

Научная статья

УДК 519.872

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-97-105>

EDN:QVTBIX



Метод распределения мощности передачи в гетерогенных сетях Интернета вещей

Фыок Ньян Хоанг, khoang.fn@sut.ru **Александр Иванович Парамонов** , paramonov@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. Совершенствование сетей Интернета вещей, являясь одним из приоритетных направлений развития телекоммуникаций, приводит к образованию сетей с высокой концентрацией устройств – сетей высокой и сверхвысокой плотности. Для обеспечения функционирования таких сетей могут быть использованы различные технологии связи, что ведет к формированию гетерогенных сетей Интернета вещей. Это могут быть сети сбора данных, сети коммуникаций машина–машина (M2M), телеуправления и другие. Использование множества технологий требует применения методов, обеспечивающих эффективность их эксплуатации для передачи данных. В работе предлагается один из таких методов, обеспечивающий повышение эффективности гетерогенной сети Интернета вещей.

Постановка задачи. Разработка модели и метода распределения мощности между подканалами в узлах гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности с учетом особенностей таких сетей, позволяющих получить описание их функционирования и обеспечить повышение эффективности функционирования за счет перераспределения мощности передачи по подканалам.

Цель работы. Повышение эффективности функционирования гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности. Для решения задачи **использовались методы** математического моделирования, теории информации, методы оптимизации и численного моделирования.

Результат. Разработан модельно-методический аппарат, обеспечивающий повышение эффективности функционирования гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности за счет оптимального перераспределения мощности между подканалами передачи данных, что дает возможность повысить скорость передачи данных при фиксированной мощности передачи.

Новизна. Эффективность предложенного метода обеспечивается благодаря решению задачи оптимального распределения мощности между подканалами с учетом величины помех и обслуживаемого трафика (использования). Эффективность метода зависит от параметров подканалов. Она минимальна при идентичных подканалах и повышается при увеличении различий между параметрами используемых подканалов. Предложенный метод учитывает трафик, передаваемый по подканалам (загрузку подканалов) и их особенности в части достижимой скорости передачи, что позволяет адаптировать данный метод к конкретным условиям.

Практическая значимость. Разработанные модель и метод могут быть использованы при построении устройств и гетерогенных сетей Интернета вещей высокой плотности в целях повышения их эффективности. Метод распределения мощности по подканалам может быть применен при реализации системы управления (протокола) передачей для устройств, использующих различные технологии организации каналов передачи.

Ключевые слова: сеть Интернета вещей, канал связи, скорость передачи данных, эффективность сети, распределение мощности, оптимизация

Ссылка для цитирования: Хоанг Ф.Н., Парамонов А.И. Метод распределения мощности передачи в гетерогенных сетях Интернета вещей // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 97–105. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-97-105. EDN:QVTBIX

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-97-105>
EDN:QVTBIX

Transmission Power Distributing Method for the Internet of Things Heterogeneous Networks

 **Fuoc N. Huang**, khoang.fn@sut.ru
 **Alexandr I. Paramonov** , paramonov@sut.ru

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

Annotation

Relevance. The development of the Internet of Things networks, being one of the priority areas of telecommunications development, leads to the formation of networks with a high concentration of devices - high-density and ultra-high-density networks. To ensure the functioning of such networks, various communication technologies can be used, which leads to the formation of heterogeneous networks of the Internet of Things. These can be data collection networks, machine-to-machine (M2M) communication networks, telecontrol and others. The use of many technologies requires the application of methods that ensure the efficiency of their use for data transmission. In this paper, one of such methods is proposed that ensures an increase in the efficiency of a heterogeneous Internet of Things network.

Problem statement. Development of a model and method for distributing power between subchannels in nodes of a heterogeneous high-density Internet of Things network, taking into account the features of such networks, allowing to obtain a description of their functioning and ensure an increase in the efficiency of functioning due to the redistribution of transmission power across subchannels.

Purpose of the work. Improving the efficiency of a heterogeneous high-density Internet of Things network. **To solve the problem, methods** of mathematical modeling, information theory, optimization and numerical modeling were used.

Result. A modeling and methodological apparatus has been developed that ensures increased efficiency of a high-density heterogeneous Internet of Things network due to optimal power redistribution between data transmission subchannels, which makes it possible to increase the data transmission rate at a fixed transmission power.

Novelty. The efficiency of the proposed method is ensured by solving the problem of optimal power distribution between subchannels taking into account the amount of interference and the serviced traffic (usage). The efficiency of the method depends on the parameters of the subchannels. It is minimal for identical subchannels and increases with increasing differences between the parameters of the subchannels used. The proposed method takes into account the traffic transmitted via subchannels (subchannel load) and their features in terms of achievable transmission speed, which makes it possible to adapt this method to specific conditions.

Practical significance. The developed model and method can be used in the construction of devices and heterogeneous networks of the Internet of Things of high density in order to increase their efficiency. The method of power distribution by subchannels can be used in the implementation of the transmission control system (protocol) for devices using various technologies for organizing transmission channels.

Keywords: Internet of Things network, communication channel, data transfer rate, network efficiency, power distribution, optimization

For citation: Huang F.N., Paramonov A.I. Transmission Power Distributing Method for the Internet of Things Heterogeneous Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(4):97–105. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-97-105. EDN:QVTBIX

Введение

Развитие Интернета вещей (ИВ) [1], в том числе промышленного, ведет к появлению сверхплотных

сетей связи, в которых в малом объеме сосредоточено большое число сетевых устройств. При использовании традиционного подхода к организа-

ции сети и соответствующих потребностях в передаче трафика возникают естественные сложности в части недостатка канального ресурса.

В сети высокой плотности [2] часто требуется организация каналов связи на малых расстояниях, измеряемых единицами метров или даже менее этого, например, при обмене данными между роботами в группе и т. п. Исходя из определения сети высокой плотности, количество устройств составляет более одного на квадратный метр площади, следовательно, расстояния между ними малы. Использование таких распространенных стандартов радиосвязи как Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и многих других, приводит к нагрузке (занятию канального ресурса) при передаче данных в радиусе десятков или сотен метров, и созданию внутриканальных помех на еще большем расстоянии от передатчика. Это снижает рациональность использования радиочастотного ресурса при организации связи на малые расстояния.

Однако в такой сети может потребоваться и организация связи на относительно большие расстояния. Таким образом, для повышения эффективности сети желательно иметь набор различных средств, применяемых в различных случаях, в зависимости от требований к доставке данных. Таким свойством обладают гетерогенные сети, построенные с применением различных технологий передачи [3–5]. Например, может быть использовано несколько различных технологий радиосвязи, оптической и акустической связи. Выбор той или иной технологии производится в зависимости от поставленной цели и имеющихся требований.

Использование множества каналов, которые могут быть организованы в гетерогенной сети связи при благоприятных условиях, может обеспечить повышение скорости передачи данных. При этом передача может производиться параллельно по нескольким независимым каналам. При этом результирующая скорость данных передачи будет равна сумме скоростей передачи по каждому из используемых каналов. Передача по каждому из каналов требует определенных затрат энергии, которые зависят от эффективности используемых технологий. В устройствах ИВ затраты энергии имеют существенное значение, поскольку влияют на работоспособность сети в конечном итоге [6]. В таком случае возникает задача распределения энергии между подканалами, при котором достигается максимальная скорость передачи.

В этой работе предлагается метод повышения энергоэффективности передачи данных в гетерогенной сети беспроводной связи при использовании нескольких подканалов.

Модель гетерогенной сети высокой плотности

Для моделирования сети примем следующие допущения. Полагаем, что сеть высокой (сверхвысокой) плотности состоит из однотипных гетерогенных устройств (узлов), обеспечивающих организацию k независимых подканалов, каждый из которых характеризуется полосой пропускания w_i , и мощностью, затрачиваемой на передачу p_i , $i = 1, \dots, k$ (рисунок 1).

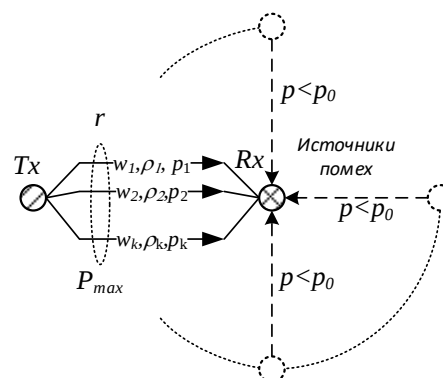


Рис. 1. Модель гетерогенной сети высокой плотности

Fig. 1. Model of a High-Density Heterogeneous Network

Будем также полагать, что узел сети способен принять сигнал, уровень мощности которого не менее некоторой пороговой величины p_0 . В противном случае сигнал не может быть принят и воспринимается как помеха. Таким образом, на входе приемника имеют место сигналы шума, и помехи, производимые соседними узлами, уровень мощности сигнала которых не превышает p_0 .

Мощность помехи на входе приемника будет определяться следующим выражением:

$$p_{NI} = p_{TN} + p_I, \quad (1)$$

где p_{TN} – мощность теплового шума (Вт); p_I – мощность помех (Вт).

Мощность теплового шума определяется выражением:

$$p_{TN} = kT\omega, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура (К); ω – полоса пропускания канала (Гц).

Мощность сигнала помех опишем выражениями, приведенными в [5]:

для двумерного случая

$$p_I^{(2)} = d_0 \iint_C k(x, y) dx dy, \quad (3)$$

для трехмерного случая

$$p_I^{(3)} = v_0 \iiint_V k(x, y, z) dx dy dz, \quad (4)$$

где d_0 – мощность помехи, производимая на единице площади Вт/м²; v_0 – мощность помехи, произ-

водимая в единице объема Вт/м³; $k(x, y)$ – коэффициент, определяющий зависимость мощности помехи в точке O от координат источника помехи; C – рассматриваемая область на плоскости; V – рассматриваемая область в пространстве.

В работе [7] приводится модель на основе выражения (3), описывающая мощность помех в сети с равномерным распределением устройств на плоскости для выбранной модели затухания. В данной работе учтем сигналы помех в общем виде, не конкретизируя модели затухания и распределения устройств, воспользовавшись тем, что выражения (3) и (4) линейны относительно удельной величины мощности из расчета на единицу площади d_0 или объема v_0 . Это позволяет выразить зависимость помехи от мощности передачи линейной зависимостью вида:

$$p_I = v_0 M = \rho \mu p_{TX} M, \quad v_0 = \rho \mu p_{TX}, \quad (5)$$

где ρ – плотность сети (узлов/м³); p_{TX} – мощность передатчика (Вт); μ – занятость подканала (трафик, доля времени передач); $M \geq 0$ – числовой коэффициент, определяемый моделью (4) (моделью (3) для двумерного случая).

Полагаем, если скорость передачи данных в канале – ir_i , а число каналов – k , тогда общая скорость передачи при их одновременном использовании будет определяться как сумма скоростей:

$$r = \sum_{i=1}^k r_i. \quad (6)$$

Модель подканала опишем формулой К. Шеннона [6], при этом учтем неидеальность канала, введя поправочный коэффициент, а также – загруженность канала; последнюю будем интерпретировать, как долю времени, в течение которого канал может быть использован для передачи. В данном случае каналы организованы в среде доступа и могут использоваться всеми устройствами, т. е. канал может быть занят передачей данных между соседними устройствами и недоступен в произвольный момент времени. В таком случае передатчик вынужден ожидать освобождения канала. По этой причине результирующая скорость передачи данных зависит как от достижимой в канале скорости, так и от доли времени, в течение которого передача возможна, т. е. она ниже достижимой скорости.

В данной модели будем определять результирующую скорость передачи данных как:

$$r_i = \eta_i (1 - \rho_i) \omega_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{p_{TN} + p_I} \right), \quad (7)$$

где ω_i – полоса пропускания i -го канала; ρ_i – нагрузка на канал; p_i – мощность передачи сигнала по i -му подканалу.

Приведенная выше формула основана на выражении К. Шеннона, однако, в отличие от последней, она описывает не достижимую скорость в канале, а значение, полученное за некоторый интервал, с учетом доли времени, в течение которого канал использовался. Величина нагрузки $0 \leq \rho_i \leq 1$.

Полагаем, что все узлы сети однотипны и выбирают параметры работы подканалов одним и тем же способом. С учетом p_i повышение мощности передачи в меньшей степени влияет на скорость.

Например, для случая, когда общая мощность передачи неизменна и равна $p_{\max}$, а изменяется только ее распределение между первым и вторым каналами:

$$p_1 + p_2 = p_{\max},$$

$$p_1 = q p_{\max}, \quad p_2 = (1 - q) p_{\max}, \quad 0 \leq q \leq 1.$$

График зависимости скорости передачи от перераспределения мощности между двумя подканалами представлен на рисунке 2. На графике представлены два варианта: кривая 1 – суммарная скорость передачи без учета помех ($M = 0$); 2 – с учетом помех ($M > 0$); кривые 3 и 4 показывают зависимости скорости передачи первого и второго подканалов от распределения мощности.

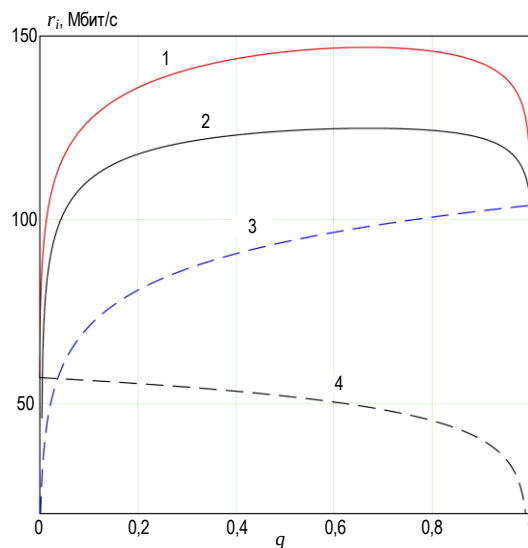


Рис. 2. Зависимость скорости передачи от перераспределения мощности между двумя подканалами

Fig. 2. Dependence of the Transmission Rate on the Redistribution of Power between Two Subchannels

Представленные результаты получены для модели, в которой каналы описаны выражением (7) как каналы с аддитивным белым гауссовским шумом и при значении поправочных коэффициентов $\eta_1 = \eta_2 = 0,5$ и нагрузке каналов $\rho_1 = \rho_2 = 0,8$.

Как видно из приведенного рисунка, скорость передачи с использованием двух подканалов выше, чем при использовании одного при той же мощности передатчика. Очевидно, что это обусловлено

тем, что при двух подканалах используется больший ресурс радиочастотного спектра (большая полоса пропускания). Также видно, что распределение мощности передачи между подканалами имеет оптимальное значение относительно скорости передачи данных. Максимум скорости передачи достигается при определенном соотношении мощностей, выделяемых для подканалов, которое зависит от их параметров. При идентичных подканалах максимум имеет место при равных долях мощности, выделяемых подканалам.

При учете внутриканальных помех прирост скорости передачи при увеличении мощности снижается, поэтому уменьшается и выраженность максимума скорости от перераспределения мощности между подканалами.

При использовании большего числа подканалов имеет место аналогичный эффект зависимости скорости передачи от распределения мощности. Таким образом, для получения максимального эффекта, т. е. максимальной скорости передачи данных, имеет смысл найти оптимальное распределение мощности между подканалами.

Постановка задачи

Допустим, узел отправляет данные следующему узлу по каналу, состоящему из множества гетерогенных подканалов i ($1 \leq i \leq k$). Предполагается, что подканалы независимы и физически не влияют друг на друга, т. е. работают на разных несущих частотах или используют различные среды распространения сигнала (радио, звук, свет) и имеют различную достижимую скорость передачи из-за различных их свойств. Подканалы не создают помехи друг другу и могут использоваться для передачи данных как по одному, так и группами.

Оценим достижимую скорость передачи данных с помощью формулы К. Шеннона [8] для подканала с аддитивным белым гауссовским шумом [9].

Достижимая скорость передачи данных r_i узлом n по подканалу i может быть определена как:

$$r_i = \eta_i(1 - \rho_i)\omega_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{p_{TN} + p_i} \right) = \eta_i(1 - \rho_i)\omega_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{p_{TN} + p_i} \right),$$

где η_i – коэффициент ($0 \leq \eta_i \leq 1$), который позволит учесть отличие реального подканала от идеального.

Общая достижимая скорость передачи данных:

$$R = \sum_{i=1}^k r_i = \sum_{i=1}^k \eta_i(1 - \rho_i)\omega_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{kT\omega_i + \rho_i p_i M} \right),$$

$$\sum_{i=1}^k p_i \leq P_{\max},$$

где $P_{\max}$ – максимальная мощность передачи.

Задача оптимизации скорости передачи данных выражается следующим образом:

$$\max R(p_i) = \max \sum_{i=1}^k r_i =$$

$$= \max \sum_{i=1}^k \eta_i(1 - \rho_i)\omega_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{kT\omega_i + \rho_i p_i M} \right) \quad (8)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{i=1}^k p_i \leq P_{\max}. \quad (9)$$

Анализ второй производной целевой функции (8) показывает, что это выпуклая функция. Тогда задача (8–9) представляет собой задачу выпуклой оптимизации, поскольку она представляет собой разность линейной функции и выпуклой логарифмической функции. Далее приведем решение данной задачи с использованием теоремы Каруша – Куна – Таккера (ККТ) [10].

Метод распределения мощности

На основе целевой функции и ограничений представим функцию Лагранжа как:

$$L(p, \lambda) = \sum_{i=1}^k \eta_i(1 - \rho_i)\omega_i \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{kT\omega_i + \rho_i p_i M} \right) +$$

$$+ \lambda \left(P_{\max} - \sum_{i=1}^k p_i \right), \quad (10)$$

где λ – неотрицательный множитель Лагранжа.

Далее получаем (11) и (12), соответствующие условиям теоремы ККТ [10]. Используя (11) и (12), можно получить соотношение между полосой частот и распределением мощности (13). В свою очередь, уравнение (13) можно представить в виде выражения (14). Исходя из уравнения (14), оптимальные значения мощности и полосы пропускания распределяются по подканалам в соответствии с теорией наполнения сосуда [11] (от англ. Water-Filling Theory).

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = \frac{\eta_i(1 - \rho_i)\omega_i}{\ln 2} \left(\frac{kT\omega_i}{(p_i + kT\omega_i + \rho_i p_i M)(kT\omega_i + \rho_i p_i M)} \right) - \lambda \leq 0, \quad (11)$$

$$p_i \left(\frac{\eta_i(1-\rho_i)\omega_i}{\ln 2} \left(\frac{kT\omega_i}{(p_i + kT\omega_i + \rho\mu p_i M)(kT\omega_i + \rho\mu p_i M)} \right) - \lambda \right) = 0, \quad (12)$$

$$p_i \geq 0, \omega_i \geq 0.$$

$$\omega_i = p_i \left[\frac{-(2kT\rho\mu M + kT) \pm \sqrt{(2kT\rho\mu M + kT)^2 - 4 \left(k^2 T^2 - \frac{\eta_i(1-\rho_i)kT}{\lambda \ln 2} \right) (\rho^2 \mu^2 M^2 + \rho\mu M)}}{2 \left(k^2 T^2 - \frac{\eta_i(1-\rho_i)kT}{\lambda \ln 2} \right)} \right]^+, \quad (13)$$

где $[x]^+ = \max\{0, x\}$, если $x \geq 0$, то $[x]^+ = x$, если $x < 0$, то $[x]^+ = 0$.

$$\omega_i = \begin{cases} p_i [\Lambda_{1i}(\lambda)]^+ \\ p_i [\Lambda_{2i}(\lambda)]^+ \end{cases}, \quad (14)$$

где

$$\Lambda_{1,2i}(\lambda) = \frac{-(2kT\rho\mu M + kT) \pm \sqrt{(2kT\rho\mu M + kT)^2 - 4 \left(k^2 T^2 - \frac{\eta_i(1-\rho_i)kT}{\lambda \ln 2} \right) (\rho^2 \mu^2 M^2 + \rho\mu M)}}{2 \left(k^2 T^2 - \frac{\eta_i(1-\rho_i)kT}{\lambda \ln 2} \right)}.$$

На основе задачи (10) можно выразить двойственную задачу [12] следующим образом:

$$D(\lambda) = \max_p L(p, \lambda). \quad (15)$$

Тогда, подставив (14) в уравнение (15), получаем выражение (16).

Согласно теории двойственности, оптимальное значение исходной задачи (10) всегда равно оптимальному значению двойственной задачи (15).

Далее нужно решить задачу нахождения оптимальных значений p^* и λ^* выражения (16).

$$D(\lambda) = \max_p \sum_{i=1}^k \eta_i(1-\rho_i)p_i[\Lambda_i(\lambda)]^+ \log_2 \left(1 + \frac{1}{kT[\Lambda_i(\lambda)]^+ + \rho\mu M} \right) + \lambda \left(P_{\max} - \sum_{i=1}^k p_i \right), \quad \Lambda_i(\lambda) = \begin{cases} \Lambda_{1i}(\lambda) \\ \Lambda_{2i}(\lambda) \end{cases}. \quad (16)$$

В данной работе предлагается использование метода градиентного спуска (от англ. Gradient Descent) [10], оптимальное значение λ^* и p^* рассчитываются следующим образом:

$$p_i^{j+1} = \left[p_i^j - \gamma \frac{\partial L}{\partial p_i} \right]^+, \quad (17)$$

$$\lambda^{j+1} = \left[\lambda^j - \alpha \frac{\partial D(\lambda^j)}{\partial \lambda^j} \right]^+, \quad (18)$$

где j – индекс итерации алгоритма; α и γ – положительный размер шага достаточно мал и выбран соответствующим образом, чтобы привести переменные λ и p_i к оптимальному сходящемуся значению после итераций, избегая пропуска, если оптималь-

ное значение находится между двумя обновленными значениями $j + m$ и $j + m + 1$.

Алгоритм решения приведен на рисунке 3: итерационным методом производит поиск оптимальных значений мощности для подканалов. Критерием сходимости является отрицательное приращение целевой функции после выполнения очередной итерации.

Эффективность метода распределения мощности

Как было показано выше, применение метода распределения мощности между подканалами обеспечивает повышение скорости передачи данных при сохранении общих энергозатрат. Этот результат может рассматриваться как повышение эффективности функционирования сети, т. к. повышение скорости передачи достигается при сохранении объема затрачиваемых ресурсов (полосы частот и энергии).

Численную оценку эффективности (в процентах) можно охарактеризовать приростом величины скорости передачи данных, для случая применения описанного метода по отношению к равномерному распределению мощности:

$$e = 100 \frac{r_* - r_U}{r_U} \quad (19)$$

где r_* – скорость передачи данных при использовании предложенного метода, а r_U – при равномерном распределении мощности.

Эффективность метода зависит от параметров подканалов, в частности, как было отмечено выше, от уровня внутриканальных помех и от полос пропускания и использования подканалов (нагрузки

на подканалы). Очевидно, что для подканалов с идентичными параметрами оптимальным будет равное распределение мощности, поэтому данный метод будет иметь нулевую эффективность. Однако при наличии различий между подканалами эффективность метода – больше нуля.

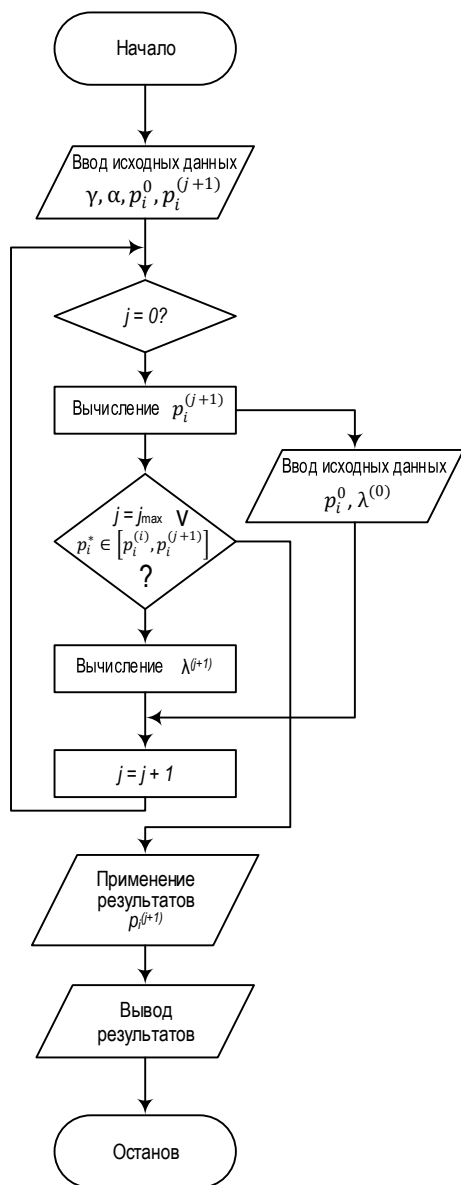


Рис. 3. Алгоритм решения задачи оптимизации

Fig. 3. Algorithm for Solving the Optimization Problem

На рисунке 4 приведена зависимость эффективности метода для группы из двух подканалов на примере подканалов с равными полосами пропускания $\omega_1 = \omega_2 = 10$ МГц и $\omega_1 = \omega_2 = 10$, нагрузках ρ_1, ρ_2 от разницы между нагрузками на них. Как видно из приведенного рисунка, эффективность зависит от разницы в использовании подканалов. Эффективность тем выше, чем выше различие в загрузженности подканалов. Следует отметить, что имеет место зависимость не только от нагрузки на подканалы, но и от всех различий в их параметрах.

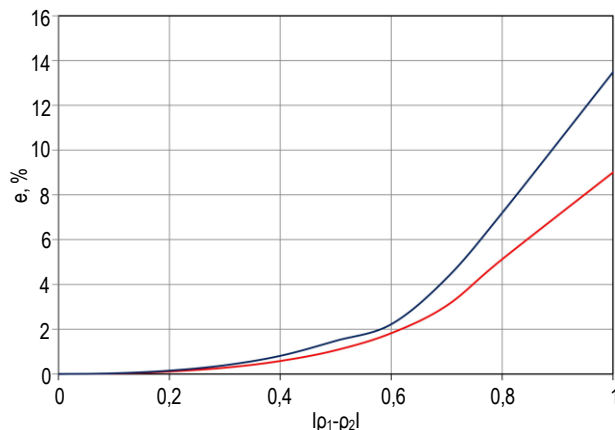


Рис. 4. Алгоритм решения задачи оптимизации

Fig. 4. Dependence of the Efficiency of the Method for a Group of Two Subchannels on the Difference in the Load

Таким образом, эффективность метода распределения нагрузки тем выше, чем выше различие между подканалами. Также следует отметить, что минимальная эффективность, равная нулю, свидетельствует об отсутствии выигрыша (имеет место в случае идентичных подканалов). В условиях гетерогенной сети высокой плотности следует ожидать, что используемые подканалы будут иметь как различные параметры, так и различное применение, поэтому применение данного метода даст положительный эффект в части повышения скорости передачи данных.

Следует заметить, что идея распределения мощности между каналами рассматривается во многих работах, например, в труде Р. Галлагера [13], в [9] авторы предлагают метод распределения мощности для систем когнитивного радио, в работе [14] представлен метод распределения мощности для параллельных вещательных каналов. Предложенный в данной работе метод ориентирован на каналы в гетерогенной сети ИВ, подканалы которых могут сильно отличаться своими параметрами, в том числе производимой на них нагрузкой и особенностями, отличающими их от идеальных каналов с аддитивным белым гауссовским шумом. Сравнение данного метода, например, с методом распределения мощности пропорционально полосе пропускания подканалов, показывает преимущества данного метода, его выигрыш имеет место при различной величине нагрузки (см. рисунок 4).

Следует также отметить, что для применения данного метода требуется реализация нескольких трактов передачи, что потенциально повышает стоимость устройства, а также требует использования большего радиочастотного ресурса (полосы частот). Таким образом, его применение целесообразно при необходимости повышения скорости передачи и при наличии необходимого ресурса. Сам же метод позволяет оптимизировать использование этого ресурса.

Выводы

Во-первых, в условиях гетерогенной сети ИВ высокой плотности возможно применение узлов, оснащенных телекоммуникационным оборудованием, обеспечивающих формирование нескольких подканалов. Подканалы могут быть организованы различным образом, в том числе с использованием различных технологий связи.

Во-вторых, при одновременном использовании нескольких подканалов возможно повышение скорости передачи и данных, и вероятности их доставки, при этом значение скорости передачи зависит от распределения мощности между передатчиками подканалов. В случае нескольких подканалов имеет место оптимальное распределение мощности, когда эквивалентная скорость передачи максимальна.

В-третьих, предложенный метод распределения мощности между подканалами позволяет повысить эффективность функционирования сети за

счет повышения эквивалентной скорости передачи по группе подканалов при фиксированных затратах энергии.

В-четвертых, эффективность предложенного метода зависит от параметров подканалов и тем выше, чем выше разница между их параметрами. Метод имеет нулевую эффективность (не дает выигрыша) в случае идентичных подканалов (и условий передачи) и возрастает с ростом отличий между параметрами подканалов.

Например, в случае использования подканалов с равными полосами пропускания 20 МГц (IEEE 802.11n), максимальный выигрыш составляет около 9 %, а при полосах пропускания 80 МГц (IEEE 802.11ax) эффективность составляет около 13 %. Эффективность тем выше, чем выше разница в загрузке каналов, при прочих равных условиях. Эта особенность позволяет повысить равномерность использования подканалов в гетерогенной сети.

Список источников

1. Рекомендация МСЭ-Е Y.2060 (06/2012). Требования к поддержке приложений машинно-ориентированной связи в среде сетей последующих поколений.
2. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А. 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
3. Selvaraju S.P., Balador A., Fotouhi H., Vahabi M., Bjorkman M. Network Management in Heterogeneous IoT Networks // Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC, Harbin City, China, 28 June – 02 July 2021). IEEE, 2021. PP. 1581–1586. DOI:10.1109/IWCMC51323.2021.9498801
4. Mshvidobadze T. Heterogeneous IoT Platform in Network Architecture // International Journal of Computers. 2022. Vol. 16. PP. 60–65. DOI:10.46300/9108.2022.16.12
5. 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
6. Бузюков Л.Б., Окунева Д.В., Парамонов А.И. Проблемы построения беспроводных сенсорных сетей // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 5–12. EDN:YMHZIX
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:IWANZO
8. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 829 с.
9. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
10. Пантелеев А.П., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2005. 544 с.
11. Qi Q., Minturn A., Yang Y. An efficient water-filling algorithm for power allocation in OFDM-based cognitive radio systems // Proceedings of the International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012, Yantai, China, 19–20 May 2012). IEEE, 2012. PP. 2069–2073. DOI:10.1109/ICSAI.2012.6223460
12. Boyd S.P., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004. 716 p.
13. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. М.: Советское радио, 1974. 720 с.
14. Nir V. L., Scheers B. Distributed Power Allocation for Parallel Broadcast Channels with Only Common Information in Cognitive Tactical Radio Networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2010. P. 172013. DOI:10.1155/2010/172013

References

1. Rec. ITU-E Y.2060 (12/2012). *Requirements for supporting machine-oriented communication applications in a next-generation network environment*. (in Russ.)
2. Koucheryavy A., Paramonov A., Makolkina A., Muthanna A.S.A., Vybornova A., Dunaytsev R. et al. 3 Dimension Multilayer Heterogenous Ultra Dense Networks. *Telecom IT*. 2022;10(3):1–12. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12. EDN:LHLYEM
3. Selvaraju S.P., Balador A., Fotouhi H., Vahabi M., Bjorkman M. Network Management in Heterogeneous IoT Networks. *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC, 28 June – 02 July 2021, Harbin City, China*. IEEE; 2021. p.1581–1586. DOI:10.1109/IWCMC51323.2021.9498801

4. Mshvidobadze T. Heterogeneous IoT Platform in Network Architecture. *International Journal of Computers*. 2022;16: 60–65. DOI:10.46300/9108.2022.16.12
5. Koucheryavy A., Okuneva D., Paramonov A., Hoang N. Methods of Traffic Distribution in a Heterogeneous High-Density Internet of Things Network. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):67–74. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. EDN:RTNVEU
6. Buziukov L., Okuneva D., Paramonov A. Problems of Building Wireless Sensor Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017;3(1):5–12. (in Russ.) EDN:YMHZIX
7. Tonkikh E.V., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Analysis of Wireless High-Density IoT Network. *Elektrosvyaz'*. 2020;1:44–48. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.2.1.006. EDN:IWAHZO
8. Shannon K. *Works on Information Theory and Cybernetics*. Translated from English. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury Publ.; 1963. 829 p. (in Russ.)
9. Zyuko A.G., Klovsky D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. *Theory of Electrical Communication*. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1999. 432 p. (in Russ.)
10. Panteleev A.P., Letova T.A. *Optimization Methods in Examples and Problems*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2005. 544 p. (in Russ.)
11. Qi Q., Minturn A., Yang Y. An efficient water-filling algorithm for power allocation in OFDM-based cognitive radio systems. *Proceedings of the International Conference on Systems and Informatics, ICSAI2012, 19–20 May 2012, Yantai, China*. IEEE; 2012. p.2069–2073 DOI:10.1109/ICSAI.2012.6223460
12. Boyd S.P., Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004. 716 p.
13. Gallager R. *Information Theory and Secure Communications*. Moscow: Sovetskoe radio Publ.; 1974. 720 p. (in Russ.)
14. Nir V. L., Scheers B. Distributed Power Allocation for Parallel Broadcast Channels with Only Common Information in Cognitive Tactical Radio Networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2010:172013. DOI:10.1155/2010/172013

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 21.07.2025; принята к публикации 25.08.2025.

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 21.07.2025; accepted for publication 25.08.2025.

Информация об авторах:

**ХОАНГ
Фыок Ньян**

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0008-7733-4494>

**ПАРАМОНОВ
Александр Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-4104-3504>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.