

Разработка алгоритма информационного взаимодействия в сенсорных системах и модель оценки вычислительной сложности

Д. А. Маслова

Аннотация – В статье основное внимание уделено разработке алгоритма информационного взаимодействия в сенсорных системах. В контексте данной работы под сенсорной системой будем понимать совокупность информационно, энергетически и физически связанных сенсорных устройств. Объектом исследования являются беспроводные сенсорные системы. Предмет исследования – алгоритмы информационного взаимодействия и модель вычислительной сложности. Цель работы состоит в разработке алгоритма информационного взаимодействия и модели оценки вычислительной сложности в сенсорных системах. В ходе анализа наиболее распространенных алгоритмов поиска кратчайшего пути выявлено, что данные алгоритмы предполагают большое количество вычислений, уменьшить их можно сужая область поиска. Предлагаемый алгоритм основан на следствии теоремы косинусов, доказанном в предыдущих работах. Для сравнения количества вычислений, была проведена оценка и сравнение вычислительной сложности алгоритма с уже существующими алгоритмами поиска кратчайшего пути.

Ключевые слова – информационное взаимодействие, энергопотребление, беспроводная сенсорная система, кратчайший путь, вычислительная сложность.

I. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия произошел технологический прорыв в области используемых технологий связи. Это привело к повышению спроса на новые технологии. Так, исследования по развитию и внедрению Internet of Thing получили широкое распространение не только за рубежом, но и в России. Одной из важнейших технологий IoT являются беспроводные сенсорные сети, представляющие собой сложную систему взаимодействующих между собой устройств. Как правило, беспроводная сенсорная система (БСС) состоит из большого количества сенсорных устройств, размещаемых в зоне сбора и анализа физических параметров окружающей среды, которая так же называется сенсорным полем. Сенсорные устройства представляют собой элементы системы, взаимодействующие между собой при помощи беспроводных технологий связи. В процессе

информационного взаимодействия эти устройства выполняют роль ретрансляторов, собирают различную информацию об окружающей среде, такие как температура, влажность, степень загрязнения, отслеживают движение и состояние животных, и многое другое, после чего отправляют собранные данные на базовую станцию (координатор).

Тенденция внедрения сенсорных систем повлекла за собой увеличение количества сенсорных устройств на единицу площади, образуя плотные и сверхплотные сенсорные системы. Физическое расстояние между ближайшими устройствами в таких системах минимальное, а объем собираемой и передаваемой информации на базовую станцию значительно увеличивается. Зачастую такие беспроводные сенсорные системы имеют ряд проблем, большинство из которых связаны с ограничением энергетических мощностей, ресурсов и высокой стоимостью комплектующих. Для развития потенциала таких систем важно решить проблему их энергопотребления. Перспективным трендом является создание долговечных автономных устройств с минимальным потреблением энергии. Кроме этого, в концепции «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» энергетическая эффективность и энергосбережение определены в качестве одних из главных направлений экономической политики страны, как ее важнейшие стратегические ориентиры.

Для решения вышеперечисленных проблем разрабатываются алгоритмы и протоколы маршрутизации. Однако тестирование и проведение реальных экспериментов является весьма дорогостоящим и трудозатратным. Моделирование является актуальным и эффективным инструментом, позволяющим протестировать разработанный алгоритм и оценить влияние сразу нескольких факторов на работу беспроводной сенсорной системы, не неся при этом больших расходов. В связи с этим актуальной становится проблема разработки алгоритмов информационного взаимодействия в сенсорных системах.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определенную специфику на требования к алгоритмам информационного взаимодействия в сенсорных системах накладывает область применения таких систем. Так, например, в медицине при передаче данных важна надежность и точность данных, в то время как в приложениях, связанных с финансовыми операциями в первую очередь, должна обеспечиваться безопасность.

В связи с популяризацией сенсорных систем, растет и количество областей, применяющих такие системы. Наиболее популярными и перспективными являются: мониторинг окружающей среды, сельскохозяйственная отрасль, промышленность, домашняя автоматизация (умный дом), умные города, здравоохранение и мониторинг транспортных средств.

Независимо от области применения, одинаковым ко всем приложениям сенсорным систем остается требование к высокой производительности и точности сбора данных. Такие требования позволяют обеспечить новое поколение сверхплотных систем.

Сверхплотные системы обеспечивают плотность сети до 100 устройств на кубический метр, что обеспечит максимальную точность собираемых данных [1]. В условиях таких систем, устройства находятся в максимальной близости друг с другом, что накладывает ряд ограничений при выборе маршрута передачи данных на базовую станцию. В связи с использованием в сверхплотных системах высокого диапазона частот допускается использование большого количества ресурсов мощности, но при этом ограничена дальность распространения сигнала. Поэтому, на больших расстояниях передача сигнала напрямую исключена и в маршруте передачи необходимо использовать транзитные устройства, которые определяются алгоритмом информационного взаимодействия.

При проектировании алгоритмов информационного взаимодействия сенсорных систем, необходимо принимать во внимание эффективность работы и стремиться к увеличению долговечности системы. Ключевую роль в обеспечении эффективного функционирования системы играют вероятностно-энергетические характеристики.

В работе [2] для оценки качества информационного взаимодействия процесса передачи сообщений используются вероятностно-временные характеристики – среднее время доставки сообщений и вероятность своевременной доставки сообщения. Данные характеристики являются случайными и зависят от множества параметров, например, интенсивности трафика, количества транзитных устройств на маршруте передачи и др.

Вероятностно-энергетические характеристики в свою очередь, влияют на потребление энергии и способ передачи данных сенсорными устройствами [3]. В качестве таких характеристик рассматриваются: вероятность доставки данных, вероятность потери данных, пропускная способность, задержка, энергоэффективность и т.д.

Вышеперечисленные характеристики зависят от множества факторов, таких как физическое расстояние между устройствами, мощность на передающей и принимающей антеннах, количество устройств и их расположение (закон распределения устройств), алгоритм выбора маршрута информационного взаимодействия в сенсорной системе.

Алгоритмы выбора маршрута являются частью более общего понятия – протокол маршрутизации, который помимо маршрута подразумевает собой выбор параметров антенны, таких как уровень сигнала, направленность, диапазон частот, защиту данных и др. Но выбор рационального маршрута, является ключевым параметром процесса информационного взаимодействия в беспроводной сенсорной системе.

В момент определения маршрута, систему будем рассматривать как граф, вершинами которого являются сенсорные устройства расположенные в пространстве по определенному закону распределения случайной величины, а ребрами – расстояние передачи сигнала.

Выделяется три наиболее эффективных алгоритма поиска кратчайшего маршрута во взвешенном ориентированном графе, такие как, алгоритм Дейкстры, алгоритм A^* и симплекс метод. Рассмотрим подробнее каждый из них:

1. Алгоритм Дейкстры позволяет решить задачу поиска кратчайшего пути от одной вершины ко всем остальным во взвешенном ориентированном графе без отрицательного веса ребер [4]. В процессе работы алгоритма формируется два массива, в первом собирается информация о посещенных вершинах, во втором – кратчайшее расстояние до вершин. Сам процесс определения маршрута формируется путем полного перебора, начиная с начальной вершины и её ближайших соседей, каждая посещенная вершина заносится в первый массив, затем находится расстояние до всех соседних вершин графа, если найденное расстояние минимальное, то оно заносится во второй массив, после чего переходит к следующей вершине и так, пока каждая вершина графа не будет отмечена как посещенная. При каждом посещении вершины графа вес этой вершины обновляется для отражения расстояния до начальной точки маршрута [5].

2. Алгоритм A^* является расширением алгоритма Дейкстры, позволяет найти кратчайший маршрут от начальной до конечной вершины графа. Главное отличие алгоритма A^* в том, что при поиске кратчайшего маршрута учитывается не только текущий вес (расстояние) от начальной точки до текущей, но и применяется эвристическая (приблизительная) оценка этого же расстояния. Аналогично алгоритму Дейкстры, посещаются ближайшие вершины графа, начиная с начальной вершины, но выбирается следующей в маршруте вершина не с минимальным расстоянием, а вершина, до которой получается наименьшая сумма расстояний от начальной точки до текущей и эвристической оценки, и продолжается это до тех пор, пока алгоритм не достигнет конечной вершины [6]. Данный алгоритм более эффективен для графов с большим количеством вершин и, когда известно приблизительное расстояние до конечной вершины.

3. Симплекс метод используется для решения задач линейного программирования. Граф представляется как матрица смежности, строки и

столбцы обозначают вершины графа, элементами матрицы являются ребра (расстояние) между соответствующими вершинами, если ребро отсутствует, элемент считается равным нулю. Начальной вершиной считается вершина, до которой необходимо найти маршрут. Для поиска маршрута определяются базисные переменные и составляется система линейных уравнений, после решения которой обновляется матрица смежности и сами переменные; все вершины, добавленные в маршрут, являются базисными, а веса им присваиваются, исходя из решения системы уравнений. Алгоритм повторяется пока все вершины не будут посещены [7]. Данный метод не эффективен для графов с большим количеством вершин из-за большого количества переменных и вычислений.

Все рассмотренные алгоритмы предполагают большое количество вычислений и перебор вершин графа. Уменьшить количество вычислений можно, если рассматривать не все вершины графа, а отдельные подмножества.

Подмножества внутри сенсорной системы позволяют сузить область поиска транзитных устройств, данная область может ограничиваться, например, направленностью антенны или особенностями топологии сети. Область ограничения может представлять собой круг или сектор, радиус которого является радиусом передачи сигнала. В данной работе критерий выбора маршрута будем рассматривать на примере сектора.

Внутри сектора предлагается выбирать одно транзитное устройство, критерием определения которого является следствие теоремы косинусов, доказанное ранее в работе [8]. Согласно данному критерию, транзитным назначается устройство, у которого угол, между образованными прямыми, соединяющими транзитное устройство с источником и с оконечным устройством (базовой станцией), больше 90° и имеет максимальное значение в сравнение со всем другими возможными углами образованными гипотетическими прямыми.

В случае, если сенсорная система разворачивается на большой площади, устройство источник не сможет связаться напрямую с базовой станцией, в связи с ограничением дальности связи, возникает необходимость использования нескольких транзитных устройств на маршруте передачи данных на базовую станцию. В данном случае, целесообразно будет применить данный критерий к нескольким секторам, определяя тем самым алгоритм выбора маршрута передачи данных от устройства источника к базовой станции.

Пусть существует S_{θ_k} – сектор, имеющий центральный угол θ_k , образуемый расстояниями связи узла-источника в направлении к базовой станции и направленностью антенны, где $k = \overline{1, s}$, s – количество секторов.

Тогда, узел внутри сектора обозначим как $x_{S_{\theta_k}}^i \in S_{\theta_k}$, $i = \overline{1, n}$, n – общее количество всех точек на

сенсорном поле. Верхний индекс i показывает номер точки, нижний индекс принадлежности к сектору S_{θ_k} .

Оптимальным маршрутом, назначается тот, который затрачивает наименьшее количество суммарно затраченной мощности на передачу сообщения.

Описание алгоритма поиска оптимального маршрута:

Шаг 0. Определить начальные показатели: расположение устройства-источника, расположение базовой станции, угол сектора θ_k , радиус R_k .

Шаг 1. Установить прямую связь между узлом-источником и базовой станцией.

Шаг 2. Создать сектор S_{θ_k} с углом θ_k и радиусом R_k , найти точки, попадающие внутрь сектора.

Шаг 3. Назначить опорной точкой – точку, которая находится ближе к пересечению прямой и дуги сектора – $x_k^0 \in S_{\theta_k} \cap S_{\theta_{k+1}}$, $k = \overline{1, s}$, где s – общее число секторов. Найти расстояние от узла-источника (принимая её как начальную опорную) до конечной в заданном секторе опорной точки:

$$r_k = \text{dist}(x_k^0 - x_{k+1}^0) \quad (3)$$

Шаг 4. Оценить мощность передачи от узла-источника к опорной $P(r_k)$ по формуле (1).

Шаг 5. Для нахождения угла при передаче через переприем внутри сектора, необходимо найти расстояние от узла-источника до всех точек, входящих в сектор S_{θ_k} :

$$r_{S_{\theta_k}}^l = \text{dist}(x_k^0 - x_{S_{\theta_k}}^l), l = \overline{m_{k-1}, m_k - 1}. \quad (4)$$

Затем расстояние от каждой точки до опорной точки:

$$r_{S_{\theta_k}}^q = \text{dist}(x_{S_{\theta_k}}^q - x_{k+1}^0), q = \overline{m_{k-1} - 1, m_k - 1}. \quad (5)$$

Примечание: если точки внутри сектора не обнаружены, то минимальным значением затрачиваемой мощности считается мощность передачи напрямую к опорной точке $P(r_k)$, дальнейший алгоритм продолжается с шага 8.

Шаг 5. Вычислить угол, образованный линиями передачи через точки внутри сектора к опорной точке, найти максимальное значение угла

$$\alpha_{\theta_k} = \max_k \left\{ \arccos \left(\frac{\left((r_{S_{\theta_k}}^l)^2 + (r_{S_{\theta_k}}^q)^2 - (r_k)^2 \right)}{2 * r_{S_{\theta_k}}^l * r_{S_{\theta_k}}^q} \right) \right\}. \quad (6)$$

Шаг 6. Вычислить значение мощности при передаче через эту точку:

$$P(\alpha_{\theta_k}) = \frac{16P_{\text{пп}}\pi^2(\alpha^k)^2(\lambda^k)^2 \left(R_k e^{-\frac{R_k^2 \alpha^k \lambda}{2}} \right)^2 f^2}{C_{\text{пер}} C_{\text{пп}} v^2}. \quad (7)$$

Шаг 7. Сравнить вычисленные мощности и выбрать наименьшую:

$$P_k = \min_k \{ P(\alpha_{\theta_k}), P(r_k) \}. \quad (8)$$

Шаг 8. Повторять шаги 2-7 для всех опорных точек до достижения сообщением базовой станции.

Значение затраченной мощности на весь маршрут найдем по формуле:

$$P = \sum_{k=1}^s P_k. \quad (9)$$

Помимо мощности, затрачиваемой на передачу данных, на энергопотребление устройства так же влияет количество проведенных вычислений. Для этого необходимо оценить вычислительную сложность алгоритма.

Для определения вычислительной сложности предлагаемого алгоритма необходимо учесть каждый шаг алгоритма. Определение начальных параметров примем как константное значение времени $O(1)$, так же, как и установка прямой связи с базовой станцией. Обозначим количество точек в пространстве как n , тогда создание сектора и поиск точек, попадающих внутрь сектора $O(n)$. Для определения опорных точек необходимо перебрать все сектора s для нахождения точек пересечения – $O(s)$. Расчет расстояния от устройства-источника до всех точек в секторе и от каждой точки до опорной, зависит от количества точек m , попадающих в сектор, повторяя итерацию для каждого сектора – $O(nm)$. Вычисление угла и мощности тоже является константной сложностью, не зависящей от размера входных данных – $O(1)$. Но сравнение k -значений мощностей займет $O(k)$. При условии, что количество опорных точек p , к вычислительной сложности добавляется $O(p)$. В целом при учете всех операций алгоритма вычислительная сложность может быть принимать следующий вид:

$$O(n + s + p * m + k).$$

Предположим, что необходимо найти кратчайший маршрут в сенсорной системе, состоящей из 1000 устройств, допустим, что число секторов $s = 10$, число опорных точек $p=10$, число устройств в секторе $m=10$, при сравнении мощности передачи сигнала напрямую или через ретранслятор с наибольшим углом число мощностей для сравнения $k = 2$, тогда:

$$O(1000 + 10 + 10 * 10 + 2) = O(1112) \sim O(10^2).$$

При таких же условиях, алгоритм Дейкстры с использованием матрицы смежности имеет вычислительную сложность $O(n^2)$ [9], следовательно при 1000 вершинах, вычислительная сложность составляет:

$$O(1000^2) = O(10^6).$$

Сложность симплекс метода, с учетом ограничений для задач линейного программирования может считаться как $O(nm)$, где переменные отвечают за размерность матрицы [10]. Предположим, что она равно количеству устройств на поле, подставив значения получим:

$$O(1000 * 1000) = O(10^6).$$

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были рассмотрены наиболее распространенные алгоритмы поиска кратчайшего пути. Выявлено, что за счет сокращения области поиска, можно уменьшить количество вычислений.

Предложен алгоритм информационного взаимодействия в сенсорной системе, основанный на следствии теоремы косинусов, который позволяет снизить энергопотребление за счет ограничения области поиска кратчайшего пути и критерия выбора ретранслятора.

Проведена оценка вычислительной сложности алгоритма. Доказано, что при условии получения приближенных показателей предлагаемого алгоритма, к уже доказанным оптимальным алгоритмам поиска кратчайшего пути, при вычислении суммарной мощности, на маршрут передачи данных от устройства источника к базовой станции, предлагаемый алгоритм может считаться наиболее энергетически выгодным за счет сокращения вычислений.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Маколкина М. А., Муханна А. С. А., Выборнова А. И., Дунайцев Р. А., Захаров М. В., Горбачева Л. С., Чан З. Т., Марочкина А. В. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 3. С. 1–12. DOI 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12.
- [2] Романова А. А. Имитационная модель информационного взаимодействия в интернете вещей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 8. С. 69–76. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-8-69-76.
- [3] Верзун, Н. А. Показатели эффективности процесса информационного взаимодействия в сети интернета вещей / Н. А. Верзун, М. О. Колбанев, А. А. Романова // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2022. – № 3. – С. 5-14. – doi:10.32603/2071-8985-2022-15-3-5-14.
- [4] Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2011. 1296 с.
- [5] Кравченко К. И., Минеева Т. А. Алгоритм Дейкстры для определения кратчайшего маршрута следования //Тенденции развития науки и образования. – 2021. – №. 72-1. – С. 61-65. doi: 10.18411/lj-04-2021-12.
- [6] Манакова, В. А. Анализ методов решения задачи коммивояжера при помощи алгоритмов Дейкстры и A* / В. А. Манакова, А. С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 3(37). – с. 136 – 142. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-136-142.
- [7] Кудашов В. Н., Селина Е. Г. Основы линейного программирования //СПб, РФ: Университет ИТМО. – 2020.
- [8] Кирилова Д.А. Критерий выбора оптимального маршрута передачи сообщения в беспроводных сенсорных сетях / Т. Н. Астахова, Д. А. Кирилова, М. О. Колбанев [и др.] // Телекоммуникации. – 2020. – № 7. – С. 6-12.
- [9] Иса, М. Г. Классификация алгоритмов оптимизации маршрута / М. Г. Иса, Р. Ж. Сатыбалдиева // Интернаука. – 2020. – № 21-1(150). – С. 26-28.
- [10] Соколинский, Л. Б. Исследование масштабируемости апекс-метода для решения сверхбольших задач линейного программирования на кластерных вычислительных системах / Л. Б. Соколинский, И. М. Соколинская // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции, Москва, 21–22 сентября 2020 года / Под. редакцией Вл.В. Воеводина. – Москва: ООО "МАКС Пресс", 2020.

Статья получена 20 августа 2024

Маслова Дарья Александровна, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. (e-mail: dasha.kiri-lova.96@bk.ru).

Development of an algorithm for information interaction in sensor systems and a model for estimating computational complexity

D. Maslova

Abstract – This article focuses on the development of an algorithm for information interaction in sensor systems. In the context of this paper, a sensor system will be understood as a set of informationally, energetically and physically connected sensor devices. The object of the study is wireless sensor systems. The subject of the study is information interaction algorithms and computational complexity model. The purpose of the work is to develop an algorithm of information interaction and a model for evaluating computational complexity in sensor systems. In the course of analyzing the most common algorithms for finding the shortest path, it was found that these algorithms involve a large number of calculations, to reduce them can be narrowing the search area. The proposed algorithm is based on the corollary of the cosine theorem proved in previous works. To compare the number of calculations, the computational complexity of the algorithm was evaluated and compared with existing algorithms for shortest path search.

Keywords – information communication, power consumption, wireless sensor system, shortest path, computational complexity.

REFERENCES

- [1] A. E. Kucheryavy, A. I. Paramonov, M. A. Makolkina, A. Muthanna. S. A., Vybornova A. I., Dunaytsev R. A., Zakharov M. V., Gorbacheva L. S., Chan Z. T., Marochkina A. V. Three-dimensional multilayer heterogeneous superdense networks // Information technologies and telecommunications. 2022. Vol. 10. No. 3. C. 1-12. DOI 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12.
- [2] Romanova A. A. A. Simulation model of information interaction in the Internet of Things // Izv. SPbGETU "LETI". 2022. T. 15, № 8. C. 69-76. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-8-69-76.
- [3] Verzun, N. A. Efficiency indicators of the information interaction process in the Internet of Things / N. A. Verzun, M. O. Kolbanev, A. A. Romanova // Izvestiya SPbGETU LETI. - 2022. - № 3. - C. 5-14. – doi:10.32603/2071-8985-2022-15-3-5-14.
- [4] Kormen T., Leiserson C., Rivest R., Stein K. Algorithms: construction and analysis. 2nd ed. Moscow: Williams Publishing House, 2011. 1296 c.
- [5] Kravchenko K. I., Mineeva T. A. Dijkstra's algorithm for determining the shortest route // Trends in science and education. - 2021. - №. 72-1. - C. 61-65. doi: 10.18411/lj-04-2021-12.
- [6] Manakova, V. A. Analysis of methods for solving the traveling salesman problem using Dijkstra and A* algorithms / V. A. Manakova, A. S. Kostin // System analysis and logistics. - 2023. - № 3(37). - c. 136 - 142. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-136-142.
- [7] V. N. Kudashov, E. Selina. G. Fundamentals of linear programming //SPb, RF: ITMO University. - 2020.
- [8] Kirilova, D. A. Criterion for selecting the optimal message transmission route in wireless sensor networks / T. N. Astakhova, D. A. Kirilova, M. O. Kolbanev [et al.] // Telecommunications. - 2020. - № 7. - C. 6-12.
- [9] Isa, M. G. Classification of route optimization algorithms / M. G. Isa, R. J. Satybaldieva // Internauka. - 2020. - № 21-1(150). - C. 26-28.
- [10] Sokolinsky, L. B. Investigation of scalability of the apex method for solving super large linear programming problems on cluster computing systems / L. B. Sokolinsky, I. M. Sokolinskaya // Supercomputer Days in Russia: Proceedings of the International Conference, Moscow, September 21-22, 2020 / Edited by V. V. Voevodin. - Moscow: MAKS Press LLC, 2020