и выделять наиболее предпочтительную из них, обеспечивая сбалансированное решение в условиях многокритериальности и неопределенности.

Результаты моделирования

Для оценки эффективности предложенного метода выбора стратегии передачи данных в гетерогенной сети ИВ было проведено имитационное моделирование. Ключевой метрикой для сравнения производительности является «жизненный цикл системы», определяемый как общее количество пакетов, которое узел-источник может передать при ограниченном начальном запасе энергии. Такой подход позволяет дать практическую оценку энергоэффективности каждого метода в реалистичных условиях.

Разработанный подход по производительности сравнивался с базовым методом случайного выбора стратегии, который предполагает выбор одной из доступных стратегий передачи без применения каких-либо критериев оптимизации. Для обеспечения статистической достоверности результатов и исключения влияния случайных факторов каждая симуляция выполнялась 500 раз (метод Монте-Карло).

Моделирование было реализовано с использованием среды MATLAB. Рассматривается модель сети с тремя независимыми подканалами ($K = 3$): радиоканал, акустический и оптический. Это соответствует $2^3 - 1 = 7$ возможным непустым стратегиям передачи данных. Исходные параметры, используемые в моделировании, представлены в таблице 1. Результаты моделирования (рисунок 2) демонстрируют существенное преимущество предложенного метода: в среднем

он обеспечил передачу 625 пакетов, что на 64,59 % превосходит результат метода случайного выбора (380 пакетов).

Таблица 1 – Исходные параметры моделирования

Параметр	Канал 1 (радио)	Канал 2 (акустический)	Канал 3 (оптический)
Энергопотребление (e_k), мДж/пакет	8	3	12
Задержка (t_k), мс	80	250	30
Вероятность потерь (r_k)	0,005	0,015	0,001
Начальный запас энергии источника (E_{total}), мДж	5000		
Весовые коэффициенты ($\omega_e, \omega_t, \omega_r$)	[0,6; 0,2; 0,2]		

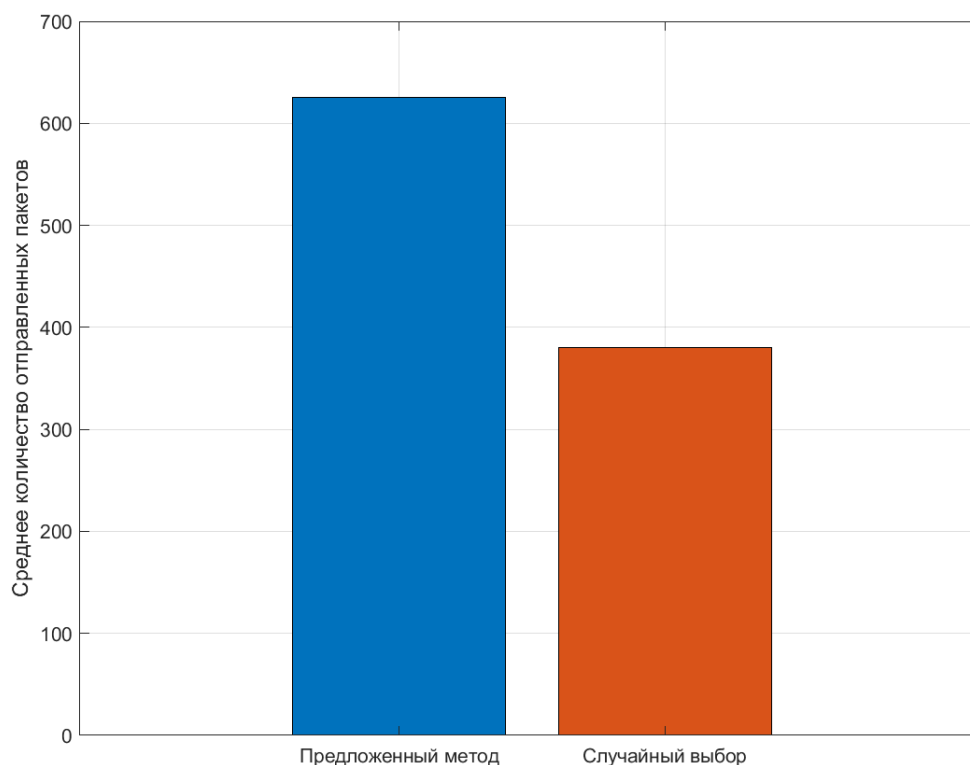


Рис. 2. Сравнение эффективности методов по критерию «жизненный цикл системы»

Ключевым фактором, определяющим столь значительный выигрыш, является гетерогенность подканалов. Эффективность предложенного интеллектуального подхода напрямую зависит от степени различия их параметров: чем больше разница, тем выше преимущество. В условиях эксперимента с приоритетом на энергосбережение ($\omega_e = 0,6$) алгоритм целенаправленно выбирал стратегии с использованием наиболее экономичного акустического подканала. Случайный выбор, в свою очередь, не способен к такой адаптации, что вело к неэффективному расходу энергии. Следует отметить, что в гипотетическом случае полностью идентичных подканалов выигрыш был бы равен нулю, так как интеллектуальный выбор не давал бы преимуществ.

В условиях реальных сетей ИВ, где подканалы обладают кардинально различными характеристиками, применение данного метода даст значительный положительный эффект в части продления времени автономной работы устройств.

Классические подходы часто фокусируются на оптимизации одного параметра, например, минимизации задержки. Предложенный метод ориентирован на гибкую многокритериальную оптимизацию, позволяя находить компромиссное решение, которое наилучшим образом соответствует текущим приоритетам приложения, задаваемым вектором весовых коэффициентов. Это позволяет системе адаптироваться к различным требованиям: от максимальной экономии энергии до обеспечения минимальной задержки.

Следует также отметить, что для практической реализации данного метода устройство должно поддерживать несколько интерфейсов передачи, что потенциально повышает его сложность и стоимость. Таким образом, его применение наиболее целесообразно в тех случаях, когда требуется максимальная гибкость и эффективность использования ресурсов и эти преимущества оправдывают усложнение аппаратной части, а сам метод позволяет оптимизировать использование этих гетерогенных ресурсов.

Выводы

В работе решена актуальная задача выбора оптимальной стратегии передачи данных в гетерогенных сетях ИВ. Предложена методика, на основе нечеткого многокритериального анализа, позволяющая выполнять комплексную оценку альтернативных стратегий по совокупности противоречивых критериев: энергопотребления, задержки и вероятности потерь пакетов.

Результаты имитационного моделирования подтвердили высокую эффективность предложенного подхода. В рамках сценария, ориентированного на максимальное энергосбережение, разработанный метод продемонстрировал превосходство над случайным выбором на 64,59 %, что выразилось в значительно большем количестве переданных пакетов при одинаковом запасе энергии. Установлено, что эффективность метода напрямую зависит от степени гетерогенности подканалов, что делает его особенно ценным для реальных сетей ИВ с разнообразными технологиями передачи.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная методика предоставляет гибкий инструмент для адаптивного управления передачей данных. Путем изменения весовых коэффициентов система может быть настроена на выполнение различных прикладных задач, будь то продление времени автономной работы устройств или обеспечение минимальной задержки для критически важных сообщений.

Литература

1. Vlasenko M., Khlaponin Yu. The Internet of Things (IoT) in World Practice: Review and Analysis // *Pidvodni Tehnologii*. 2024. Iss. 13. PP. 21–27. DOI: 10.32347/uwt.2023.13.1202. EDN: OYEIHQ
2. Кучерявый А. Е. Триллионные сети // *Телекоммуникации*. 2013. № S7. С. 19–22. EDN: REKFXF

3. Noaman M., Khan M. S., Abrar M. F., Ali S., Alvi A., et al. Challenges in Integration of Heterogeneous Internet of Things // Scientific Programming. 2022. P. 8626882. DOI: 10.1155/2022/8626882. EDN: KXZSPZ

4. Qiu T., Chen N., Li K., Atiquzzaman M., Zhao W. How Can Heterogeneous Internet of Things Build Our Future: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20. Iss. 3. PP. 2011–2027. DOI: 10.1109/COMST.2018.2803740. EDN: YFGIPJ

5. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Маколкина М. А., Мутханна А. С. А., Выборнова А. И. и др. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1–12. DOI: 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12. EDN: LHLYEM

6. Кучерявый А. Е., Окунева Д. В., Парамонов А. И., Хоанг Н. Ф. Методы распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 67–74. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. EDN: RTNVEU

7. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2020. № 1. С. 44–48. DOI: 10.34832/ELSV.2020.2.1.006. EDN: IWAHZO

8. Бушеленков С. Н., Парамонов А. И. Анализ и формирование структуры сети Интернета вещей на основе моделей решеток // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23–28. DOI: 10.34832/ELSV.2021.20.7.002. EDN: JIBLHT

9. Ilieva G., Yankova T. IoT System Selection as a Fuzzy Multi-Criteria Problem // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 11. P. 4110. DOI: 10.3390/s22114110. EDN: PZHAEX

10. Md Saad R., Ahmad M. Z., Abu M. S., Jusoh M. S. Hamming Distance Method with Subjective and Objective Weights for Personnel Selection // The Scientific World Journal. Vol. 2014. Iss. 1. P. 865495. DOI: 10.1155/2014/865495

Статья поступила 08 сентября 2025 г.
Одобрена после рецензирования 17 сентября 2025 г.
Принята к публикации 19 сентября 2025 г.

Информация об авторах

Хоанг Фыок Ньян – аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: khoang.fn@sut.ru

Парамонов Александр Иванович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: paramonov@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-2-32-42>
EDN: ZUDPTT

Transmission Strategy Selection in a Heterogeneous Internet of Things Network Using Fuzzy Multi-Criteria Analysis

Ph. N. Hoang ,  A. Paramonov

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

Purpose. This article is dedicated to solving the problem of selecting an optimal data transmission strategy in heterogeneous Internet of Things (IoT) networks. To evaluate and select strategies, considering such conflicting factors as energy consumption, delay, and packet loss, an approach based on fuzzy multi-criteria analysis is proposed. This approach allows for finding effective trade-off solutions under conditions of uncertainty and fuzziness of the initial data, which are characteristic of IoT networks. **Subject of research.** Selection of a transmission strategy in heterogeneous IoT networks. **Method:** Fuzzy multi-criteria analysis, which enables the consideration and processing of multiple criteria and fuzzy data. **Results.** The effectiveness of the proposed approach for determining transmission strategies that provide an optimal balance between energy consumption, delay, and packet loss is demonstrated, which contributes to an increase in overall network performance. **Practical significance.** The developed approach is applicable for optimizing data transmission in real-world IoT networks, including reducing energy consumption and delays while maintaining a high probability of delivery, which is relevant for smart city and industrial automation applications.

Keywords: Internet of things, heterogeneous networks, transmission strategy, fuzzy analysis, multi-criteria optimization

Information about Authors

Hoang Phuoc Nhan – Postgraduate Student at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: khoang.fn@sut.ru

Paramonov Alexandr – Holder of Advanced Doctorate in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: paramonov@sut.ru