

УДК: 004.942

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.С. Скубак, М.П. Филяев (Санкт-Петербург)

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой распределённые, самоорганизующиеся, устойчивые к отказам отдельных элементов сети, состоящие из миниатюрных электронных устройств (узлов). Применяемые при этом технологии, таким образом, позволяют создавать автоматизированные системы для сбора и передачи данных, которые достаточно длительное время могут функционировать в автономном режиме. Такие сети могут функционировать как на ограниченных участках, так и на удалённых территориях большого размера, это достигается благодаря гибкости сенсорных сетей и возможности их адаптации к различным условиям местности.

При создании БСС с большим количеством узлов особенно важное значение имеет продолжительность автономной работы. В настоящее время для увеличения продолжительности жизненного цикла БСС применяются различные подходы, разрабатываются специальные алгоритмы их функционирования и различные протоколы, однако реализация их на практике не всегда дает положительный эффект именно для автономных БСС, расположенных на значительных территориях.

Осубую актуальность данный проблемный вопрос приобретает при применении БСС в военной сфере, где они могут эффективно использоваться как:

- система для наблюдения за зонами военных действий;
- инструмент для контроля территорий, периметров охраняемых объектов, а также при организации гуманитарных коридоров;
- система для разведки и обнаружения передвижения живой силы и военной техники противника;
- инструмент для выявления радиационных, химических и биологических угроз;
- инструмент для передачи данных на недоступных участках и т.д. [2, 3, 4].

Очевидно, что выбор состава, структуры БСС и рационального варианта организации взаимодействия между её узлами для достижения требуемых целевых показателей эффективности является сложной многопараметрической задачей, решение которой обычными расчетными методами практически не реализуемо и обуславливает применение различных методов математического моделирования.

В общем случае топология БСС включает два основных типа узлов (показано на рисунке 1):

1. сенсоры (сенсорные узлы) – развёртываются в местах мониторинга для сбора данных изучаемого явления или процесса и их передачи на базовые станции;
2. базовая станция (шлюз или приёмник) – является интерфейсом, соединяющим сенсорную сеть с внешним миром; базовая станция несёт ответственность за получение данных от сенсоров, их обработку и доставку конечному пользователю.

Также в БСС может входить узел-накопитель информации, называемый стоком. В его обязанности входит сбор информации с рядовых узлов для последующей передачи на базовую станцию.

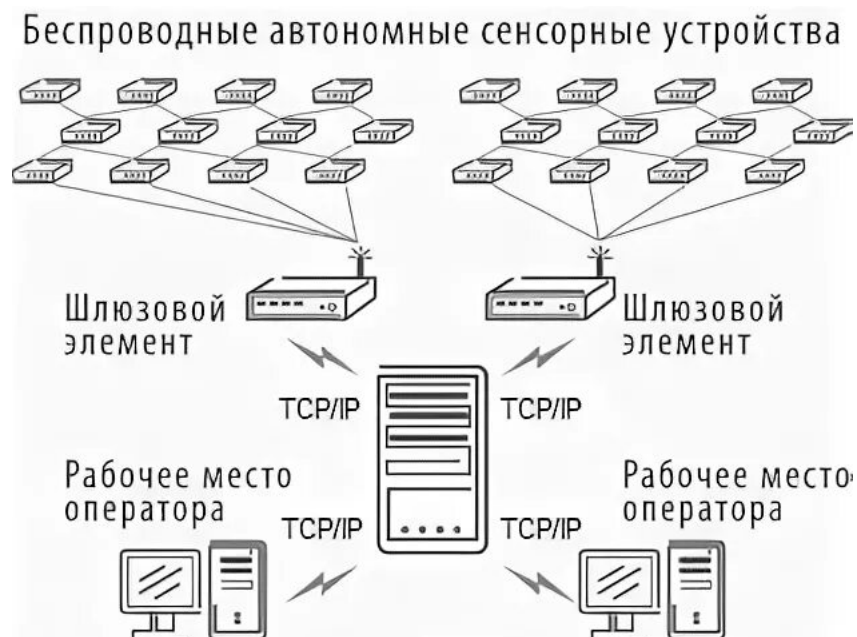


Рис.1 – Типовые узлы БСС

Узел БСС, как правило, состоит из следующих элементов:

- процессор (для первичной обработки собираемых данных);
- приемопередатчик (для приема/передачи информации между узлами сети);
- аккумулятор (для обеспечения автономной работы узла);
- сенсор/датчик (собирает определенный вид данных – факт появления объекта, направление его движения, скорость и т.д.);
- память (для временного хранения данных);
- аналого-цифровой преобразователь (для преобразования собираемых сенсором данных в цифровой формат).

Для построения математической модели функционирования узла БСС порядок его работы может быть описан следующим образом.

Необходимая информация из внешней среды собирается датчиком в аналоговом виде. Далее, сразу после поступления в датчик, информация передается в аналого-цифровой преобразователь, где данные приобретают цифровой формат, который можно использовать для их передачи и обработки. После этого информация поступает на процессор, где проводится ее предварительная обработка. В обработку может входить преобразование с целью уменьшить занимаемое место или удаление повторяющихся значений.

После этого, в зависимости от задачи конкретного сенсора, информация может сразу передаваться через приемопередатчик (например, в случае, когда датчик контролирует задымление или реагирует на движение) или оставаться на хранении в памяти, пока по заранее утвержденному расписанию не придет время передать её [1].

Дальнейшая передача данных зависит от организации беспроводной сенсорной сети. Наиболее эффективной организацией автономных БСС с большим количеством узлов является иерархическая, кластерная структура. Это, в том числе, обеспечивает длительное поддержание работоспособности такой сети, так как именно кластерная организация с иерархическим построением позволяет наиболее рационально расходовать энергию и качественно передавать данные на большие расстояния.

В результате развития современных технологий узлы БСС в настоящее время создаются в достаточно миниатюрной форме, что значительно расширяет возможности по их применению в различных областях.

Как было отмечено выше, важным аспектом работы сенсорных сетей является длительность жизненного цикла, так как в процессе их функционирования интенсивно расходуется заряд аккумуляторов узлов, что напрямую влияет на способность и эффективность выполнения БСС задач по предназначению.

Для исследования вопросов увеличения жизненного цикла БСС был выбран протокол DigiMesh, так как на его основе можно выстраивать иерархические последовательные связи между узлами. В сетях DigiMesh все узлы могут, как собирать информацию, так и передавать ее. Из этого следует главная особенность протокола, которая заключается в возможности построения сети ячеистой структуры, где каждое устройство может быть как координатором, так и дочерним устройством. Координатор в такой сети может управлять режимом работы устройств. Также, в протоколе реализована функция сна, благодаря которой устройства могут экономить большое количество энергии и, следовательно, дополнительно увеличивать жизненный цикл сети.

Подробное изучение особенностей работы протокола DigiMesh позволило выявить его слабые места, которые было необходимо устранить для возможного увеличения длительности жизненного цикла.

Задача по выбору головных узлов оказалось наиболее остро стоящей проблемой при работе с протоколом. Компания Digi не предлагает готовых решений по выбору головного узла в кластерах DigiMesh сети, поэтому решение этого вопроса является крайне важной задачей при проектировании автономных кластерных БСС.

В ходе проведения исследования было установлено, что метод подбора головного узла напрямую влияет на общее количество затрачиваемого заряда при передаче информации в сети, ее сборе и обработке. Некорректный подбор головного узла может привести к многократному сокращению времени работы сети [5].

Для решения рассматриваемой задачи была разработана аналитическая модель на основе графового метода, суть которой заключалась в том, что кластерная организация при большом количестве узлов сети требует оптимизации метрики, как для кластеров, так и для всей сети в целом. Под метрикой понимается параметр, выраженный числом переходов (так называемых «хопов» или «скачков»), которые влияют на выбор маршрута и на его протяженность в сети. Предпочтительным является тот маршрут, у которого меньшая метрика. Подробно методика подбора описана в работе [6].

Впоследствии для увеличения эффективности выбора координатора методика была доработана при помощи введения дополнительных параметров, позволяющих увеличить точность подбора координатора кластера. Среди параметров были определены остаточный уровень заряда  $O_k$ , расстояние до базовой станции  $S_k$ , приоритетность узла  $P_k$ .

При этом формула расчета веса узла в общем случае имеет следующий вид:

$$q_k = F(O_k, S_k, P_k) = O_k + S_k + P_k. \quad (1)$$

В представленном виде формула не отражает равноценности всех входящих в нее параметров, поскольку их единицы измерения не приведены друг к другу.

Для уравнивания значений параметров был применен метод математического нормирования. Также были учтены дополнительные факторы, влияющие на точность вычислений. Был получен следующий итоговый вид формулы расчета веса узла:

$$q_k = \left(1 - \left(\frac{S_k - \min S}{\max S - \min S}\right)\right) + \left(\frac{O_k - \min O}{\max O - \min O}\right) + (1 - P_k). \quad (2)$$

Данная формула позволяет рассчитывать значение веса узла графа на основании заранее определенных параметров, которые могут, так или иначе, влиять на подбор головного узла в кластере.

Для проверки эффективности разработанной методики было проведено тестирование на сгенерированных данных. При этом принята ситуация, где все вершины графа находятся на идентичном расстоянии друг от друга, и, следовательно, данный параметр не влияет на выбор координатора кластера.

Исследуемый кластер представлен на рисунке 2.

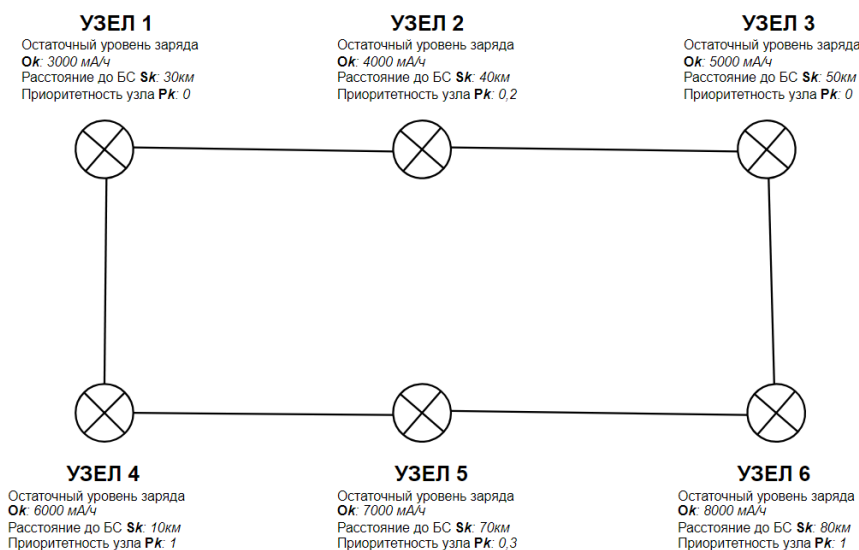


Рис.2 – Структура и параметры исследуемого кластера

$$q_1 = \left(1 - \frac{30 - 10}{80 - 10}\right) + \frac{3000 - 3000}{8000 - 3000} + (1 - 0) = 1,71$$

$$q_2 = \left(1 - \frac{40 - 10}{80 - 10}\right) + \frac{4000 - 3000}{8000 - 3000} + (1 - 0,2) = 1,57$$

$$q_3 = \left(1 - \frac{50 - 10}{80 - 10}\right) + \frac{5000 - 3000}{8000 - 3000} + (1 - 0) = 1,83$$

$$q_4 = \left(1 - \frac{10 - 10}{80 - 10}\right) + \frac{6000 - 3000}{8000 - 3000} + (1 - 1) = 1,6$$

$$q_5 = \left(1 - \frac{70 - 10}{80 - 10}\right) + \frac{7000 - 3000}{8000 - 3000} + (1 - 0,3) = 1,64$$

$$q_6 = \left(1 - \frac{80 - 10}{80 - 10}\right) + \frac{8000 - 3000}{8000 - 3000} + (1 - 1) = 1$$

Полученный в ходе вычислений результат свидетельствует о том, что координатором сети будет узел с вершиной  $q_3$ , а последним будет выбран (при сохранении значений) узел с вершиной  $q_6$ . Важно отметить, что выбор сделан только на основании значений вершин графа, расстояние между узлами принималось за идентичное. Выбор узла 6 оказался наименее рациональным, хотя остаточный уровень заряда был у него на максимальном уровне. Такой результат связан со значениями двух других параметров: приоритетности и расстояния. Анализируя эти данные, можно

сделать вывод, что узел играет одну из важнейших ролей в сети (собирает важные для исследования данные), а также находится на большом отдалении от базовой станции.

Узел 3 был выбран координатором сети ввиду средних значений его остаточного заряда и расстояния до базовой станции, а также отсутствия приоритетности. То есть, этот узел не является важным в сети, умеренно удален от базовой станции и имеет неплохой уровень остаточного заряда. Остальные узлы не имеют достаточного уровня заряда, заняты другими функциями или слишком далеко расположены от базовой станции.

Проведенный эксперимент позволяет сделать выводы о точности и достоверности результатов, получаемых при применении разработанной методики определения значения веса узла графа. Методика предполагает рассмотрение трех параметров в равнозначном сравнении, не учитывается дисбаланс, все три параметра считаются сбалансированными. Вместе с тем, при необходимости можно учитывать дополнительные параметры, поскольку в приведенной модели отражены все варианты преобразования параметров в сбалансированный вид. Методика позволяет дополнить графовую модель и сделать выбор головного узла более эффективным.

Таким образом, применение рассмотренного подхода к выбору головного узла БСС позволяет получить весьма грубую оценку, так как при этом вводятся жесткие ограничения, как по числу учитываемых параметров, так и по интервалам и динамике их изменения. Формирование полноценной, расположенной на заданной территории сенсорной сети для проведения натурального эксперимента, как правило, не является возможным, так как в каждом случае требует не только значительных финансовых затрат, но и наличия существенного временного резерва.

Решением в данной ситуации, очевидно, является проведение имитационных исследований проектируемых БСС, так как имитационное моделирование в полной мере позволяет учитывать не только значительное число внутренних факторов (техническое оснащение и устройство сенсоров), но и внешних (особенности территорий, расположения). Разработка и применение имитационных моделей БСС в процессе их проектирования позволит проводить комплексную оценку эффективности функционирования сети с учетом требований к точности получаемых результатов, которая, в свою очередь, достигается выбором достаточного уровня детализации моделируемого процесса [7].

Следует также отметить, что ранее уже проводились исследования продолжительности жизненного цикла БСС на основе имитационного моделирования их функционирования, что показало эффективность применения этого метода [8].

В настоящее время известно достаточно большое количество различных программных инструментальных сред имитационного моделирования, сравнительный анализ которых представлен в [9]. При этом, как показано в [10], одной из наиболее подходящих для решения рассматриваемых задач, является OMNET++.

Тем не менее, хотя изначально в программной среде OMNET++ присутствует большой набор встроенных функций (заранее предустановленные протоколы, возможность широкой масштабируемости, наличие графических инструментов для отслеживания изменений в реальном времени), отмечается малый выбор протоколов, сильно упрощенная окружающая среда и физический уровень [10]. Это доказывает необходимость, как поиска новых решений для проведения имитационного моделирования БСС с максимальным уровнем точности, так и целесообразность разработки и применения в Omnet++ новых, специализированных фреймворков.

Таким образом, применение БСС в военной сфере продолжает расширяться. При этом одним из актуальных проблемных вопросов является увеличение длительности жизненного цикла этих сетей ввиду особенностей их применения, обусловленных

высоким уровнем автономности. Описание функционирования БСС аналитическими зависимостями не обеспечивает требуемую точность оценки их параметров и практически не реализуемо при значительном количестве узлов сети. В этих условиях наиболее эффективным методом исследования БСС является имитационное моделирование, позволяющее проводить комплексную оценку их параметров при проектировании. В свою очередь, специфика построения и применения БСС обуславливает необходимость и актуальность поиска новых методических и технологических подходов к разработке их имитационных моделей.

### Литература

1. **Заяц А.М., Хабаров С.П.** Беспроводные сенсорные сети в лесном хозяйстве. Построение, применение и исследование: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2022. – 124 с.
2. **Панихидников С.А.** Применение беспроводных сенсорных сетей в военной связи / С.А. Панихидников, В.Г. Иванов, Р.Г. Бантюков // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 25–26 февраля 2014 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2014. С. 883-886.
3. **Белкин В.Д.** Возможности использования класса беспроводных сенсорных сетей для систем военного назначения // Гагаринские чтения - 2018: Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции, Москва-Ахтубинск-Байконур, 17–20 апреля 2018 года. Том 1. – Москва-Ахтубинск-Байконур: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. С. 303-304.
4. **Виноградов Г.П.** Информационные технологии на основе знаний в соединениях вооруженных сил // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1(231). С. 53-65. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-53-65.
5. **Скубак А.С.** Разработка приложения выбора координаторов в беспроводных сенсорных сетях кластерной архитектуры // Актуальные вопросы лесного хозяйства: материалы VI международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2022 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. – Санкт-Петербург: ООО «Реноме», 2022. С. 263-269.
6. **Заяц А.М.** Решение задачи выбора координаторов беспроводной сенсорной сети системы мониторинга лесных территорий / А.М. Заяц, А.С. Скубак // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сборник статей II Международной научно-технической конференции в рамках Международного молодежного форума по лесопромышленному образованию (Лес-Наука-Инновации-2022), Минск, 06–09 декабря 2022 года / Белорусский государственный технологический университет. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2022. С. 154-159.
7. **Филяев М.П.** Формализация логистического процесса на основе построения его диаграммы // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. 2020. № 2 (16). С. 81-91.
8. **Епихин А.О.** Анализ жизненного цикла беспроводной сенсорной сети с использованием имитационного моделирования / А.О. Епихин, Р.В. Киричек, А.Е. Кучерявый // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании:

- IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах, Санкт-Петербург, 03–04 марта 2015 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2015. С. 505-508.
9. **Филяев М.П., Чернышев С.А., Николаев П.А.** Сравнительный анализ инструментальных программных средств для разработки имитационных моделей логистических процессов // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. 2020. № 2 (16). С. 92-104.
10. **Махров С.С.** Использование систем моделирования беспроводных сенсорных сетей NS 2 И OMNET++ / С. С. Махров // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7, № 10. С. 67-69.