

УДК 004.0577.4

DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.003

## Моделирование алгоритмов позиционирования в сенсорной сети на основе DV-HOP

Виноградов Геннадий Павлович<sup>1,2</sup>, Шаронов Дмитрий Александрович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет, Россия, Тверь, [wgp272ng@mail.ru](mailto:wgp272ng@mail.ru),

<sup>2</sup>НИИ Центрпрограммсистем, Россия, Тверь

**Аннотация.** Предметом исследования являются алгоритмы локализации узлов в реагирующих беспроводных сенсорных сетях (RWSN), которые имеют большую перспективу применения во многих областях. **Актуальность работы** связана с тем, что задача локализации узлов является одной из ключевых в RWSN. Алгоритмы локализации должны быть энергоэффективными, не требовать дополнительных аппаратных решений и больших вычислительных ресурсов, использовать встроенный протокол маршрутизации, быть защищенными от помех. Перспективными в этом плане являются варианты алгоритмов локализации перехода по вектору расстояния (DV-Hop), однако они характеризуются достаточно большой ошибкой при оценке местоположения сенсорных узлов. **Целью работы** является анализ точности существующих алгоритмов DV-Hop при определении местоположения неизвестных узлов внутри области размещения с использованием инфраструктуры сети, технологии радиообмена между узлами для оценки степени их пригодности при решении задач локального позиционирования после выполнения этапа выброса узлов на местности. **Метод.** В процессе анализа использован метод последовательного усложнения моделируемых алгоритмов локализации сенсорных узлов в RWSN с учетом типов узлов и режимов их работы. **Основные результаты.** Исследования показали, что наиболее эффективным является алгоритм, в котором минимальный переход корректируется путем использования технологии определения расстояния на основе мощности принимаемого сигнала (RSSI), а среднее расстояние перехода корректируется средневзвешенным значением ошибки расстояния перехода и ошибки оцененного расстояния. Имитационный эксперимент показал значительное улучшение характеристик классического алгоритма DV-Hop при определении местоположения и уменьшение до приемлемых величин ошибки определения местоположения узлов. При проведении имитационного эксперимента в среде NetToro использован алгоритм CKN. Результаты эксперимента показывают, что улучшенный алгоритм уменьшает ошибку определения местоположения и обладает более высокой точностью определения местоположения. **Практическая значимость.** Обоснована целесообразность применения полученных результатов при проектировании RWSN.

**Ключевые слова:** беспроводные сети, моделирование, позиционирование, алгоритмы локализации

**Цитирование:** Виноградов Г.П. Моделирование алгоритмов позиционирования в сенсорной сети на основе DV-HOP / Г.П. Виноградов, Д.А. Шаронов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 2(30). – С. 25-35. – DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.003.

**Введение.** Реагирующая беспроводная сенсорная сеть (RWSN) – это сеть пространственно-распределенных сенсорных узлов, используемая для контроля физических параметров некоторой области и выработки воздействия на нее для получения желаемых состояний [1]. Широкое применение RWSN в различных областях стало возможным благодаря результатам, полученным в процессе развития микроэлектроники, теории управления сенсорными сетями и узлами [2]. В реагирующих сенсорных сетях данные, фиксируемые сенсорными узлами, используются для определения факта и места некоторого события для последующего прогнозирования его развития, расчета величины воздействия на среду. Такая сеть способна определять факт проникновения в защищаемую область, число и тип объектов проникновения, скорость, направление их движения и т.п. Достижение максимального эффекта от воздействия на объекты проникновения предполагает знание местоположения узлов сети с требуемой точностью [2]. В ряде приложений важной характеристикой является помехозащищенность. Это делает актуальной задачу локализации сенсорных узлов с минимальной погрешностью с выполнением требований по защищенности.

Сенсорные узлы в RWSN можно разделить на два типа: якорные (опорные) и узлы, позиция которых определяется расчетным путем с помощью алгоритмов локализации (неизвестные узлы). Местоположения опорных узлов определяются глобальной системой позиционирования (*GPS*, *ГЛОНАСС*) или привязкой к реперам ручным способом.

Алгоритмы локализации для RWSN можно разделить на две категории: основанные на измерении дальности и не требующие измерения дальности (англ. range-based and range-free). Первые используют результат измерения расстояния между узлами датчиков для оценки координат неизвестных узлов, алгоритмы второй категории не требуют таких измерений.

К наиболее распространенным методам первой категории относятся методы, определяющие время прибытия сигнала (ToA) [3], оценивающие разницу во времени прибытия сигнала (TDoA) [4], угол прибытия (AoA) [5] и измеряющие уровень мощности принятого сигнала (RSSI) [6]. При использовании алгоритма ToA [3] каждый узел сети посылает сообщение соседним узлам и использует время передачи сигнала для оценки расстояний до соседних узлов. В TDoA [4] используются два сигнала с разными скоростями распространения радиоволн (обычно это радио и ультразвуковые сигналы). Сенсорный узел сначала посылает радиосигнал соседям, а затем, через фиксированный интервал времени посылает ультразвуковой сигнал с фиксированным шаблоном частоты [7]. Как только сосед получает радиосигнал, он записывает время получения радиосигнала и время получения ультразвука. Основываясь на двух зарегистрированных временах и фиксированном временном интервале, сенсорный узел вычисляет расстояние до этого соседа. ToA требует точной синхронизации времени между узлами датчиков. TDoA менее зависит от синхронизации времени, но методы ToA и TDoA сложно реализовать в радиочастотных IPSS, поскольку для достижения приемлемой точности необходимы очень точные таймеры. Кроме того, в условиях многолучевого распространения определение времени прибытия является точным только для очень большой полосы пропускания сигнала. По этой причине некоторые системы используют сверхширокополосную технологию для точной оценки ToA.

AoA (angle of arrival) основан на определении направления на источник сигнала. Для этого используются базовые станции (БС), снабженные несколькими антеннами или антенной с фазированной антенной решеткой. Получив направление на источник сигнала от БС, можно определить место его нахождения. Точность этого метода зависит от направленности антенны, многолучевого отражения и замирания сигнала. Это создает две основные проблемы: узлам требуется направленная антенна с формированием луча, а между передатчиком и приемником необходим путь распространения прямой видимости. Недостатки – сложность антенны, вычислительная сложность определения углов в AoA достаточно велика.

Метод RSSI основан на эффекте падения уровня мощности радиосигнала с увеличением расстояния распространения [6]. Так как уровень мощности сигнала отправителя известен, принимающий сенсорный узел, имея средства измерения уровня мощности принятого сигнала, может вычислить расстояние до отправителя. Помехи и замирание в канале связи являются основным источником ошибок в RSSI [8].

Наиболее часто используемые алгоритмы локализации, *не требующие измерения расстояния* – это Centroid [9], вектор расстояние-переход (DV-Hop) [10], Amorphous [11] и аппроксимационный тест точечной триангуляции (PIT) [12].

В Centroid [9] каждый неизвестный узел вычисляет координаты как центр тяжести координат опорных узлов в пределах радиуса передачи (TR). В DV-Hop [10] через широковещательную передачу пакетов определяется минимальное количество переходов (HC) между сенсорными узлами и якорями. Неизвестный узел оценивает расстояние до узла привязки как произведение минимального HC от этого узла до узла привязки на значение среднего расстояния

за переход ( $dph$ ). Затем, используя расчетные расстояния до узлов привязки, каждый неизвестный узел рассчитывает свое местоположение. Метод Amorphous [11] схож с DV-Hop. Различие состоит в том, что в нем используются более сложные способы вычисления минимального НС между узлами датчиков, а также оценки  $dph$ . APIT [12] сегментирует область RWSN на возможно большое количество триад, используя различные наборы опорных узлов. Неизвестный узел идентифицирует возможные триады, которые окружают его местоположение, с помощью сообщений от узлов привязки и получает область перекрытия этих треугольников. После этого он оценивает свое местоположение как центр тяжести этой перекрывающейся области.

Точность локализации APIT и Centroid в значительной степени зависит от плотности расположения сенсорных узлов в RWSN и радиуса связи сенсорных узлов. Алгоритм Amorphous требует оценки средней плотности сенсорных узлов RWSN. DV-Hop не использует уровень мощности сигнала, простой в реализации алгоритм, более устойчив к шуму и замиранию, не требует дополнительной аппаратной поддержки, но он не всегда может обеспечить требуемую точность локализации [12].

Наиболее известны две схемы повышения эффективности DV-Hop – это DV-Hop с коррекцией (CDV-Hop) [13] и улучшенный DV-Hop (IDV-Hop) [14].

Целью работы является анализ существующих алгоритмов определения местоположения неизвестных узлов внутри области размещения с использованием инфраструктуры беспроводных сенсорных сетей (БСС), технологии радиообмена между узлами для оценки степени их пригодности для решения задач локального позиционирования после выполнения этапа выброса узлов на местности.

**2. Краткое описание базового алгоритма DV-Hop и его модификаций.** Принцип алгоритма позиционирования DV-Hop аналогичен классическому алгоритму маршрутизации и выполняется за три этапа [12]:

1. На этапе 1 каждый узел привязки в  $A$  широкоэвещательно передает сообщение в сеть (всем сенсорным узлам в  $S$ ), которое содержит информацию о местоположении узла привязки и параметр, указывающий количество переходов  $h$  с начальным значением 1. После получения информации от узла-маяка его соседний узел увеличивает значение перехода  $h$  на единицу и пересылает информацию с новым  $h$  следующему соседнему узлу. Каждый принимающий сенсорный узел ведет таблицу переходов (НТ). Запись в НТ соответствует узлу привязки и создается при получении сообщения  $h$  от каждого узла привязки. Запись содержит идентификацию и координаты узла привязки, а также ссылку на этот узел. При получении сообщения  $h$  от узла привязки (маяка)  $\alpha \in A$  сенсорным узлом  $\varepsilon \in S$  либо обновляется запись для  $\alpha$ , либо создается новая запись для  $\alpha$ . Если НС в сообщении меньше, чем НС в записи для  $\alpha$ , то  $\varepsilon$  обновляет запись, используя НС из сообщения. Затем он передает свое сообщение с  $h$ , увеличивая его на 1; в противном случае  $\varepsilon$  отбрасывает сообщение. Процесс завершается, когда  $\varepsilon$  не получает никаких сообщений  $h$  по истечении определенного периода времени. В конце этого процесса  $\varepsilon$  сохраняет минимальные  $h$  для всех узлов привязки, которых он может достичь [10]. Таким образом, каждый принимающий узел определяет минимальное значение перехода до каждого узла привязки.

2. Вычисление и трансляция  $dph$  каждого узла привязки. На этапе 2 каждый узел привязки  $\alpha \in A$  вычисляет  $dph_\alpha$ , как показано в [10]:

$$dph_\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{N_\alpha} d(\alpha, \beta_j)}{\sum_{j=1}^{N_\alpha} h_j} \quad (1)$$

где  $A_\alpha \subseteq A$  – множество опорных узлов в НТ для  $\alpha$ ,  $N_\alpha = |A_\alpha|$ ,  $\beta_j \in A_\alpha$  для  $1 \leq j \leq N_\alpha$ , а  $h_j$  – минимальный  $h$  от  $\alpha$  до  $\beta_j$ .

Каждый узел привязки широковещательно передает сообщение с  $dph$  всем неизвестным узлам в  $U$ . При получении неизвестным узлом  $\mu \in U$  сообщения с  $dph$  он сохраняет наименьшую величину  $dph$  и передает сообщение соседним узлам. В противном случае он отбрасывает сообщение. Этот процесс заканчивается, когда  $\mu$  не получает какие-либо сообщения  $dph$  по истечении определенного промежутка времени. В конце этого процесса  $\mu$  сохраняет минимальное значение  $dph$ , хотя бы от одного узла привязки [10].

3. Для каждого неизвестного узла  $\mu \in U$  известно  $A_\mu \subseteq A$  множество опорных узлов в НТ, тогда для всех  $N_\mu = |A_\mu|$  и  $v_i \in A_\mu$   $1 \leq i \leq N_\mu$  вычисляется  $\lambda_i$  – расстояние от  $\mu$  до  $v_i$ , [10]

$$\lambda_i = h_i \times dph_\mu \quad (2)$$

где  $h_i$  – минимальное значение  $h$  от  $\mu$  до  $v_i$ .

Расстояние между неизвестным узлом и узлом привязки  $v_i$  с координатами  $(x_i; y_i)$  можно вычислить в соответствии с [10]:

$$\lambda_i = d(\mu, v_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \quad (3)$$

Если ввести обозначения, как показано в [10]

$$B = -2 \times \begin{bmatrix} x_1 - x_{N_\mu} & y_1 - y_{N_\mu} \\ x_2 - x_{N_\mu} & y_2 - y_{N_\mu} \\ x_3 - x_{N_\mu} & y_3 - y_{N_\mu} \\ \dots & \dots \\ x_{N_\mu-1} - x_{N_\mu} & y_{N_\mu-1} - y_{N_\mu} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_1^2 + x_{N_\mu}^2 - y_1^2 + y_{N_\mu}^2 \\ \lambda_2^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_2^2 + x_{N_\mu}^2 - y_2^2 + y_{N_\mu}^2 \\ \lambda_3^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_3^2 + x_{N_\mu}^2 - y_3^2 + y_{N_\mu}^2 \\ \dots & \dots \\ \lambda_{N_\mu-1}^2 - \lambda_{N_\mu}^2 - x_{N_\mu-1}^2 + x_{N_\mu}^2 - y_{N_\mu-1}^2 + y_{N_\mu}^2 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

то для вычисления  $v$  можно использовать метод наименьших квадратов

$$v = (BB^T)^{-1}B^T P$$

Алгоритм CDV-Нор также выполняется в три этапа. Этапы 1 и 2 CDV-Нор такие же, как у DV-Нор, но этап 3 CDV-Нор отличается от этапа 3 DV-Нор. Дело в том, что пути между узлами датчиков не являются прямыми линиями, поэтому исходный метод DV-Нор содержит систематическую ошибку в (1). Для повышения точности оценки определения расстояния, в CDV-Нор введена коррекция вида

$$\lambda_i = h_i \times dph_\mu + c_i = h_i \times dph_\mu + \frac{h_i \times (TR - dph_\mu)}{TR} \quad (4)$$

где  $c_i$  – это корректирующий коэффициент [13].

Алгоритм IDV-Нор также состоит из трех этапов. Этап 1 IDV-Нор такой же, как этап 1 DV-Нор, но этапы 2 и 3 IDV-Нор отличаются от этапов 2 и 3 DV-Нор. На этапе 2 после вычисления  $dph$  с помощью (2) каждый узел привязки передает значение  $dph$  в сообщении всем неизвестным узлам в  $U$ . Каждый неизвестный узел  $\mu \in U$  сохраняет  $dph$  от разных узлов привязки. Этот процесс завершается, когда  $\mu$  по истечении определенного периода времени не поступает никаких сообщений  $dph$ . В конце этого процесса  $\mu$  сохраняет  $dph$  из всех узлов привязки в  $A_\mu$ . На этапе 3 каждый неизвестный узел  $\mu \in U$  вычисляет среднее значение  $dph$   $dph_\mu$  как показано в [14]

$$dph_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{i < N_{\mu}} dph_{v_i}}{N_{\mu}} \quad (5)$$

где  $dph_{v_i}$  - это оцениваемое расстояние от  $\lambda_i$  до  $v_i$ , с использованием (2).

Из (4) имеем  $\lambda_i^2 = x_i^2 + y_i^2 - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2$ , откуда следует  $\lambda_i^2 - r_i = -2x_i x - 2y_i y + r$  [14], где  $r_i = x_i^2 + y_i^2$ , и  $r = x^2 + y^2$ .

Если ввести вектор  $z = [x, y, r]^T$ , то его оценка также может быть получена методом наименьших квадратов путем минимизации  $\|Pz - q\|$   $z = (P^T P)^{-1} P^T q$  [14].

Основными факторами, влияющими на оценку местоположения неизвестных узлов этими алгоритмами, являются: плотность узлов привязки (AND), количество сенсорных узлов (NS), TR радиус радиовидимости сенсорных узлов и размер окрестности (NS) узлов датчиков. Целью работы являлось исследование влияния этих факторов на эффективность работы описанных трех вариантов алгоритмов.

Моделируемая сенсорная сеть представлена  $N$  узлами, которые случайным образом равномерно распределены на двумерном сенсорном поле площадью  $S$  и узлами привязки – базовыми станциями (БС). Каждая БС содержит 4-е дополнительных узла (однотипных мотам сенсорного поля), которые являются выносными антеннами для БС.

Формальная модель RWSN – это граф  $G = (S; E)$ , где  $S$  – множество сенсорных узлов в двумерном евклидовом пространстве, а  $E$  описывает смежность между сенсорными узлами.  $S = A \cup U$  и  $A \cap U = \emptyset$ , где  $A$  - множество узлов привязки, а  $U$  - множество неизвестных узлов.  $M = |S|, N = |A|$  и  $L = |U|$ , так что  $M = N + L$ . Если все сенсорные узлы в  $S$  идентичны, любые два сенсорных узла являются соседями тогда и только тогда, когда евклидово расстояние между ними составляет не более  $t$ . То есть для  $\delta, \varepsilon \in S, \{\delta, \varepsilon\} \in E \Leftrightarrow d(\delta, \varepsilon) \leq t$ , где  $d(\delta, \varepsilon)$  - евклидово расстояние между  $\delta$  и  $\varepsilon$ .

**3. Анализ ошибок алгоритма локализации DV-Hop.** Использование протокола маршрутизации и технических средств при развертывании RWSN во всех трех вариантов алгоритма DV-Hop для оценки неизвестным узлом своих координат является источником ошибок в их рассчитанных значениях. Во-первых, это связано со случайным и неравномерным размещением узлов на контролируемой площади. Значит, расстояние между неизвестными узлами и узлом маяка в зоне его радиовидимости не будет одинаковым, но расчетные расстояния будут одинаковыми, так как в этом случае значения перехода между всеми неизвестными узлами и узлом маяка в зоне его радиовидимости принимаются равными 1. Для исключения этой ошибки необходимо определять значение перехода в этой ситуации в соответствии с фактическим расстоянием между узлами. Во-вторых, при вычислении расстояния между неизвестным узлом и узлом маяка используется среднее расстояние перехода до ближайшего узла маяка, но фактически линия перехода от неизвестного узла до узлов маяка представляет собой не прямую, а некоторую ломаную линию. Поэтому использование среднего расстояния перехода приводит к ошибкам при вычислении расстояния между неизвестными узлами и узлами маяка. В-третьих, использование оценочных значений в методе наименьших квадратов приводит к возрастанию погрешности при вычислении положения узла. Ее снижение возможно за счет использования коррекции наименьшего значения перехода и среднего расстояния перехода.

Пусть  $d_0$  – расстояние от узла маяка, где потерей мощности сигнала можно пренебречь ( $d_0 = 1\text{м}$ ),  $Pr(x)$  – мощность сигнала, соответствующая расстоянию  $x$ , известно значение RSSI приемного узла, находящегося на расстоянии 1 м от передающего узла  $Pr(d_0)$  – мощность, соответствующая расстоянию  $d_0$ ,  $k$  – коэффициент потерь мощности сигнала. Введем случайную

ошибку  $X_\sigma$  со средним значением равным 0 и стандартным отклонением  $\sigma$ . Обозначим мощность сигнала  $u$ , принимаемого узлом через  $Pr(d)$ , тогда значение RSSI в точке  $x$  от передающего узла может быть получено из уравнения:

$$Pr(x) = A - 10k_0 \lg(d) + X_\sigma, \quad (6)$$

где  $A = Pr(d_0)$ .

В пределах радиуса  $TR$  радиовидимости узла маяка определим индивидуальную величину  $h_1$  первого перехода для каждого неизвестного узла в соответствии с интенсивностью ослабления сигнала RSSI. Это позволит уменьшить влияние переходов на ошибку позиционирования и повысить точность позиционирования. Введем число  $m > 1$  и разобьем первый переход на  $m$  уровней. Это позволяет для каждого подуровня использовать метод RSSI следующим образом

$$A - 10klg\left(\frac{i-1}{m}R\right) + X_\sigma \leq RSSI(x) \leq A - 10klg\left(\frac{i}{m}R\right) + X_\sigma, \quad (7)$$

где  $i \leq m$  – положительное целое число,  $x$  – расстояние узла до маяка.

Выражение (7) позволяет назначать узлам, находящимся в зоне радио видимости маяка, различные индивидуальные значения весов первого перехода по правилу:

$$h_1^i = \begin{cases} \frac{1}{m}, & A - 10klg\left(\frac{1}{m}R\right) + X_\sigma < RSSI(x) \leq RSSI(d_0) \\ \frac{i}{m}, & A - 10klg\left(\frac{i}{m}R\right) + X_\sigma < RSSI(x) \leq A - 10klg\left(\frac{i-1}{m}R\right) + X_\sigma \\ 1, & A - 10klg(R) + X_\sigma < RSSI(x) \leq A - 10klg\left(\frac{m-1}{m}R\right) + X_\sigma \end{cases} \quad (8)$$

где  $i = \overline{1, m}$ .

Полученное в (8) значение  $h_1^i, i = \overline{1, m}$  первого перехода может быть использовано для коррекции значений других переходов. Для этого введем формулу расчета значения веса переходов между узлами  $H_j$  как отношение расстояния  $d_j$   $j$ -го перехода, измеренного с помощью технологии RSSI, к расстоянию первого перехода  $d_1$

$$H_j = \frac{d_j}{d_1} = 10^{\frac{Pr(d_0) - Pr(d_j)}{10k_0}}, j > 0 \quad (9)$$

Путем умножения  $H_j$  на значение  $h_1$  первого перехода можно получить значение  $j$ -го перехода этого перехода, и скорректировать расстояние между сенсорными узлами сети следующим образом. Пусть количество узлов в области мониторинга маяка равно  $n$ , тогда, используя скорректированное значение перехода среднее расстояние перехода каждого узла маяка  $HopSize_i$  сети вычисляется по формуле классического Hop-DV [1]

$$\Delta_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HopSize_i.$$

Определим для каждого  $i$ -го узла оценку отклонения среднего расстояния перехода узла маяка от  $\Delta_{avg}$

$$\Delta_{i1} = (HopSize_i - \Delta_{avg})^2.$$

Так как фактические координаты опорных узлов известны, то можно определить отклонение фактического от расчетного расстояния между узлами маяков  $i$  и  $j$  сети

$$\Delta_{i2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i \neq j} \left( \frac{d_{ij} - \hat{d}_{ij}}{hop_{ij}} \right) \quad (10)$$

Здесь  $d_{ij}$  – фактическое расстояние между узлом маяка  $i$  и  $j$ .  $\hat{d}_{ij} = HopSize_i \times hop_{ij}$  – оцениваемое расстояние между узлами маяка  $i$  и  $j$ ;  $hop_{ij}$  – минимальный переход между узлами маяка  $i$  и  $j$ .

Введем оценку  $\varphi_i = \frac{1}{1 + 1/(D_{i1} + D_{i2})}$ , выполняющую роль весового коэффициента для рассчитанного среднего расстояния перехода между узлами маяка  $i$  и  $j$  по формуле

$Avg\_hops\_size_{ij} = \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}}{1+1/(D_{i1}+D_{i2})}$ . Тогда взвешенное значение среднего расстояния перехода каждого узла маяка сети определяется

$$\chi = \frac{\sum_j^{n-1}(\varphi_j \cdot Avg\_hops\_size_{ij})}{\sum_j^{n-1} \varphi_j} \quad (11)$$

Если  $(x_k, y_k)$  координаты неизвестного узла и  $(x_i, y_i)$  узла маяка, то расстояние перехода от неизвестного узла  $k$  до узла маяка  $i$  будет определяться выражением

$$d_{ki} = h_{ki} \times \chi \quad (12)$$

где  $k$  и  $i$  – переменные.

**4. Реализация алгоритмов DV-Hop.** Моделирование описанных алгоритмов локализации выполнено средствами NetToro [17, 18], который предоставляет расширяемую интегрированную платформу моделирования и визуализации. Его достоинством является возможность интегрироваться с реальными испытательными стендами RWSN. Это симулятор RWSN с открытым исходным кодом, ориентированный на визуализацию связей между сенсорными узлами и данных зондирования и топологии RWSN. В NetToro пользователи могут задавать и изменять поведение сенсорных узлов при обработке событий. Расширяемость NetToro позволяет моделировать различные алгоритмы локализации для RWSN.

Архитектура NetToro содержит компонент Node NetToro, моделирующий сенсорные узлы. Сенсорные узлы реализуют различную функциональность. NetToro поддерживает интерфейс VNode, который определяет несколько методов, моделирующих общее поведение сенсорного узла. Пользователи могут настраивать свои собственные классы сенсорных узлов, реализуя интерфейс VNode. Класс Wireless Sensor Network моделирует RWSN, содержащий ноль или более сенсорных узлов. NetToro позволяет реализовать два класса сенсорных узлов: узел-маяк и класс Unknown Node (неизвестных узлов) для алгоритмов DV-Hop. Эти два класса являются производными от класса DVHopNode. Класс DVHopNode расширяет класс SensorNode и реализует интерфейс VNode. В дополнение к функциональным возможностям класса DVHopNode, класс anchorNode вычисляет и транслирует DPHs. Класс UnknownNode обрабатывает сообщения DPH и оценивает координаты.

Алгоритм RWSN представлен классом, реализующим интерфейс Algorithm. Компонент Algorithm содержит алгоритмы маршрутизации, кластеризации, планирования и управления вплоть до алгоритмов локализации [19]. Каждый алгоритм имеет несколько функциональных возможностей. Функциональность алгоритма представлена классом, реализующим интерфейс AlgorFunc.

Алгоритмы DV-Hop реализованы в классах Algor DV HOP, Algor C-DVHOP и Algor IDVHOP соответственно. Функциональные возможности CDV-Hop и IDV-Hop реализованы в классах CDVHOP\_Run CDVHop и IDVHOP\_Run\_IDVHop соответственно. Поскольку CDV-Hop, и IDV-Hop имеют некоторые общие черты с DV-Hop, классы CDVHOP\_Run\_CDVHop и IDVHOP\_Run\_IDVHop являются производными от класса DVHOP\_Run\_DVHop.

При моделировании алгоритмов маршрутизации необходимо выводить последовательно из спящего режима только те узлы, которые являются соседями узла привязки. Одним из эффективных алгоритмов планирования режима работа/сон узлов сети является распределенный алгоритм подключения к узлу K-Neighbor (CKN). Он позволяет эффективно уменьшить количество бодрствующих узлов в сети во время работы, гарантируя при этом, что вся сеть находится в подключенном состоянии и выполняется требуемое время передачи пакетов. В CKN бодрствующий сенсорный узел означает, что этот сенсорный узел участвует в RWSN, тогда как спящий сенсорный узел не участвует в RWSN. Индекс  $k$  в CKN обозначает подмножество бодрствующих сенсорных узлов  $C \subseteq S$ . Выбранное подмножество бодрствующих сенсорных узлов  $C$  удовлетворяет следующим условиям:

1. Каждый сенсорный узел  $\sigma \in S$  имеет, по меньшей мере,  $\min(k, D_{e_\sigma})$  бодрствующих соседей из  $C$ , где  $D_{e_\sigma}$  - количество соседей  $\sigma$  из  $S$ .
2. Сенсорные узлы в  $C$  подключены, если сенсорные узлы в  $S$  подключены.
3. Ни одно подмножество  $S$ , удовлетворяющее двум вышеуказанным условиям, не имеет меньшего числа сенсорных узлов, чем  $C$ .

Алгоритм SKN обеспечивает субоптимальное решение для выбора сенсорных узлов, удовлетворяющих условиям 1-3 [15, 16]. NS выбранных сенсорных узлов – это  $k$ . В SKN, таким образом, время разделено на дискретные эпохи, поэтому подмножества бодрствующих сенсорных узлов, выбранные SKN, различаются по эпохам. В каждую эпоху SKN выполняет следующий алгоритм:

Для каждого узла-сенсора  $\sigma \in S$

- 1: Выбрать ранг для  $\sigma$ , как равномерно распределенное случайное число между 0 и 1.
- 2: Широковещательно сообщить ранг и принимать ранги на данный момент от соседей  $N_{e_\sigma}$ . Пусть  $R_\sigma$  – множество этих рангов.
- 3: Широковещательно транслировать  $R_\sigma$  и получают  $R_\rho$  от других  $\rho \in N_{e_\sigma}$ .
- 4: Если  $|N_{e_\sigma} < k|$  или  $|N_{e_\rho} < k|$  для  $\rho \in N_{e_\sigma}$ ,  $\sigma$  остается бодрствующим. Останов.
- 5: Вычислить  $C_\sigma = \{\rho | \rho \in N_{e_\sigma} \wedge \text{rank}_\rho < \text{rank}_\sigma\}$ .
- 6:  $\sigma$  переходит в спящий режим, если выполняются оба следующих условия; в противном случае  $\sigma$  остается бодрствующим.

Любые два сенсорных узла в  $C_\sigma$  соединены либо напрямую, либо через сенсорные узлы, удовлетворяющие обоим следующим условиям:

- в пределах окрестности 2-х переходов от  $\sigma$ ;
- с рангами меньше  $\text{rank}_\sigma$ .

Любой сенсорный узел в  $N_{e_\sigma}$  имеет по крайней мере  $k$  соседей из  $C_\sigma$ .

- 7: Останов.

**5. Результаты.** Количественная оценка точности алгоритмов локализации проводилась путем имитационного эксперимента. Размер RWSN задавался 500 м×500 м. Ошибка локализации неизвестного узла  $i$  определялась выражением

$$\text{error}_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

где  $1 \leq i \leq L$ ,  $\Delta x_i$  и  $\Delta y_i$  – ошибки в определении координатах узла  $i$ .

Оценка ошибка локализации сети  $U$  в целом вычислялась по формуле

$$\overline{\text{error}} = \frac{\sum_{i=1}^L \text{error}_i}{L}.$$

Для исследования влияния на точность позиционирования *плотности размещения узлов-маяков AND и радиуса радиовидимости TR* их значения задавались как в [15] 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 20% и 30%, и 45 м, 60 м, 75 м, 90 м, 105 м, 120 м, 135 м и 150 м соответственно, SNN задавалась равным 400. Эксперименты показали, что для всех четырех алгоритмов при фиксированном TR увеличение AND показывает тенденцию снижения средней ошибки локализации. При всех значениях AND алгоритмы показали наименьшую ошибку локализации при значении TR  $\in [50-60]$  м. При изменении значения AND последний алгоритм показал меньшую ошибку локализации, чем традиционный DV-Нор в среднем в два раза.

При исследовании влияния на точность позиционирования *количества сенсорных узлов SNN и радиуса связи TP* значение AND задавалось равным 10%, величина SNN изменялась как 300, 400, 500, 600, 700 и 800, значение радиуса всех сенсорных узлов изменялось 30 м, 45 м, 60 м, 75 м, 90 м, 105 м, 120 м, 135 м и 150 м [15]. Эксперимент повторялся 100 раз, и вычис-

лялась средняя ошибка локализации по 100 реализациям для каждой пары SNN и TR. Наилучшие TR для всех алгоритмов составляют при SNN равным 300, 400, 500, 600, 700 и 800 75 м, 60 м, 60 м, 45 м, 45 м и 45 м соответственно, что соответствует результатам работы [15].

При исследовании влияния NS на точность позиционирования алгоритмов DV-Hop использовался CKN. При запуске CKN с различными значениями  $k$  генерируются сети с значениями NS изменяющимися как 1, 3, 5, 7 и  $\infty$ . Выполнялись несколько эпох CKN с одинаковым значением  $k$  для каждого RWSN. AND изменялось, как и в первом эксперименте. Средняя ошибка локализации вычислялась для 50 эпох и 20 RWSN для каждой пары AND и NS. Эксперимент показал, что увеличение NS от 1 до 5 уменьшает ошибку локализации. Одинаковые значения точности наблюдались, когда NS принимало значения 5, 7 и  $\infty$ . Эксперименты показали, что при увеличении NS с 1 до 3 происходило уменьшение ошибки локализации более, чем на 50%. При увеличении NS с 3 до 5 среднее количество бодрствующих сенсорных узлов увеличивается на 35%. Снижение ошибки локализации всех алгоритмов составило от 6% до 12%. При этом время работы всех алгоритмов значительно увеличилось, что соответствует увеличению вычислительных энергетических затрат.

**Заключение.** Результаты исследования влияния на эффективность локализации трех вариантов алгоритмов DV-Hop основных параметров топологии беспроводной сети показали определенное преимущество описанного подхода. При исследовании влияния плотности узлов привязки (AND) и радиуса передачи (TR) сенсорных узлов на точность локализации узлов тремя алгоритмами лучшие результаты показал IDV-Hop. При заданном TR все три алгоритма показали, что увеличение AND уменьшило ошибку локализации и при значении TR = 60 м при заданном AND все три алгоритма показали наименьшую ошибку локализации.

Исследование влияния AND и размера окрестности (NS) на точность трех алгоритмов с алгоритмом связанной  $k$ -окрестности (CKN) показало, что при заданных AND увеличение NS уменьшало ошибку локализации, при этом NS изменялся в диапазоне от 1 до 5. Ошибка локализации была одинаковой при NS, равной 5, 7 и  $\infty$ . Для всех трех алгоритмов 3 был лучшим NS в эксперименте, учитывая, как ошибку локализации, так и время выполнения. Для всех трех алгоритмов, при увеличении NS с 3 до 5, среднее количество бодрствующих сенсорных узлов увеличивалось на 34%, снижение ошибки локализации находилось в диапазоне от 6% до 10%. В соответствии с вычислительной сложностью оценки координат расчетное время выполнения всех трех алгоритмов значительно возросло.

#### Список источников

1. Виноградов Г.П. Алгоритмы управления процессами в реагирующих сенсорных сетях для защиты объектов / Г.П. Виноградов // Программные продукты и системы, 2022. – № 2. – С. 229-239.
2. Виноградов Г.П. Интеллектуальные информационные технологии в соединениях вооруженных сил / Г.П. Виноградов // Двадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-22 (Москва, 21-23 декабря 2022г.). –Т.2. – М.: Издательство МЭИ, 2022. – С. 110-121.
3. Rovňáková J., Kocur, D. TOA Estimation and data association for through-wall tracking of moving targets. J Wireless Com Network 2010, 420767 (2010), DOI:10.1155/2010/420767.
4. Li Cong, Weihua Zhuang. Hybrid TDOA/AOA Mobile user location for wideband CDMA cellular systems. IEEE Transactions on wireless communications, July 2002, v. 1, no. 3, pp. 439-447.
5. Torrieri D.J. Statistical theory of passive location systems. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1984, vol. 20, no. 2, pp. 183-198,
6. Pierlot V., Droogenbroeck M. Van, Urbin-Choffray M. A new three object triangulation algorithm based on the power center of three circles. Research and education in robotics (EUROBOT), 2011, vol. 161, pp. 248-262.
7. Djuric P.M. and Kay S.M. Parameter estimation of chirp signals. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, vol. 38, no. 12, pp. 2118-2126,
8. Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080.

9. Blumenthal J., Grossmann R., Golatowski F., Timmermann D. Weighted centroid localization in Zigbee-based sensor networks. In Intelligent Signal Processing, 2007 WISP 2007 IEEE International Symposium on, 2008, pp. 1-6.
10. Cheikhrouhou O., Bhatti G.M., Alroobaea R. A hybrid DV-hop algorithm using RSSI for localization in large-scale wireless sensor networks, *Sensors*, 2018, 18, 1469, DOI: 10.3390/s18051469.
11. Lin-zhe Zhao, Xian-bin Wen, Dan Li. Amorphous localization algorithm based on BP artificial neural network. *International journal of distributed sensor networks*, 2015, 657241, DOI:10.1155/2015/657241.
12. Li M., Jiang F., Pei C. Improvement of triangle centroid localization algorithm based on PIT criterion (ITCL-PIT) for WSNs. *J Wireless Com Network*, 2022, 19 (2022), DOI:10.1186/s13638-022-02109-3.
13. Yu W., Li H. An improved DV-Hop localization method in wireless sensor networks. *International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 2012, pp. 199-202.
14. Chen H., Sezaki K., Deng P., Cheung H. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2008, pp. 1557-1561.
15. Dalong Xue Research of localization algorithm for wireless sensor network based on DV-Hop. *Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 218(2019), DOI:10.1186/s13638-019-1539-5.
16. Han G., Xu H., Duong T. Q., Jiang J., Hara T. Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey. *Telecommunication Systems*, 2013, v. 52, no. 4, pp. 2419-2436.
17. Lei Shu, Chun Wu, Yan Zhang, Jiming Chen, Lei Wang, Manfred Hauswirth. NetTopo: Beyond Simulator and Visualizer for Wireless Sensor Networks, available at: [https://www.researchgate.net/publication/234777348\\_Net-Topo\\_Beyond\\_Simulator\\_and\\_Visualizer\\_for\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/234777348_Net-Topo_Beyond_Simulator_and_Visualizer_for_Wireless_Sensor_Networks).
18. Mantovani A., Pagiario A. NetTopo. Available at: <https://sites.google.com/site/leishuderi/nettopo>.
19. Yinghui Meng, Yuewen Chen, Qiuwen Zhang, Weiwei Zhang MNCE: Multi-hop node localization algorithm for wireless sensor network based on error correction. *Journal on wireless communications and networking*, 2019, DOI:10.3390/info11050269.

**Виноградов Геннадий Павлович.** Д.т.н., профессор Тверского государственного технического университета, заведующий лабораторией НИИ Центрпрограммсистем, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, член Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы. AuthorID: 149735, SPIN: 7288-4042, ORCID 0000-0001-5757-2753, Scopus AutorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru.

**Шаронов Дмитрий Александрович.** Заведующий отделом НИИ Центрпрограммсистем. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы, SharonovDA@cps.tver.ru.

UDC 004.0577.4

DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.003

## Modeling of positioning algorithms in a sensor network based on DV-HOP

Gennady P. Vinogradov<sup>1,2</sup>, Dmitry A. Sharonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tver State Technical University, Russia, Tver, wgp272ng@mail.ru

<sup>2</sup> Research Institute of Centerprogram Systems, Russia, Tver

**Abstract.** The subject of the study is the algorithms of node localization in responsive wireless sensor networks (RWSN), which have a great prospect of application in many areas. The relevance of the work is due to the fact that the task of localization of nodes is one of the key ones in RWSN. Localization algorithms should be energy efficient, do not require additional hardware solutions and large computing resources, use a built-in routing protocol, noise-proof. Promising in this regard are variants of algorithms for localization of the transition along the distance vector (DV-Hop). However, they are characterized by a rather large error in estimating the location of sensor nodes. The purpose of the work is to analyze the accuracy of existing DV-Hop algorithms in determining the location of unknown nodes within the placement area using network infrastructure, radio exchange technology between nodes to assess their suitability for solving local positioning problems after performing the node ejection stage on the ground. Method. In the process of analysis, the method of sequential complication of the simulated algorithms for localization of sensor nodes in the RWSN was used, taking into account the types of nodes and their operating modes. The main results. Studies have shown that the most effective algorithm is one in which the minimum transition is corrected by using distance determination technology based on the received signal power (RSSI), and the average transition distance is corrected by the weighted average of the transition distance error and the estimated distance error. The simulation experiment showed a significant improvement in the characteristics of the classical DV-Hop algorithm in determining the location and a reduction to acceptable values of the error in determining the location of nodes. When conducting a simulation experiment in the Netlogo

environment, the KNN algorithm was used. The results of the experiment show that the improved algorithm reduces the location error and has a higher accuracy of location determination. Practical significance. The expediency of applying the results obtained in the design of RVSN is substantiated.

**Keywords:** wireless networks, modeling, positioning, localization algorithms

## References

1. Vinogradov G.P. Algoritmy upravleniya processami v reagiruyushchih sensoryh setyah dlya zashchity ob"ektov [Process control algorithms in responsive sensory networks in object protection problems]. Software & systems, 2022, no. 2, pp. 229-239.
2. Vinogradov G.P. Intellektual'nye informacionnye tekhnologii v soedineniyah vooruzhennyh sil [Intelligent information technologies in the armed forces units] / XX Russian conference on artificial intelligence (RCAI-2022) (Moscow, 21-23 December 2022). M. Publisher MPEI, 2022, pp. 110-121.
3. Rovňáková J., Kocur, D. TOA Estimation and data association for through-wall tracking of moving targets. J Wireless Com Network 2010, 420767 (2010), DOI:10.1155/2010/420767.
4. Li Cong, Weihua Zhuang. Hybrid TDOA/AOA Mobile user location for wideband CDMA cellular systems. IEEE Transactions on wireless communications, July 2002, v. 1, no. 3, pp. 439-447.
5. Torrieri D.J. Statistical theory of passive location systems. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1984, vol. 20, no. 2, pp. 183-198.
6. Pierlot V., Droogenbroeck M. Van, Urbin-Choffray M. A new three-object triangulation algorithm based on the power center of three circles. Research and education in robotics (EUROBOT), 2011, vol. 161, pp. 248-262.
7. Djuric P. M. and Kay S. M. Parameter estimation of chirp signals. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, vol. 38, no. 12, pp. 2118-2126.
8. Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080.
9. Blumenthal J., Grossmann R., Golatowski F., Timmermann D. Weighted centroid localization in Zigbee-based sensor networks. In Intelligent Signal Processing, 2007 WISP 2007 IEEE International Symposium on, 2008, pp. 1-6.
10. Cheikhrouhou O., Bhatti G.M., Alrobaea R. A hybrid DV-hop algorithm using RSSI for localization in large-scale wireless sensor networks, Sensors, 2018, 18, 1469, DOI: 10.3390/s18051469.
11. Lin-zhe Zhao, Xian-bin Wen, Dan Li. Amorphous localization algorithm based on BP artificial neural network. International journal of distributed sensor networks, 2015, 657241, DOI:10.1155/2015/657241.
12. Li M., Jiang F., Pei C. Improvement of triangle centroid localization algorithm based on PIT criterion (ITCL-PIT) for WSNs. J Wireless Com Network, 2022, 19 (2022), DOI:10.1186/s13638-022-02109-3.
13. Yu W., Li H. An improved DV-Hop localization method in wireless sensor networks. International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2012, pp. 199-202.
14. Chen H., Sezaki K., Deng P., Cheung H. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008, pp. 1557-1561.
15. Dalong Xue Research of localization algorithm for wireless sensor network based on DV-Hop. Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 218(2019), DOI:10.1186/s13638-019-1539-5.
16. Han G., Xu H., Duong T. Q., Jiang J., Hara T. Localization algorithms of wireless sensor networks: A survey. Telecommunication Systems, 2013, v. 52, no. 4, pp. 2419-2436.
17. Lei Shu, Chun Wu, Yan Zhang, Jiming Chen, Lei Wang, Manfred Hauswirth. NetTopo: Beyond Simulator and Visualizer for Wireless Sensor Networks, available at: [https://www.researchgate.net/publication/234777348\\_Net-Topo\\_Beyond\\_Simulator\\_and\\_Visualizer\\_for\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/234777348_Net-Topo_Beyond_Simulator_and_Visualizer_for_Wireless_Sensor_Networks).
18. Mantovani A., Pagiario A. NetTopo. Available at: <https://sites.google.com/site/leishuderi/nettopo>.
19. Yinghui Meng, Yüewen Chen, Qiuwen Zhang, Weiwei Zhang MNCE: Multi-hop node localization algorithm for wireless sensor network based on error correction. Journal on wireless communications and networking, 2019, DOI:10.3390/info11050269.

**Vinogradov Gennady Pavlovich.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Tver State Technical University, Head of the laboratory of the Research Institute of Centerprogram Systems, wgp272ng@mail.ru, member of the Russian Association of Artificial Intelligence, member of the Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems. AutorhID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID 0000-0001-5757-2753, Scopus AutorID:23976986500.

**Sharonov Dmitry Aleksandrovich.** Head of the department of the Research Institute of Centerprogram Systems. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems, SharonovDA@cps.tver.ru.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 22.05.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 04/13/2023; approved after reviewing 05/22/2023; accepted for publication 06/16/2023.