

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-145-153

УДК 004.6, 004.051, 621.391

Метод оптимизации сеансов связи в кинематической сенсорной системе

Татьяна Николаевна Астахова¹✉, Михаил Олегович Колбанёв²,
Борис Яковлевич Советов³

^{1,2} Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, 606340, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, 191023, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, Российская Федерация

¹ ctn_af@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7032-0697>

² mokolbanev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

³ bysovetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3116-8810>

Аннотация

Введение. В условиях стремительного развития интернета вещей особую актуальность приобретают энергоэффективные мобильные сенсорные сети, в которых узлы обладают возможностью перемещения. В работе рассматривается кинематическая сенсорная система с центром управления и обработки информации (ЦУОИ), где подвижные узлы передают данные в циклически организованные временные слоты. Предполагается, что сеансы связи при передаче данных от подвижных узлов в ЦУОИ организованы циклически. Цикл передачи разделен на равные отрезки времени (временные слоты) таким образом, что внутри каждого слота данные передаются в ЦУОИ от одного определенного подвижного узла. Предлагается метод составления оптимального расписания взаимодействия узлов с ЦУОИ по критерию совокупного потребления энергии системой в целом. Метод позволяет ЦУОИ внутри каждого нового цикла выбирать такой порядок распределения слотов между узлами, который обеспечивает минимум энергопотребления. **Метод.** Предложен метод оптимизации расписания сеансов связи, минимизирующий суммарное энергопотребление системы. Метод интегрирует кинематическую модель движения узлов на основе дифференциальных уравнений Дубинса, радиофизическую модель распространения сигнала (формула Фрииса), и оптимизационное расписание через задачу о назначениях. **Основные результаты.** Разработаны: модель энергопотребления, учитывающая прогнозируемые расстояния до ЦУОИ на основе траекторий Дубинса; алгоритм построения оптимального расписания передачи данных; программная реализация метода. Численный эксперимент на сети из 10 узлов показал снижение суммарного энергопотребления на 29,8 % по сравнению с неизменяемым распределением слотов. **Обсуждение.** Предложенный подход дополняет существующие исследования в области мобильных сенсорных сетей, где, как правило, либо не учитываются реалистичные кинематические ограничения, либо отсутствует глобальная оптимизация расписания. Метод может быть особенно эффективен в сценариях с контролируемой мобильностью (дроны, наземные роботы, автономные платформы).

Ключевые слова

задача о назначениях, траектория Дубинса, кинематические сенсорные системы, мобильные сенсорные системы, оптимизация, сенсорный узел, формула Фрииса, энергопотребление, энергоэффективность

Ссылка для цитирования: Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Советов Б.Я. Метод оптимизации сеансов связи в кинематической сенсорной системе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 145–153. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-145-153

Method for optimizing communication sessions in a kinematic sensor system**Tatiana N. Astakhova¹, Mikhail O. Kolbanev², Boris Ya. Sovetov³**^{1,2} State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University”, Knyaginino, 606340, Russian Federation² St. Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, 191023, Russian Federation³ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 197022, Saint Petersburg, Russian Federation¹ ctn_af@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7032-0697>² mokolbanev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>³ bysovetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3116-8810>**Abstract**

In the context of rapid development of the Internet of Things, energy-efficient mobile sensor networks with moving nodes are becoming increasingly relevant. This work considers a kinematic sensor system with a Control and Information Processing Center (CIPC) where mobile nodes transmit data in cyclically organized time slots. It is assumed that communication sessions during data transmission from mobile nodes to the CIPC are arranged cyclically. The transmission cycle is divided into equal time segments (time slots) such that each slot is dedicated to data transfer from a specific mobile node to the CIPC. A method is proposed for constructing an optimal schedule for node-CIPC interactions based on the criterion of the system total energy consumption. The method enables the CIPC, at each new cycle, to select an order of slot distribution among nodes that ensures minimal energy expenditure. The proposed method optimizes the schedule of communication sessions to minimize the overall energy consumption of the system. It integrates a kinematic model of node movement based on Dubins differential equations, a radio physics model of signal propagation (Friis formula), and an assignment problem for scheduling. Developed are: an energy consumption model considering predicted distances to the CIPC based on Dubins trajectories; an algorithm for constructing the optimal data transmission schedule; and a software implementation of the method. Numerical experiments with a network of 10 nodes demonstrated a reduction in total energy consumption by 29.8 % compared to uniform slot allocation. The proposed approach complements existing research in mobile sensor networks where, as a rule, realistic kinematic constraints are either not considered or global schedule optimization is absent. The method is especially effective in scenarios with controlled mobility (drones, ground robots, autonomous platforms).

Keywords

assignment problem, Dubins trajectory, kinematic sensor systems, mobile sensor networks, optimization, sensor node, Friis formula, energy consumption, energy efficiency

For citation: Astakhova T.N., Kolbanev M.O., Sovetov B.Ya. Method for optimizing communication sessions in a kinematic sensor system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 145–153 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-145-153

Введение

Одной из ключевых технологий, обеспечивающих цифровую трансформацию деятельности, признана технология интернета вещей. Она предполагает использование сенсорных систем, которые обеспечивают сбор и передачу данных на цифровые платформы для дальнейшей обработки. В основе большинства решений интернета вещей лежат распределенные сенсорные системы, состоящие из множества автономных устройств, оснащенных датчиками и средствами беспроводной связи. Традиционные сенсорные системы предполагают стационарное размещение узлов, однако с развитием робототехники и беспилотных платформ все большее распространение получают мобильные сенсорные системы, в которых узлы способны перемещаться в пространстве. Примером таких систем могут служить совокупность автономных подводных аппаратов [1, 2], летательных аппаратов [3], беспилотных систем¹ [4] и др. Подвижность узлов открывает новые возможности для повышения зоны покрытия, обеспечения устойчивости информационного взаимодействия [5] и, что особенно важно, энергопотребления системы — за

счет уменьшения энергии, потребляемой при передаче сигналов.

Особый класс мобильных систем образуют кинематические сенсорные системы (КСС), в которых движение узлов описывается без учета масс, сил и инерции, а только через пространственно-временные характеристики: положение, скорость, ускорение и траекторию. Такой подход позволяет упростить задачи планирования и прогнозирования, сохраняя при этом физическую адекватность для многих типов подвижных платформ. Для того чтобы управлять подвижностью узлов, необходимо правильно формулировать законы геометрической теории управления, согласно которым узлы могут изменять свое местоположение на сенсорном поле или в сенсорном пространстве. Для описания движения в КСС широко применяются модели, учитывающие реальные ограничения маневренности.

Управление информационным обменом между узлами в КСС требует не только точного прогнозирования геометрического положения узлов, но и эффективного распределения ресурсов связи. В последние годы активно развиваются «звериные» алгоритмы — методы оптимизации, заимствующие принципы из природы: поведение муравьиных колоний, роев интеллекта, стай птиц или косяков рыб [6]. Данные алгоритмы демонстрируют высокую эффективность в задачах маршрутизации, кластеризации и распределения временных слотов в динамических сетях. Однако в контексте КСС,

¹ Беспилотные летательные аппараты МЧС России: виды и классификация [Электронный ресурс]. URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/bespilotnyie-letatelnyie-apparatyi-v-mchs-rossii-vidyi-i-klassifikatsiya> (дата обращения: 17.01.2026).

где движение строго детерминировано (например, по траекториям Дубинса), применение таких стохастических методов может быть избыточным.

Актуальными задачами, возникающими при проектировании КСС, являются выбор моделей движения сенсорных узлов [7, 8], модели множественного доступа [9], времени жизни сети [10], архитектуры и протоколов сбора данных [11–13].

Несмотря на значительный прогресс в области мобильных сенсорных сетей, большинство существующих моделей предполагают случайное или упрощенное движение узлов [14, 15] или фокусируются на оптимизации траектории мобильного приемника (базовой станции) без учета детерминированного расписания передачи от подвижных сенсоров [16]. В частности, в работе [17] предложен подход совместной оптимизации маршрутизации и перемещения базовой станции для продления срока жизни сети, однако расписание передачи данных в нем не адаптируется к прогнозируемому положению узлов. В [16] используется модифицированная задача коммивояжера для построения траектории мобильного приемника, но сенсорные узлы рассматриваются как стационарные.

Работы, использующие кинематические модели движения, как правило, ограничиваются планированием маршрутов и не решают задачу назначения временных слотов с учетом динамики расстояний. Например, в [18, 19] исследуются траектории Дубинса и их обобщения для неголономных систем, однако энергетические аспекты информационного взаимодействия в этих работах не рассматриваются.

Таким образом, в известных исследованиях отсутствует комплексный подход, который объединяет кинематическую модель движения узлов, радиофизическую модель распространения сигналов и глобальную оптимизацию расписания передачи данных по критерию суммарного энергопотребления.

Предлагаемая в настоящей работе модель устраняет этот разрыв, обеспечивая прогнозирование расстояний на основе решения дифференциальных уравнений Дубинса и точную оптимизацию временных слотов через задачу о назначениях.

При этом вопросы энергопотребления сенсорных систем выходят на первый план, поскольку устройство таких систем часто питаются от автономных источников энергии, запас которой ограничен. Наибольшая доля энергии тратится на передачу данных, что критически влияет на общий срок службы устройств. С ростом плотности размещения сенсоров и увеличением объема передаваемой информации проблема энергоэффективности становится особенно острой, ограничивая срок автономной работы системы и требуя разработки новых моделей и алгоритмов, направленных на минимизацию энергозатрат при обеспечении надежного информационного взаимодействия.

Сенсорные системы с подвижными узлами дают дополнительные возможности для экономии энергии при обеспечении информационного взаимодействия, поскольку изменяется расстояние между сенсорными узлами и центром управления и обработки информации (ЦУОИ), что позволяет выбирать более

энергоэффективные временные слоты и маршруты для передачи данных, например, когда подвижный узел находится ближе к ЦУОИ или к промежуточным ретрансляторам, требующим меньшей мощности сигнала для связи.

Целью работы является разработка модели энергопотребления для КСС с топологией «звезда», учитывающей движение узлов по траектории Дубинса, и оптимизации расписания передачи данных с целью минимизации затрат мощности, необходимых на передачу информации. В процессе обслуживания ЦУОИ организует передачу данных от сенсорных узлов, расположенных в непосредственной близости к ЦУОИ, при этом преимущество отдается сбору данных именно от узлов, которые удаляются от ЦУОИ и движутся в противоположном направлении. Это означает, что вначале ЦУОИ опрашивает те узлы, которые, как предполагается, изменят свое местоположение на более далекое от ЦУОИ за время цикла, а потом опросит те, которые приближаются к ней. Это, в свою очередь, способствует снижению энергозатрат в процессе передачи блока данных от мобильных сенсорных узлов к ЦУОИ и эффект экономии зависит от расстояний, на которые узлы удаляются или приближаются.

Для достижения цели решаются следующие задачи: разработка метода построения оптимального расписания для передачи данных; анализ модели движения Дубинса и его применение в контексте беспроводных КСС для прогнозирования энергопотребления при обеспечении информационного взаимодействия с использованием формулы Фрииса; проведение численного эксперимента.

Постановка задачи и описание модели

Объектом исследования является КСС. Предметом — модель энергопотребления для обеспечения информационного взаимодействия между узлами КСС, меняющими свое местоположение согласно модели Дубинса.

В работе используются методы системного анализа, оптимизации, дифференциального исчисления, радиотехники и другие.

Допустим, что в двумерном пространстве \mathbb{R}^2 сенсорной системы расположен ЦУОИ, который принимает данные от сенсорных узлов и передает их на некоторую цифровую платформу. Взаимодействие между сенсорами и головным узлом реализуется при помощи радиотехнологий. Сенсорные узлы имеют автономные источники питания с конечным запасом энергии. ЦУОИ получает питание от сети электропитания. В общем случае энергия расходуется на выполнение цифровых операций: сохранения и обработки, для обеспечения механического движения и для передачи/приема радиосигналов. Отметим, что в настоящей работе не учитывается расход энергии на выполнение операций цифровой обработки данных и обеспечения механического движения. Предполагается, что основным потребителем энергии является технология передачи и приема радиосигналов, которые переносят данные между сенсорными узлами. Требуемая для этого мощ-

ность зависит от расстояния между приемной и передающей антеннами, таким образом, что при увеличении расстояния в два раза требуемая мощность может увеличиться в четыре, 8 и более раз. Таким образом, вопрос оптимизации энергопотребления представляет собой ключевую и актуальную проблему, требующую комплексного подхода.

Поскольку сенсорные узлы передвигаются в пространстве с течением времени, расстояние между ними и ЦУОИ меняется. Очевидно, что, если существует возможность передачи данных в тот момент, когда расстояние между сенсором и головным узлом минимальна, это приведет к уменьшению расхода мощности, необходимой для формирования и передачи сигнала.

Эффективное управление энергией в узлах не только увеличивает срок службы автономных источников питания, но и способствует устойчивому развитию технологий. Важно отметить, что с ростом числа подключенных узлов и увеличением объема передаваемых данных, требование к экономии энергии становится все более критичным. Разработка новых энергосберегающих алгоритмов, использование современных протоколов связи с низким энергопотреблением и внедрение технологий обработки данных на краевых узлах могут значительно снизить общие затраты энергии [9].

Предположим, что алгоритм информационного взаимодействия сенсорных узлов между собой и ЦУОИ происходит следующим образом: сенсорные узлы собирают данные об окружающей среде и осуществляют их предварительную обработку для уменьшения объема и повышения точности. После формирования блока данных они передаются по беспроводной сети.

Период времени разделим на временные слоты — Δt . В заданный временной период один узел может передать одно сообщение. Применим протокол синхронного временного доступа. Узлы, используя устройства цикловой синхронизации, передают пакеты фиксированной длины (сообщения) в заранее установленном логическом порядке. Каждому узлу известен момент, когда имеется возможность передачи. ЦУОИ, отвечающий за управление сетью, определяет последовательность доступа для всех узлов в рамках циклического функционирования сети, т. е. ЦУОИ получает информацию о координатах расположения мобильных узлов, которые определяются путем численного интегрирования уравнений Дубинса. Далее ЦУОИ ранжирует по разнице расстояний и направлений и выделяет соответствующий временной период для каждого узла, чтобы узел записал временной такт, в котором он будет работать.

С одной стороны ЦУОИ должен обладать информацией о местоположении любого сенсорного узла, но с другой стороны, пропускная способность ЦУОИ обычно ограничивает возможность ожидания получения информации от сенсорных узлов, пока конкретный узел не окажется на достаточном расстоянии. В каждом цикле опроса ЦУОИ обязан взаимодействовать со всеми сенсорными узлами, а не только с теми, которые находятся в непосредственной близости.

Модель энергопотребления КСС

Для функционирования КСС необходимо составить расписание, в соответствии с которым каждый сенсорный узел передает информацию в выделенном для него окне, при котором достигается экономия энергии.

При моделировании будем рассматривать часть энергозатрат, которая обеспечивает процесс функционирования КСС и определяется информационным взаимодействием сенсорных узлов с ЦУОИ.

Предлагаемый подход объединяет модели расписания, движения и энергозатрат на информационное взаимодействие. Модель движения позволит определять расстояния от сенсорного узла до ЦУОИ в момент передачи информационных сообщений. Модель энергозатрат на информационное взаимодействие выполнит оценку энергоемкости каждого сигнала.

Искомое расписание передачи информации в ЦУОИ будем задавать набором чисел z_{ij} (z_{ij} — бинарная переменная, равная 1, если i -й узел передает информацию в момент t_j , и 0 — иначе).

Оптимальное расписание передачи данных от всех узлов показано на рис. 1.

В настоящей работе предлагается метод построения оптимального расписания передачи блока данных, основанный на решении задачи о назначениях. Тогда критерий эффективности P может быть рассчитан в соответствие со следующей целевой функцией:

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_{ij} P_{ij} \rightarrow \min,$$

где P_{ij} — мгновенная мощность, расходуемая i -м узлом для передачи данных в момент времени t_j .

В связи с тем, что число временных окон равно числу сенсорных узлов введем следующие ограничения.

1. Гарантия передачи данных каждым узлом один раз за цикл:

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1, i = \overline{1, n},$$

где n — число сенсорных узлов; $i = \overline{1, n}$ — номер узла.

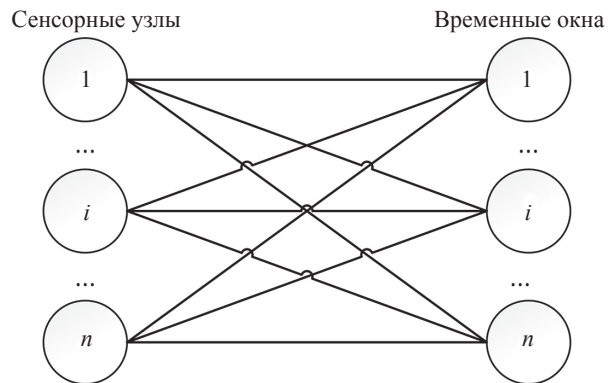


Рис. 1. Расписание передачи блока данных
Fig. 1. Data Block Transmission Schedule

2. Гарантия передачи данных только одним узлом в каждом временном окне:

$$\sum_{i=1}^n z_{ij} = 1, j = \overline{1, n},$$

где $j = \overline{1, n}$ — номер временного окна.

Для составления расписания необходимо заранее определить мощности P_{ij} , которые зависят от расстояния между узлом и ЦУОИ и технологией формирования радиосигналов. Расстояние можно определить по модели движения, которая задается в качестве исходных данных, предположим, моделью Дубинса.

Модель Дубинса описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений, где управление определяет мгновенную угловую скорость, а линейная скорость считается постоянной, радиус поворота ограничен, что характерно для таких объектов, как автомобиль, дрон, самолет и др. Оптимальные пути в модели Дубинса состоят из комбинации прямолинейных участков и дуг окружностей, что упрощает задачи планирования маршрутов по сравнению с более сложными моделями, которые могут учитывать множество дополнительных факторов:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(t) = u_i(t), \\ \dot{x}_i(t) = \cos\theta_i(t), \\ \dot{y}_i(t) = \sin\theta_i(t), \\ u_i(t) \in [-1, +1], i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{\theta}_i(t)$, $\dot{x}_i(t)$ и $\dot{y}_i(t)$ — производные по времени t ; $\theta_i(t)$ — угол поворота или ориентация i -го сенсорного узла; $x_i(t)$ и $y_i(t)$ — координаты i -го узла в двумерном пространстве, зависящие от $\theta_i(t)$; $u_i(t)$ — функция управления или управляющее воздействие, которые оказывают влияние на скорость изменения переменной $\theta_i(t)$.

Допустим, что функция $u_i(t)$ может принимать значения в пределах от -1 до $+1$, что позволяет регулировать скорость изменения угла $\theta_i(t)$ по типу bang-bang control [20].

Таким образом, система (1) может описывать динамику i -го сенсорного узла, который вращается или перемещается в двумерном пространстве с управляемым углом поворота.

Для того чтобы определить координаты сенсорного узла в некоторый момент времени, необходима информация о начальном состоянии, т. е. положении на данный момент сенсорного узла на поле. Обозначим начальные условия как $\theta_i(0)$, $x_i(0)$ и $y_i(0)$.

Проинтегрируем первое уравнение (1) по времени:

$$\theta_i(t_j) = \theta_i(0) + \int_0^{t_j} u_i(t) dt. \quad (2)$$

Найдем координаты i -го узла в момент времени t_j , вычисляемые согласно модели Дубинса:

$$x_i(t_j) = x_i(0) + \int_0^{t_j} \cos\theta_i(t) dt, \quad (3)$$

$$y_i(t_j) = y_i(0) + \int_0^{t_j} \sin\theta_i(t) dt. \quad (4)$$

Решив уравнения (2)–(4) вычислим координаты местоположения i -го сенсорного узла в момент времени t_j .

Однако получить решение в аналитическом виде нетривиальная задача, так как полученные уравнения содержат нелинейные функции, которые описывают сложное поведение системы. Угловая скорость $u_i(t)$ является произвольной функцией времени, зависящей от начальных условий.

Для решения данной системы уравнений можно использовать численные методы, такие как метод Эйлера, метод Рунге–Кутты и другие, что позволит получать временные зависимости координат и углов поворота для каждого узла.

В результате численная реализация методов может установить интервалы времени, в которых узлы будут находиться в определенной приоритетной зоне для передачи информации. Таким образом, зная расстояние в каждый момент времени и используя формулу Фрииса, вычислим необходимую мощность на организацию передачи информации [21]:

$$P_{ij} = \frac{16P_{\text{пр}}\pi^2 r_{ij}^2 f^2}{C_{\text{пер}} C_{\text{пр}} c^2},$$

где $P_{\text{пр}}$ — мощность принимаемой антенны; c — скорость света; $C_{\text{пер}}$ и $C_{\text{пр}}$ — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; f — частота передачи; r_{ij} — расстояние от i -го узла до ЦУОИ в момент времени t_j , вычисляемое по формуле Евклида.

Следовательно, можно спрогнозировать потребляемую мощность всей сенсорной системы, в целом, и определить возможный жизненный цикл системы.

Экспериментальное исследование

Численные эксперименты проводились для сети из 10 сенсорных узлов, движущихся по траекториям Дубинса (рис. 2). Временной цикл был разделен на 10 равных временных окон. Координаты узлов рассчитывались на основе интегрирования уравнений движения. Расстояние до ЦУОИ определялось евклидовой метрикой.

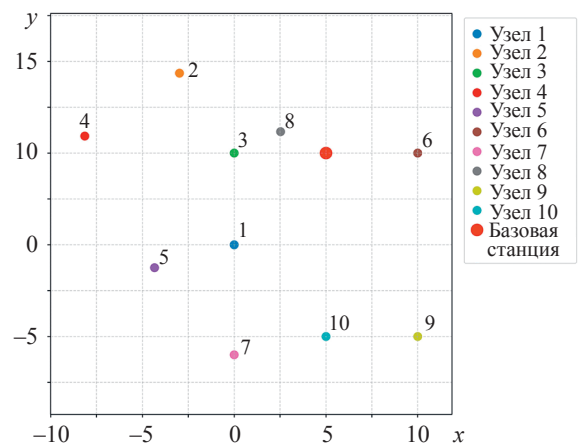


Рис. 2. Разброс узлов по сенсорному полю
Fig. 2. Distribution of Nodes in the Sensor Field

Пусть известны: начальное положение и ориентация каждого i -го узла — (x_i, y_i) ; координаты ЦУОИ (головного узла); частота передачи $f = 8,68 \cdot 10^8$ Гц; коэффициенты усиления антенны: $C_{пер} = 1, C_{пр} = 1$; мощность принимаемой антенны $P_{пр} = 2,2 \cdot 10^{-11}$ Вт.

За время узлы изменяют свое местоположение согласно рис. 3.

Решим задачу о назначениях с использованием алгоритма линейной оптимизации. Для численного решения применим метод «венгерского алгоритма».

Для распределения точек, движущимся по траекториям, представленным на рис. 3, получим оптимальное расписание передачи блока данных в советующий временной слот (таблица).

Общая минимальная мощность составила $\bar{P} = 2,36 \cdot 10^{-5}$ Вт, что на 29,8 % меньше, чем при передаче данных по диагонали ($3,37 \cdot 10^{-5}$ Вт).

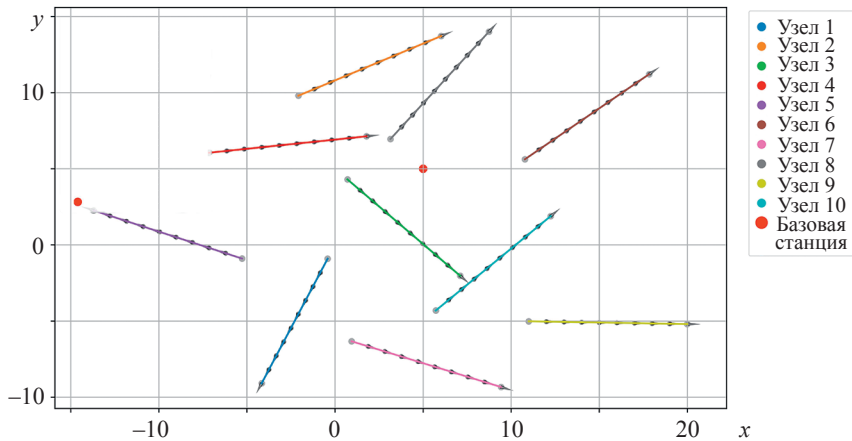


Рис. 3. Траектории движения сенсорных узлов за время $T=10$ с

Fig. 3. Trajectories of Sensor Nodes During Time

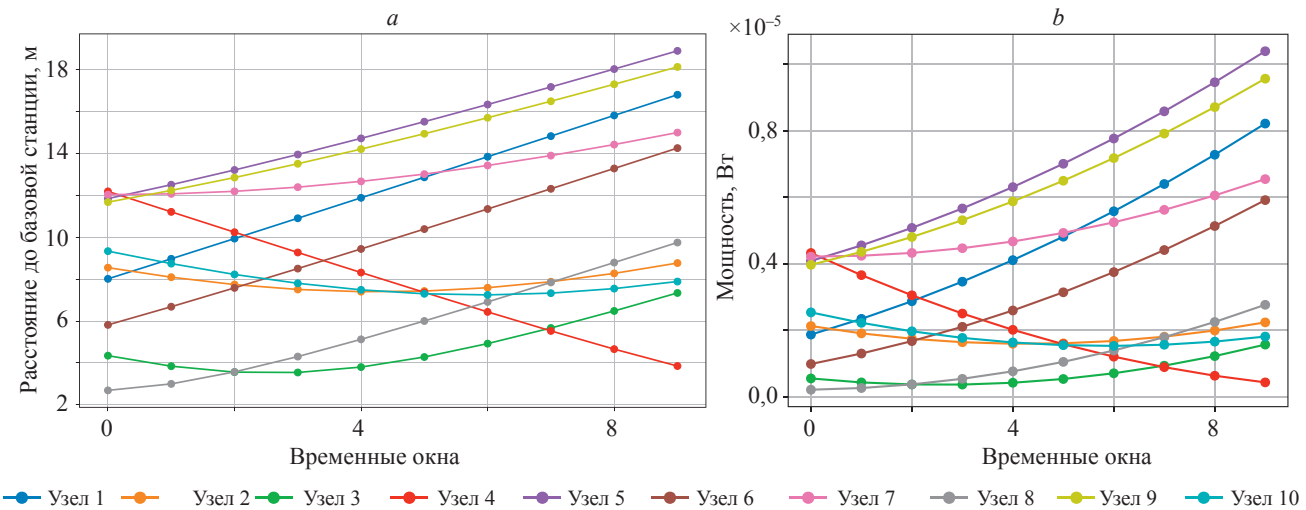


Рис. 4. Зависимости расстояний (a) и мощности (b) от времени

Fig. 4. Dependences of distances (a) and power (b) on time

Таблица. Затраты мощности i -го узла в j -м временном окне
Table. Power consumption of the i -th node in the j -th time window

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номер временного окна	1	8	7	10	2	4	6	5	3	9
Мощность, $\times 10^{-6}$ Вт	1,87	1,81	0,71	0,43	4,55	2,10	4,93	0,76	4,80	1,66

Обсуждение результатов

Предложенный подход к оптимизации энергопотребления в КСС демонстрирует значительные преимущества по сравнению с рядом традиционных методов, применяемых в мобильных сенсорных системах. Например, в отличие от подхода, в соответствии с которым временные слоты жестко закреплены за информационными источниками, в представленном случае модель динамически адаптируется к текущему состоянию сети, что позволяет минимизировать общую мощность передачи за счет выбора наиболее благоприятных временных интервалов для каждого узла, исходя из его пространственного положения в каждом цикле передачи данных.

С другой стороны, по сравнению со статическими моделями, где предполагается неподвижность узлов, представленный метод обеспечивает более высокую адаптивность к реальным условиям функционирования сети, где подвижность узлов является ключевой характеристикой.

По сравнению с алгоритмом выбора времени передачи, который не обеспечивает глобальной оптимизации и может приводить к избыточным энергозатратам, в настоящей работе используется формализованный подход на основе задачи о назначениях, позволяющий находить оптимальное расписание передачи данных, минимизирующее суммарное энергопотребление при соблюдении всех заданных ограничений.

Ключевыми параметрами, влияющими на снижение энергозатрат являются: динамика изменения расстояния между узлами и ЦУОИ, направление движения узлов (удаление/приближение), а также стратегия назначения временных окон.

Таким образом, представленный метод, позволяет учитывать физические ограничения на движение узлов. Использование задачи о назначениях обеспечивает нахождение оптимального решения за полиномиаль-

ное время, что делает метод вычислительно эффективным, также предложенная модель позволяет заранее рассчитать потребляемую мощность на передачу данных, основываясь на математическом моделировании движения узлов и использовании формулы Фрииса. Приведенные расчеты показали, что при определенных условиях энергоэффективность КСС может быть повышена практически на треть (29,8%), что означает снижение потребляемой мощности на узел в среднем на $1,00314 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Заключение

Представлена комплексная модель энергопотребления, а также численная реализация, которая позволила успешно смоделировать динамику сенсорных узлов в двумерном пространстве и оценить потребляемую мощность для передачи блока данных. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований в области оптимизации маршрутов движения мобильных сенсоров и повышения их энергетической эффективности. Предложенный метод построения оптимального расписания передачи данных позволяет существенно снизить энергопотребление в кинематических сенсорных системах. Использование задачи о назначениях гарантирует выполнение ограничений на уникальность передачи данных и обеспечивает минимальные затраты мощности на обеспечение информационного взаимодействия. Кроме того, интерес представляет возможность адаптации модели для учета нескольких центров управления и обработки информации, что может повысить устойчивость и эффективность системы в условиях динамически меняющейся среды. Исследование методов распределенного управления для кластеров сенсорных узлов также является актуальным направлением, которое может привести к значительному улучшению функциональности и надежности сенсорных систем.

Литература

1. Graver J.G., Bachmaye R., Leonard E. Underwater glider model parameter identification // *Proc. of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, 2003. P. 1–12.
2. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // *Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»*, 2019. С. 83.
3. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2016. Т. 4. № 4. С. 13–23.
4. Шустова О.А., Сидоренко А.В. Цифровая модель БПЛА. // *Мавлютовские чтения: материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции*, 2022. С. 553–559.
5. Астахова Т.Н., Верзун Н.А., Касаткин В.В., Колбанев М.О., Шамин А.А. Исследование моделей связности сенсорных сетей // *Информационно-управляющие системы*, 2019. № 5 (102). С. 38–50. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-38-50>
6. Rajwar K., Deep K., Das S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and

References

1. Graver J.G., Bachmaye R., Leonard E. Underwater glider model parameter identification. *Proc. of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, 2003, pp. 1–12.
2. Maevskii A.M., Gaikovich B.A. Development of a lightweight, interventional, autonomous, unmanned underwater vehicle for use in underwater resident systems. *Proc. of the 14th All-Russian Scientific and Practical Conference and 10th Youth School-Seminar «Information Management and Processing in Technical Systems»*, 2019, pp. 83. (in Russian)
3. Bondarev A., Kirichek R. Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries. *Telecom IT*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 13–23. (in Russian)
4. Shustova O.A., Sidorenko A.V. Digital model of the UAV. *Proc. of the 16th All-Russian Youth Scientific Conference Mavlyutov Readings*, 2022, pp. 553–559. (in Russian)
5. Astakhova T., Verzun N., Kasatkin V., Kolbanev M., Shamin A. Sensor network connectivity models. *Information and Control Systems*, 2019, no. 5 (105), pp. 38–50. (in Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-38-50>
6. Rajwar K., Deep K., Das S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges. *Artificial Intelligence Review*, 2023, vol. 56, no. 11, pp. 13187–13257. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y>

- open challenges // Artificial Intelligence Review. 2023. V. 56. N 11. P. 13187–13257. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y>
7. Бортаковский А.С. Оптимальные по быстродействию траектории плоского движения с неограниченной кривизной // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2022. № 4. С. 38–48.
 8. Tong L., Zhao Q., Adireddy S. Sensor networks with mobile agents // Proc. of the IEEE Military Communications Conference, 2003. MILCOM. 2003. P. 688–693. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2003.1290187>
 9. Верзун Н.А., Колбанев М.О., Романова А.А., Цехановский В.В. Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 10. С. 20–27.
 10. Астахова Т.Н., Верзун Н.А., Колбанев М.О., Полянская Н.А., Шамин А.А. Вероятностно-энергетические характеристики взаимодействия умных вещей // Вестник НГИЭИ. 2019. № 4 (95). С. 66–77.
 11. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 3. С. 608–617. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617>
 12. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths // Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839>
 13. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path // Communications in Computer and Information Science. 2023. V. 1748. P. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9
 14. Yang Y., Fonoage M.I., Cardei M. Improving network lifetime with mobile wireless sensor networks // Computer Communications. 2010. V. 33. N 4. P. 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2009.11.010>
 15. Reza zadeh J., Moradi M., Ismail A.S. Mobile wireless sensor networks overview // International Journal of Computer Communications and Networks. 2012. V. 2. N 1. P. 17–22.
 16. Thomas S., Mathew T. Intelligent path discovery for a mobile sink in wireless sensor network // Procedia Computer Science. 2018. V. 143. P. 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.430>
 17. Luo J., Hubaux J.P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks // Proc. of the IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2005. P. 1735–1746. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2005.1498454>
 18. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Геометрический подход к решению задачи для машин Дубинса при формировании программных траекторий движения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 5. С. 653–663. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-653-663>
 19. Бердышев Ю.И. Об оптимальном по быстродействию управлении обобщенной машины Дубинса // Труды института математики и механики УрО РАН. 2016. Т. 22. № 1. С. 26–35.
 20. Bellman R., Glicksberg I., Gross O. On the “bang-bang” control problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1956. V. 14. N 1. P. 11–18. <https://doi.org/10.1090/qam/78516>
 21. Shaw J.A. Radiometry and the Friis transmission equation // American Journal of Physics. 2013. V. 81. N 1. P. 33–37. <https://doi.org/10.1119/1.4755780>
 7. Bortakovskii A.S. Speed-optimal trajectories of plane motion with unlimited curvature. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2022, no. 4, pp. 38–48. (in Russian)
 8. Tong L., Zhao Q., Adireddy S. Sensor networks with mobile agents. *Proc. of the IEEE Military Communications Conference*, 2003. MILCOM, 2003, pp. 688–693. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2003.1290187>
 9. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Romanova A.A., Tsehanovsky V.V. Model of regulated multiple access in the network Internet of things. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*, 2020, no. 10, pp. 20–27. (in Russian)
 10. Astakhova T.N., Verzun N.A., Kolbanov M.O., Polyanskaya N.A., Shamin A.A. Probability-energy characteristics of the interaction of smart things. *Bulletin NGIEI*, 2019, no. 4 (95), pp. 66–77. (in Russian)
 11. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 608–617. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617>
 12. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths. *Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839>
 13. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748, pp. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9
 14. Yang Y., Fonoage M.I., Cardei M. Improving network lifetime with mobile wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010, vol. 33, no. 4, pp. 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2009.11.010>
 15. Reza zadeh J., Moradi M., Ismail A.S. Mobile wireless sensor networks overview. *International Journal of Computer Communications and Networks*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 17–22.
 16. Thomas S., Mathew T. Intelligent path discovery for a mobile sink in wireless sensor network. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 143, pp. 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.430>
 17. Luo J., Hubaux J.P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. *Proc. of the IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2005, pp. 1735–1746. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2005.1498454>
 18. Khabarov S.P., Shilkina M.L. Geometric approach to the solution of the Dubins car problem in the formation of program trajectories. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 653–663. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-653-663>
 19. Berdyshev Yu.I. On a time-optimal control for the generalized Dubins car. *Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics Ural Branch of RAS*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 26–35. (in Russian)
 20. Bellman R., Glicksberg I., Gross O. On the “bang-bang” control problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1956, vol. 14, no. 1, pp. 11–18. <https://doi.org/10.1090/qam/78516>
 21. Shaw J.A. Radiometry and the Friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 2013, vol. 81, no. 1, pp. 33–37. <https://doi.org/10.1119/1.4755780>

Авторы


Астахова Татьяна Николаевна — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой, доцент, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, 606340, Российская Федерация, sc57208314975, <https://orcid.org/0000-0002-7032-0697>, ctn_af@mail.ru


Колбанёв Михаил Олегович — доктор технических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, 191023, Российская Федерация; профессор, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, 606340, Российская Федерация,


Authors

Tatiana N. Astakhova — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Head of Department, Associate Professor, State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University”, Knyaginino, 606340, Russian Federation, sc57208314975, <https://orcid.org/0000-0002-7032-0697>, ctn_af@mail.ru

Mikhail O. Kolbanev — D.Sc., Full Professor, State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University”, Knyaginino, 606340, Russian Federation; Professor, St. Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, 191023, Russian Federation, sc6506189057, <https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>, mokolbanev@mail.ru

 6506189057, <https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>, mokolbanev@mail.ru

Советов Борис Яковлевич — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАО, академик РАО, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, Российская Федерация,  6506071670, <https://orcid.org/0000-0003-3116-8810>, bysovetov@mail.ru

Boris Ya. Sovetov — D.Sc., Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, Academician of the Russian Academy of Education, Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 197022, Saint Petersburg, Russian Federation,  6506071670, <https://orcid.org/0000-0003-3116-8810>, bysovetov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.05.2025
Одобрена после рецензирования 15.12.2025
Принята к печати 25.01.2026

Received 07.05.2025
Approved after reviewing 15.12.2025
Accepted 25.01.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»