

МЕТОД СБОРА ИНФОРМАЦИИ МОНИТОРИНГА В БЕЗПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

Романюк А.В. Метод збору інформації моніторингу в бездротових сенсорних мережах з використанням безпілотних літальних апаратів. Проведено аналіз існуючих підходів щодо збору інформації в бездротових сенсорних мережах за допомогою безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Розглянуто основні завдання управління сенсорної мережею для організації збору інформації моніторингу з використанням БпЛА. Запропоновано новий метод збору інформації в бездротових сенсорних мережах і запропонований алгоритм його реалізації.

Романюк А.В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием беспилотных летательных аппаратов. Проведен анализ существующих подходов по сбору информации в беспроводных сенсорных сетях с помощью беспилотных летательных аппаратов (БпЛА). Рассмотрены основные задачи управления сенсорной сетью для организации сбора информации мониторинга с использованием БпЛА. Предложен новый метод сбора информации в беспроводных сенсорных сетях и алгоритм его реализации.

A. Romaniuk Method of the date collecting in wireless sensor networks with unmanned aerial vehicles. An analysis of existing approaches to the collection of information in wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles (UAV) are carried out. The main tasks of sensor network management for organization of monitoring information collection using UAV. A new method for collecting information in wireless sensor networks is proposed.

Ключові слова: збір інформації моніторингу, безпроводові сенсорні мережі, БпЛА.

Постановка задания в общем виде. Современные технологии летающих сетей становятся популярными в различных областях гражданского и военного применения [1]. Например, беспилотные летательные аппараты (БпЛА) могут использоваться для наблюдения за лесными массивами, полями, границами, для осуществления экологического и метеорологического мониторинга, поисково-спасательных миссий, в военных целях и т.п. В этих сценариях БпЛА облетают интересующую территорию и собирают данные мониторинга от сенсорных узлов, развернутых на поверхности земли (воды), в том числе и в отдаленных (недоступных) районах, где отсутствует телекоммуникационная инфраструктура. Сенсорные сети состоят из совокупности связанных сенсорных узлов. Для решения задач группового взаимодействия между узлами используется самоорганизация сети [2]. Сенсорные узлы осуществляют мониторинг определенных параметров внешней среды зон своего покрытия, хранят полученные данные и ждут возможности их передачи на центр сбора информации через БпЛА при появлении его в зоне радиосвязности. При облете территории по определенному маршруту БпЛА устанавливает связь с сенсорными узлами, принимает от них данные мониторинга и:

1. Для БСС, допускающих задержку в их получении, сохраняет и передает их через базовую станцию в центр обработки по мере возвращения в исходную точку полета.
2. Для БСС реального времени – передает данные (при наличии множества летающих БпЛА – по сети, которую они образуют) на базовую станцию и далее в центр сбора данных для их дальнейшего анализа.

Сенсорные узлы имеют ограниченные ресурсы по: энергии батареи, производительности процессора, памяти, мощности передатчика, пропускной способности радиоканала и т.д. Современные БСС могут состоять из большого количества сенсорных узлов. Сеть может быть предназначена для работы в течение нескольких месяцев или даже лет в труднодоступных районах. Замена батарей для БСС может быть непрактичной или не возможной. Следовательно, управление потреблением энергии сенсорными узлами (уменьшение, перераспределение между узлами) имеет решающее значение для увеличения времени их функционирования и повышения эффективности функционирования БСС в целом. Поэтому задача повышения времени функционирования БСС является актуальной.

Обеспечить эффективное функционирование сети в таких условиях невозможно обеспечить без эффективной системы управления (СУ) данной неоднородной сетью [2 – 4].

Поэтому в статье предлагается краткий анализ существующих подходов к организации процесса сбора информации мониторинга от БСС с использованием БпЛА, рассмотреть перечень задач, необходимых для ее решения и описать новый метод, реализующий данный процесс.

Анализ последних публикаций и направления решения задачи.

К настоящему времени проведено значительное количество исследований по решению задачи уменьшения расхода энергии батарей узлов БСС путем использования БпЛА в качестве воздушных шлюзов для сбора данных мониторинга [5 – 18]. Время функционирования сети можно увеличить совершенствованием алгоритмов взаимодействия между БпЛА и сенсорными узлами в процессе сбора данных мониторинга. Чтобы поддерживать работу всей сети в течение длительного времени необходимо стараться минимизировать среднюю энергию, потребляемую каждым узлом. Уровень затрат энергии узлов и БпЛА зависит от следующих факторов.

1. Траектории, высоты полета БпЛА, количества узлов обмена информацией.

БпЛА собирает информацию с сенсорных узлов по определенному маршруту полета. Сокращение маршрута полета приводит к уменьшению времени сбора информации и уменьшению расхода энергии БпЛА, но увеличивает расход энергии узлов из-за увеличения расстояния в канале узел-БпЛА. В работах [5 – 18] данная задача рассматривается как задача коммивояжера – найти кратчайший маршрут перемещения БпЛА при посещении данного множества сенсорных узлов, обеспечивающих обмен информацией с БпЛА. Известны различные алгоритмы и методы решения: полного перебора, линейного целочисленного программирования, ветвей и границ, жадные эвристические, генетические и др.

В статье [6] сравнивались алгоритмы поиска кратчайшего пути Дейкстры, Беллмана-Форда, Флойда-Уоршелла, AStar с позиций вычислительной сложности. Задача относится к классу NP-полных. Число итераций алгоритма значительно увеличивается при увеличении размерности сети. В [10] предложено для сбора данных использование технологии мобильных агентов. Основная проблема – это поиск оптимального маршрута по перемещению агентов. Анализируется задача определения необходимого числа агентов, их взаимодействие с источниками информации, нахождение оптимального маршрута агентов.

Высота полета определяет размер площади покрытия. Увеличение высоты приводит к увеличению: расхода топлива (энергии) у БпЛА, площади покрытия, числа узлов, способных передать данные мониторинга, затрат энергии узлов на процесс передачи из-за увеличения расстояния. И наоборот. Поэтому высота полета должна быть оптимизирована с учетом целевых функций управления сетью и ограничений на ее ресурсы, директивных требований [8]. Кроме этого, наземные узлы могут находиться в зоне радиосвязности с БпЛА лишь ограниченное время, поэтому за это время необходимо успеть передать данные мониторинга БпЛА от множества узлов, находящихся в зоне радиосвязности. Время обмена зависит от скорости передачи, количества источников информации и принятого протокола канального уровня.

Много исследований было посвящено критериям выбора узлов для обеспечения обмена с БпЛА, направленным на улучшение эффективности процесса обмена [6 – 18]. Например, найти ближайшие узлы для сокращения маршрута перемещения БпЛА; установить связь на минимальной дальности с узлами, имеющими минимальную энергию батарей; выбрать узлы, находящиеся в „центре массы” кластера и др.

2. Принятого способа взаимодействия между узлами сети и БпЛА.

Рассматриваются два основных способа:

первый – каждый узел сети напрямую передает данные на БпЛА;

второй – сеть разбивается на кластеры, выделяется главный узел кластера (в нашем случае узел обмена с БпЛА), который собирает данные от узлов своего кластера, хранит и далее передает их БпЛА при его пролете [5 – 18].

3. ***Принятых методов обмена данными между узлами на различных уровнях эталонной модели OSI [1, 2, 19, 20].*** На сегодня для однородных самоорганизующихся сетей проведено

значительное количество исследований по разработке энергоэффективных алгоритмов передачи данных. Большинство публикаций посвящено разработке энергосберегающих методов передачи на физическом, канальном, сетевом и прикладном уровнях [2]. Например, в качестве варианта может быть осуществлена оптимизация по применению MAC-протокола – на начальном этапе взаимодействия БпЛА-кластер используется случайный протокол канального уровня, а при связи с конкретными узлами в кластере – детерминированный.

В [19] рассмотрены алгоритмы и правила построения энергоэффективной топологии сети.

В [20, 21] предложен ряд методов маршрутизации, обеспечивающих равномерное перераспределение в сети расхода энергии узлов в сети.

4. *Алгоритмов кластеризации.* Кластеризация является ключевой задачей для достижения минимизации затрат энергии узлов и стабильности работы сети. Существует ряд алгоритмов кластеризации, направленных для улучшения показателей функционирования БСС [8 – 11, 13 – 18] (таблица 1): сокращения расхода энергии узлов, балансировки нагрузки, увеличения связности, уменьшение задержки передачи данных, оптимизацию количества кластеров и др.

Таблица 1

Алгоритм	Сложность	Тип шлюза	Топология кластера	Цель кластеризации
LEACH	$O(1)$	Статичный	Single-hop	Баланс нагрузки
LEACH-C	$O(1)$	Статичный	Single-hop	Баланс нагрузки / энергоэффективность
ЕЕНС	$O(kh)$	Статичный	Multi-hop	Энергоэффективность
HEED	$O(1)$	Статический	Single-hop	Баланс нагрузки / энергоэффективность
ExHEED	$O(1)$	Статический	Single-hop	Баланс нагрузки / энергоэффективность / стабильность кластера
DWЕНС	$O(1)$	Мобильный	Multi-hop	Энергоэффективность / баланс нагрузки
Fazackerley et	$O(1)$	Статичный	Single-hop	Статическая энергоэффективность
Pantziou et	$O(1)$	Мобильный	Multi-hop	Баланс нагрузки

Алгоритм LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) предложен одним из первых [13]. В нем в каждом раунде кластеризации новые главные узлы кластера (ГУК) выбираются вероятностным методом для получения баланса нагрузки, но без учета оставшейся энергии узлов. Позже авторами был предложен алгоритм LEACH-C, который реализует централизованный метод управления процессом кластеризации с помощью удаленной базовой станции. Каждый узел отправляет информацию о своем текущем местоположении и энергетическом уровне на базовую станцию, которая решает задачу выбора ГУК с высоким уровнем энергии и пытается сбалансировать нагрузку.

Алгоритм кластеризации ЕЕНС (Energy Efficient Hierarchical Clustering) [14] формирует многоуровневую кластерную топологию, которая обеспечивает топологию внутри кластера топологию размером k -скачков и h -скачковую связность между ГУЗ и шлюзом. Узлы отправляют свои данные мониторинга из нижнего слоя ГУЗ в верхний слой ГУЗ соответственно. Сложность этого алгоритма – $O(k_1 + k_2 + \dots + k_h)$, что является значительным недостатком по сравнению с алгоритмами кластеризации сложности $O(1)$.

Целью HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) [15] алгоритма является выбор ГУК среди узлов, имеющих большие значения уровней энергии батарей. Он вводит функцию стоимости для распределенного выбора ГУК. HEED направлен на решение 4-х основных целей: увеличить время функционирования сети, распределяя потребление энергии; завершить процесс выбора ГУК за определенное количество итераций; минимум служебного трафика и создание компактных кластеров. Хотя HEED является эффективным алгоритмом кластеризации, он имеет проблему, связанную с размером кластеров. В случае снижения плотности сети или дальности радиосвязности некоторые кластеры формируются только в виде самого ГУК. Недостаток – это несбалансированное формирование кластеров и увеличение потребления энергии.

Модифицированный алгоритм HEED (ExHEED) предлагает уменьшить потребление энергии за счет сокращения числа ГУК. Хотя ExHEED уменьшает количество одиночных ГУК по сравнению с HEED, но он вводит дополнительную задержку кластеризации и потребление энергии.

Алгоритм кластеризации DWENC (Distributed Weight-based Energy-efficient Hierarchical Clustering) [16], пытается оптимизировать внутрикластерную топологию. Параметрами выбора кластера выступают мощность принимаемого сигнала и близость к соседям. DWENC формирует хорошо сбалансированные кластеры с топологией с несколькими ретрансляциями внутри. Для точного расчета расстояния требуются GPS-приемники.

Fazackerley и др. [17] предложил алгоритм кластеризации на основе уровня принимаемого сигнала (RSSI) для выбора ГУК в областях с высокой плотностью. Каждый узел конкурирует, чтобы стать ГУК с использованием значений RSSI, собранных от соседних узлов. Этот подход уменьшает дальность передачи, но не учитывает остаточную энергию узлов.

Pantziou и др. [18] проведен анализ эффективности сбора данных с отдельных городских сенсорных сетей с помощью транспортных средств общественного пользования в качестве мобильного шлюза, которые движутся по определенной траектории через определенные промежутки времени. Взаимодействие между мобильным шлюзом и сетями предлагается осуществлять через узлы-рандеву. Остаточная энергия батарей и расстояние до траектории используются в качестве параметров при выборе узлов-рандеву.

Цель статьи: разработать новый метод сбора информации мониторинга с узлов БСС с помощью БпЛА, позволяющий за счет комплексного подхода оптимизировать расход энергии батарей сенсорных узлов и соответственно максимизировать время функционирования сети.

Изложение основного материала.

Синтез методов сбора информации о БСС сильно зависит от параметров (рис. 1):

сети (предназначение, требования по сбору данных, размерность, способы и средства развертывания, наличие и количество изолированных сегментов сети и т.п.);

сенсорных узлов (количество и тип сенсоров в узле, модели покрытия и наблюдения, тип трафика, параметры приемопередатчика, имеющая энергия батарей, производительность процессора, величины расхода энергии батарей при различных режимах работы, отсутствие или наличие системы позиционирования, принятые протоколы информационного обмена), их типов (стационарные или присутствуют мобильные узлы-роботы), алгоритмы управления и т.д;

БпЛА (количество, тип, время, скорость, дальность и высота полета, тип и характеристики радиооборудования, алгоритмы и протоколы информационного обмена и т.д.);

принятой системы управления сетью (типа – централизованная или децентрализованная, способа принятия решений – кооперированное или изолированное, множество заложенных алгоритмов управления, протоколов информационного обмена на различных уровнях OSI) и т.д.

Существующие подходы сбора информации с узлов с использованием БпЛА в качестве мобильного шлюза в БСМ можно разделить на три группы.

1) Прямой сбор БпЛА информации мониторинга с каждого узла.

В этом случае БпЛА облетает сенсорное поле по рассчитанному маршруту и собирает данные с каждого сенсорного узла, хранящего данные мониторинга заданной территории за определенное время. Фактически маршрут передачи состоит из одной ретрансляции узел-БпЛА. Далее данные передаются от БпЛА до пункта сбора данных.

Достоинства данного способа: минимальная задержка передачи данных при одной ретрансляции (качество обслуживания QoS передачи данных является основным требованием во многих приложениях), меньший расход энергии узлом, расходуемый на

передачу в сравнении с многократной ретрансляцией данных до стационарного шлюза по маршруту узел-узел-...-узел-БпЛА-базовая станция-центр сбора данных.

Недостаток увеличение времени полета БпЛА (и повышение требований к параметрам БпЛА) и, соответственно, значительное увеличение время сбора информации мониторинга.

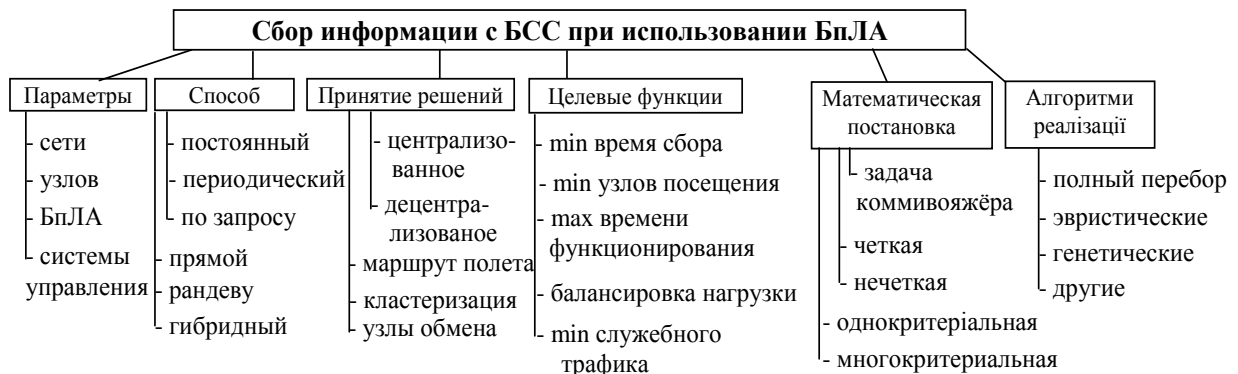


Рис. 1 Составляющие процесса сбора информации БпЛА с БСС

2) Сбор БпЛА информации мониторинга с выделенных узлов-рандеву (способ рандеву), хранящих информацию мониторинга узлов выделенного кластера сети (рис. 2 а).

В этом случае по определенному алгоритму (централизованно или децентрализованно в зависимости от наличия информации о состоянии сети в центре управления сетью) сеть разбивается на кластеры и выделяются узлы-рандеву. В кластерах строятся маршруты передачи данных от узлов-мониторинга до узлов рандеву, которые собирают данные мониторинга своего кластера сети до подлета БпЛА. Далее БпЛА (или центр управления сетью) строит маршрут облета только узлов-рандеву, совершает полет и собирает информацию.

Недостатки – для обеспечения способа рандеву необходимо синтезировать и реализовать дополнительные алгоритмы управления сетью:

разбиение сети на кластеры (должна быть произведена оптимизация количества и размеров кластеров в зависимости от различных целевых функций, например, минимизировать расход энергии узлов в процессе передачи от узлов-мониторинга до узла-рандеву, минимизировать время доставки от узла-мониторинга до узла-рандеву, и т.п.);

выбор узлов-рандеву в кластерах по определенным параметрам в зависимости от целевых функций управления сетью и складывающейся обстановки;

организация процесса маршрутизации сбора данных до узлов-рандеву (определить оптимальный способ и метрики маршрутизации);

построение, оптимизация и корректировка пути облета БпЛА узлов рандеву [2].

Достоинство: использование узлов-рандеву позволит снизить энергопотребление узлов кластера, уменьшить время полета и тем самым ускорить время сбора информации мониторинга. Несмотря на эти улучшения, объем данных обрабатываемых в узлах-рандеву, особенно в больших сетях, могут быть значительными, что может привести к переполнению буферов и задержкам доставки данных при передаче на БпЛА.

3) Гибридный, когда сеть разбивается на кластеры (рис. 2б). Базовый маршрут полета БпЛА оптимизируется для посещения узлов-рандеву с корректировкой траектории первоочередного посещения „критических” узлов (например, для установления связности, облета „истощенных” или перегруженных узлов – прямой сбор данных).

Требования по периодичности сбора данных мониторинга (рис. 1).

Постоянный способ сбора предполагает постоянное покрытие и радиосвязность БпЛА с сенсорными узлами, сбор и передачу данных (возможно по сети БпЛА) на базовую станцию. Периодический – осуществляется полет БпЛА и сбор данных в определенные моменты времени; по запросу – вылет БпЛА и сбор данных осуществляется по мере необходимости.

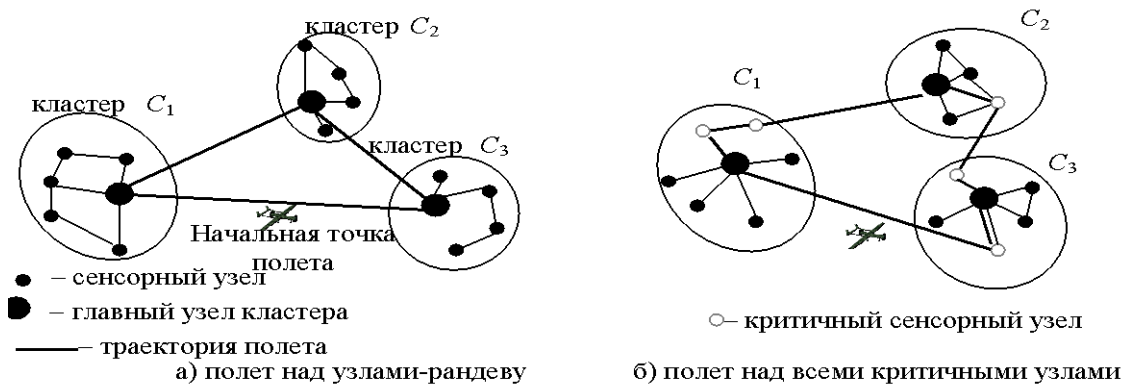


Рис. 2 Возможные стратегии облета кластеров БПЛА

При организации сбора данных мониторинга системе управления сетью (СУС) важно знать информацию о состоянии БСС (координаты размещения сенсоров, остаточная энергия батарей, необходимые объемы данных мониторинга и др.). В зависимости от ее наличия (полной, частичной, ее отсутствия) СУС может принимать решения используя различный математический аппарат (например, нечеткую логику в условиях неполной информации).

Целевыми функциями при организации процесса сбора информации могут быть (рис. 1):

1. Минимизация времени сбора за счет минимизация времени облета БПЛА всех или заданного количества узлов (при реализации сбора заданного объема данных мониторинга).

2. Уменьшение расхода энергии батарей узлов, которое может быть осуществлено за счет:

уменьшения расстояния между сенсорным узлом и БПЛА (подлет БПЛА на ближайшее расстояние до узла), регулировкой уровня передачи на минимальном уровне;

оптимизацией количества, размерности кластеров и маршрутов передачи между узлами кластера и его главным узлом;

построения энергоэффективной топологии и энергоэффективных маршрутов передачи в кластерах;

оптимизации процесса сбора информации узлами-рандеву в кластере.

3. Балансировка трафика в сети и равномерная загрузка узлов, выступающих в роли узлов-рандеву.

4. Минимизация объема служебного трафика.

5. Максимизация пропускной способности сети.

На основе проведенного анализа предлагается новый метод сбора информации с БСС с использованием БПЛА, ключевыми особенностями которого являются:

1. Иерархия принятия решений по управлению сетью: СУ сетью ↔ СУ БПЛА ↔ СУ узлов.

СУ сетью определяет глобальную задачу управления сетью и формирует частные задачи управления для каждого БПЛА (решения по маршруту, скорости и высоте перемещения, выбору целевых функций управления, алгоритмов сбора данных на разных уровнях OSI и т.д.).

БПЛА на основании глобальной задачи формирует собственную стратегию поведения (целевые функции) по обслуживанию каждого кластера (отдельного фрагмента сети).

В основу принятия решений системой управления принят метод ситуационного управления: ЕСЛИ <ситуация> ТО <решение>. Для сокращения перебора предлагается использование эвристик (правил) продукционного типа. Кроме этого, предлагается ввести блок идентификации, который будет идентифицировать состояние сети (ее кластера) и строить из множества возможных целей – их иерархию. Фактически предлагается введение правил мета-управления на всем множестве правил принятия решений. Этот подход

позволит значительно сократить пространство вариантов решений и получать решения в реальном времени для оперативного управления БСС.

СУС постоянно корректирует целевые функции управления в зависимости от ситуации на сети, требований по сбору данных и имеющихся ресурсов.

2. Сочетание централизованного и децентрализованного управления неоднородной сетью (при наличии информации о состоянии сети, решения принимает центр управления сетью, при ее отсутствии – БпЛА вместе с узлами кооперированным способом).

Например, решение по кластеризации принимается централизованно (центром управления сетью при наличии информации о состоянии БСС) или распределено (узлами сети при ее отсутствии). Метрики кластеризации выбираются с учетом целевой функции управления и могут корректироваться при обслуживании различных кластеров.

Алгоритм кластеризация завершается за фиксированное число итераций. Кластеры сбалансированы. В результате процесса кластеризации каждый узел является либо главным узлом, либо его членом кластера (нет отдельных узлов).

3. Увеличение времени функционирования сети при процессе сбора информации при помощи БпЛА достигается за счет оптимизации: траектории перемещения БпЛА, количества и параметров кластеров обмена, количества узлов обмена в кластере, расстояния между БпЛА, применения энергоэффективных алгоритмов физического, канального, сетевого, прикладного уровней OSI.

Модель сети. Рассматриваем неоднородную БСС. Наземные узлы случайным образом распределены на определенной территории, имеют одинаковые функции и ресурсы, стационарны, не обслуживаются, не изменяют своего местоположения, могут быть оснащены системой позиционирования (например, GPS). БпЛА и сенсорные узлы оснащены одинаковым оборудованием и поддерживают одинаковые протоколы информационного обмена (например, IEEE 802.11). Каждый сенсорный узел сети может выполнять функции узла мониторинга, маршрутизатора, рандеву, имеет собственную систему управления и действует кооперативно с другими узлами сети и БпЛА. Каждый узел выполняет алгоритм кластеризации и отправляет данные мониторинга в назначенный узел-рандеву. Каждый узел, включая узлы-рандеву, имеет достаточно памяти для хранения данных. Когда в зону радиосвязности узла-рандеву входит БпЛА, он отправляет ему собранные данные мониторинга узлов своего кластера.

БпЛА имеет возможность перемещаться в трех измерениях с переменной скоростью на ограниченной высоте и ограниченное время. Каждый БпЛА оборудован беспроводным маршрутизатором на борту, имеет возможность обрабатывать и передавать данные (напрямую или через сеть БпЛА) на базовую станцию для дальнейшей обработки. БпЛА обладает собственной системой управления, позволяющей самостоятельно принимать свои решения в условиях отсутствия связи с центром управления сетью.

Алгоритмы функционирования.

Общий алгоритм функционирования состоит из иерархического взаимодействия алгоритмов, заложенных в СУ сетью, СУ БпЛА и СУ узлов сети.

Основными функциями СУ сетью являются: сбор данных о состоянии сети, ее анализ, принятие решений и реализация их исполнения. Этапами – планирование, оперативное управление процессом полета БпЛА и процессом сбора данных мониторинга. При этом необходимо решать следующие основные частные задачи:

1. Расчет необходимого количества БпЛА и порядка их использования.

Задано: множество БпЛА и их параметры, сеть БСС и ее параметры, директивное время сбора данных, характеристики местности, метеоусловия и др.

Необходимо: рассчитать количество БпЛА, необходимое для выполнения задачи сбора данных при заданных целевых функциях и ограничениях, сформировать задачи для каждого БпЛА. Например, за минимальное время полета осуществить облет и сбор данных заданного объема от определенного количества узлов.

Для этого производится расчет времени выполнения задачи для одного БпЛА, которое должно быть не меньше времени, необходимого для облета маршрута (с заданным количеством, расположением узлов) и сбора данных мониторинга. Если один БпЛА не успевает выполнить задачу, производится расчет для 2-х и так далее. Формируются отдельные задачи для каждого члена группы БпЛА.

Формируется план использования группы БпЛА (запуск, облет и обслуживание).

2. Определение оптимального количества кластеров (определяется на этапе планирования) и их параметров. При наличии информации о состоянии узлов БСС решение по кластеризации принимается центром управления сетью, при отсутствии должна осуществляться децентрализованным распределенным образом узлами сети.

3. Расчет точек рандеву и маршрута полета.

Обобщенный алгоритм функционирования системы управления БпЛА.

1. Сбор данных о сети (кластера) с помощью обмена данными между БпЛА и узлами сети.

БпЛА начинает полет в направлении сенсорного поля по заранее определенному СУС маршруту. При этом он периодически и широковещательно передает служебные сообщения узлам сети с информацией о своих параметрах (адрес, направление перемещения, координаты, высота, скорость и др.). Первый узел БСС, попав в зону радиосвязности с БпЛА, принимает его сообщения, обрабатывает и сообщает ему информацию о параметрах кластера (число узлов, координаты их размещения при наличии системы позиционирования, связность, уровни энергии батарей, качество каналов, объем данных мониторинга и др.).

2. БпЛА выбирает стратегию сбора информации в кластере и строит маршрут облета кластера (с учетом общей целевой функции управления, параметров узлов кластера, объемов данных мониторинга, оставшегося времени полета, своих ресурсов др.).

Базовый маршрут, построенный СУС, корректируется при наличии критических узлов кластере („истощенных”, „перегруженных” и т.п.). Облет (обслуживание) критических узлов осуществляется на минимальном расстоянии к ним (с приоритетом в обслуживании) в зависимости от целевых функций управления.

3. Облет определенных узлов кластера, сбор информации от них, хранение (или для БСС реального времени передача ее на базовую станцию напрямую или через сеть БпЛА).

4. Корректировка базового маршрута полета к следующему кластеру с учетом общей целевой функции и имеющихся ресурсов.

5. Перемещение к следующему кластеру.

6. Если собрана информация со всех кластеров (заданных узлов) сети, то возвратиться на место запуска и завершить полет.

Этапы функционирования системы управления узлами сенсорной сети.

1. Этап развертывания.

2. Самоорганизации всей сети (ее отдельного фрагмента), построение связной топологии.

Осуществляется широковещательной рассылкой служебных сообщений каждым узлом с информацией о параметрах своего состояния (адрес, уровень энергии батарей, мощность передачи и т.п.).

3. Оптимизации топологии сети (ее отдельного фрагмента) по выбранным критериям.

Используются распределенные алгоритмы формирования энергоэффективной топологии, рассмотренные в работах [19, 20].

4. Кластеризация сети.

Решение по кластеризации принимается централизованно (СУС или системой управления БпЛА) при наличии информации о состоянии сети или ее фрагментов. Данная информация может быть получена центром управления при наличии постоянной связности с БСС или собрана БпЛА после первого раунда сбора информации от БСС.

При отсутствии в центре управления сетью информации состояния БСС кластеризация осуществляется ее узлами распределенным образом. Процесс кластеризации включает три

основных фазы: выбор главного узла кластера (он же узел-рандеву), формирование кластера, передача данных мониторинга от обычных узлов к главному узлу кластера.

Определяется оптимальное количество кластеров. Минимальное количество кластеров приводит к уменьшению маршрута полета, но увеличивает размерность кластера и соответственно, объем передаваемых данных между узлами-рандеву и БПЛА.

Выбор главных узлов кластеров осуществляется путем обмена служебными сообщениями между узлами кластера, согласования выбора главного узла на основании определенных метрик. По сравнению с известными подходами кластеризации предлагается использовать совокупность метрик: оставшееся значение энергии батарей узлов, расстояние до БПЛА, качество радиоканала (сигнал/шум в радиоканалах узел-БПЛА и узел-узел), объем данных для передачи, скорость передачи и др. Приоритет в выборе метрик будет определяться системой управления узлов на основе идентификации своего состояния, состояния кластера и целевых функций управления.

Требования к процессу кластеризации: минимальное количество итераций и завершить до полета БПЛА.

5. Построение и поддержание в кластерах маршрутов передачи.

6. Передача данных мониторинга от узлов-мониторинга к узлам-рандеву кластера.

7. Обработка и хранение данных передачи в узлах-рандеву.

8. Ожидание узлами-рандеву сети сеанса радиосвязности с БПЛА.

9. Обмен информацией между определенными узлами и БПЛА с заданным качеством.

10. Ротация (определяется и инициируется самим узлом или БПЛА) узлов-рандеву после сеанса обмена с БПЛА.

Таким образом, в статье проведен анализ существующих подходов по сбору информации в беспроводных сенсорных сетях с помощью БПЛА. Рассмотрены основные задачи системы управления неоднородной сенсорной сетью для организации сбора информации мониторинга с использованием БПЛА. Предложен новый метод сбора информации в беспроводных сенсорных сетях и обобщенный алгоритм его реализации, позволяющий строить различные стратегии управления процессом сбора информации БПЛА в зависимости от ситуации на сети и имеющихся ресурсов.

Направлением дальнейших исследований является оценка эффективности предложенного метода при различных параметрах и условиях функционирования БСС и БПЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Літаючі самоорганізуючі радіомережі / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко, І.В. Панченко, О.І. Восколович // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 1. – С. 104 – 114.
2. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН Украины”. – 444 с.: ил.
3. Жук О.В. Система управління тактичними сенсорними мережами / О.В. Жук, В.А. Романюк, О.Я. Сова // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 2. – С. 88 – 96.
4. Lisenko A. Objective control functions of mobile ad-hoc networks using unmanned aerial vehicles / A. Lisenko, A. Romanyuk, S. Danylyuk, V. Romanyuk // Actual problems of unmanned aerial vehicles developments. IEEE 3rd international Conference, 2015. pp. 243 – 246.
5. Yong Zeng, Rui Zhang, Teng Joon Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine, Vol. 54, no. 5, 2016.
6. Cheng Zhan, Yong Zeng, Rui Zhang. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network // IEEE Wireless Communications Letters, Volume: PP, Issue 99, 2017.
7. Sathyaraj, B. Moses, et al. Multiple UAVs path planning algorithms: a comparative study. // Fuzzy Optimization and Decision Making, 2008, pp. 257 – 267.

8. Huseyin Okcu, Mujdat Soy Turk. Distributed Clustering Approach for UAV Integrated Wireless Sensor Networks, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2014, Vol.15, No. 1–3, pages: 106 – 120.
9. Dac-Tu Ho, Esten Ingar Grotli, Tor Arne Johansen. Heuristic Algorithm and Cooperative Relay for Energy Efficient Data Collection with a UAV and WSN. *Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*, 2013 International Conference.
10. Aloui Imene, Kazar Okba, Kahloul Laid, Servigne Sylvie. A new Itinerary Planning Approach Among Multiple Mobile Agents in Wireless Sensor Networks (WSN) to Reduce Energy Consumption / *International Journal of Communication Networks and Information Security*, Vol. 7, No. 2, Aug 2015, pages: 116 – 122.
11. Long Kim Le, Ahmed M. Mahdy Routing in Wireless Sensor Networks: Improved Energy Efficiency and Coverage using Unmanned Vehicles // *International Journal of Computer Networks (IJCN)*, Volume 8, Issue 2, 2016.
12. Долгушев Р.А. Программно-конфигуруемая архитектура взаимодействия наземного сегмента и беспилотного летательного аппарата в летающих сенсорных сетях / Р.А. Долгушев, Р.В. Киричек, А.Г. Владыко, А.Е. Кучерявый // 2-я международная научно-техническая конференция „Интернет вещей и 5G”, 2016.
13. Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, Jan.2000.
14. Bandyopadhyay, S., Coyle, E.J., An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks, *INFOCOM Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, Vol. 3, pages: 1713 – 1723, 2003.
15. Younis, O., Fahmy, S., Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach, *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2004.
16. Ping Ding , Joanne Holliday , Aslihan Çelik, „Distributed Energy-Efficient Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pages: 322 – 339, 2005
17. Fazackerley, S., Paeth, A., Lawrence, R., „Cluster Head Selection Using RF Signal Strength”, *Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 334 – 338, 2009.
18. G., Mpitziopoulos, A., Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Mamalis, B. Mobile Sinks for Information Retrieval from Cluster-Based WSN Islands, *Proceedings of the 8th International Conference on Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks (ADHOC-NOW '09)*, pages: 213 – 226, 2009.
19. Жук О.В. Аналіз методів управління топологією безпроводних сенсорних мереж / О.В. Жук, А.В. Романюк, А.В. Ткаченко Д.В // 36. наукових праць ВІТІ, 2017. – № 2 – С. 41 – 47.
20. Миночкин А.И. Управление энергоресурсом мобильных радиосетей / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв’язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.
21. Стрела Т.С. Аналіз методів маршрутизації безпроводних сенсорних мереж / Т.С. Стрела, О.В. Жук, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ, 2017. – № 4 – С. 129 – 143.