

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Романюк А.В. Модели оцінки ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж. Розглядається процес оцінки ефективності функціонування бездротових сенсорних мереж. Визначено основні групи показників ефективності за функціями – моніторингу (покриття), телекомунікацій та енергозбереження, та етапами функціонування. Запропоновано аналітичні моделі оцінки параметрів функціонування бездротових сенсорних мереж для кожної з функціональних підсистем системи управління мережею і мережі в цілому.

Рассматривается процесс оценки эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей. Определены основные группы показателей эффективности по функциям – мониторинга (покрытия), телекоммуникаций и энергосбережения и этапам функционирования. Предложены аналитические модели оценки параметров функционирования беспроводных сенсорных сетей для каждой из функциональных подсистем системы управления сетью и сети в целом.

A. Romaniuk Models of evaluating the efficiency of wireless sensors networks functioning. The process of evaluating the efficiency of the functioning of wireless sensor networks is considered. The main groups of performance indicators by functions - monitoring (coverage), telecommunications and energy saving and the stages of functioning were determined. Analytical models of the evaluation of the parameters of the functioning of wireless sensor networks for each of the functional subsystems of the network management system and the network as a whole are proposed.

Ключевые слова: модели, оценка эффективности, беспроводные сенсорные сети.

Постановка задачи исследования в общем виде. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) представляет собой распределенную, самоорганизующуюся систему миниатюрных автономных узлов, соединенных беспроводными каналами связи. Основной особенностью БСС является способность мониторинга различных параметров внешней среды на значительных географических территориях и передачи сообщений мониторинга по маршрутам (состоящим из последовательности узлов) от сенсорных узлов мониторинга к базовой станции (центру сбора информации) при малой мощности передатчиков.

БСС сейчас находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности: промышленности, сельском хозяйстве, медицине, охране окружающей среды, военной сфере и т.д. [1, 2]. Эффективное функционирование БСС в условиях внешнего воздействия, помех, возможной мобильности и отказов узлов не может осуществляться без эффективной системы управления сетью [3].

Процесс функционирования системы управления БСС в отличие от традиционных сетей включает в себя функционирование трех основных подсистем [3]:

1. Подсистема мониторинга.

Ее задача обеспечить покрытие зоны (площади, объектов, точек, барьера) и их мониторинг по заданному множеству параметров (температура, влажность, давление, освещенность, звук, вибрация, зараженность, движение объектов и т.п.). Подсистема мониторинга должна обеспечить заданное качество покрытия и мониторинга.

2. Подсистема телекоммуникаций.

Данная подсистема должна обеспечить передачу данных мониторингу от узлов, осуществляющих мониторинг, к базовой станции (или нескольким базовым станциям) с заданным качеством. Процессу передачи предшествуют этапы построения и поддержания системой управления сети ее топологии и маршрутов передачи от сенсоров мониторинга до базовых станций.

3. Подсистема энергосбережения.

Так как узлы сети имеют автономные источники питания, то одной из основных целей управления сетью при обеспечении заданного качества процессов покрытия, мониторинга и передачи данных является увеличение время жизни (функционирования) сети на основе реализации различных методов управления, нацеленных на минимизацию расхода энергоресурса каждого узла и сети в целом.

На етапах проектування, розгортання і оперативного управління БСС виникає задача оцінки параметрів її функціонування. По тому задача побудови і вдосконалення моделей оцінки ефективності функціонування БСС є актуальною.

Аналіз останніх публікацій. В роботах [4 – 14] пропонуються різні показники оцінки ефективності функціонування мережі. Більшість підходів орієнтовано на окремі показники оцінки ефективності, такі як час життя мережі [5, 9 – 14], параметри і моделі покриття [6, 7], параметри і моделі зв'язності [5], параметри оцінки топології [9], параметри якості обслуговування (QoS) і інші.

В силу того, що різні застосування висувають свої специфічні вимоги, при виборі БСС, в першу чергу оцінюються параметри, які дозволяють їй ефективно вирішити поставлену задачу. Наприклад, для системи, що функціонує в режимі реального часу (наприклад, БСС військового призначення), найбільш важливими параметрами є: покриття заданих зон моніторингу з заданим рівнем якості, висока швидкість і мала затримка передачі даних, швидка самоорганізація, тривале час функціонування. Для безпроводної протипожевної сенсорної системи – максимальне час неперервної роботи, простота обслуговування і масштабованість.

Таким чином, особливості побудови і функціонування БСС визначають додаткові параметри оцінки ефективності її функціонування.

Найбільш поширена модель визначення ефективності системи ґрунтується на оцінці її роботи за окремо взятою критерієм. Така модель достатньо проста і дієва. В даному випадку найбільш ефективною вважається та система, яка перемагає всі інші за вибраним параметром. На сьогоднішній день відсутні моделі, які дозволяють провести всебічну оцінку ефективності роботи безпроводної сенсорної мережі.

Цілью статті є аналіз і класифікація різних показників оцінки функціонування мереж, побудова множини моделей оцінки функцій БСС і етапів функціонування.

Изложение основного материала.

Особливостями функціонування БСС є [1, 2]:

- значна розмірність (сотні і тисячі вузлів);
- ограниченість ресурсів вузлів по ємкості батарей, об'єму пам'яті, обчислювальної продуктивності і потужності передачі;
- неоднорідний і несбалансований трафік;
- наличие помилок в радіоканалах і їх обмеженість по пропускну здатності;
- динамічна топологія з-за відмов (знищення) і можливої мобільності вузлів;
- швидке розгортання і самоорганізація;
- легка масштабованість і др.

Кожна БСС характеризується певним набором параметрів, визначених типом, технічними характеристиками вузлів і їх розміщенням [1 – 4]. Основними з них є:

кількість вузлів в мережі і їх типи (за кількістю параметрів моніторингу, середовища розміщення, мобільності і т.п.);

площа моніторингу (зони, об'єкти, цілі, бар'єри) і прийнятні способи (за подіями, запитами базової станції або змішаним способом) і параметри моніторингу (кількість, інтенсивність збору і т.п.);

швидкість передачі даних по каналах радіозв'язу (в основному визначається прийнятими протоколами 3-х нижніх рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем: фізичного, каналного і мережного);

топологія мережі визначається положенням вузлів і наявністю або відсутністю радіозв'язності між будь-якими двома вузлами, визначає потенціальні можливості мережі за побудовою маршрутів і процесу передачі даних;

плотность размещения узлов – максимальное, минимальное и среднее количество „соседей” узла сети. Этот параметр определяется текущей топологией, может использоваться как управляемый параметр для оптимизации топологии сети;

диаметр сети – минимальное количество ретрансляций в маршруте передачи данных между двумя самыми удаленными узлами сети – определяется топологией и может использоваться для комплексной оценки сети. Более важным параметром является длина наибольшего кратчайшего маршрута из всех кратчайших маршрутов между узлами мониторинга и базовой станцией;

латентность – параметр, определяющий задержку от момента возникновения события до доставки информации о нём до базовой станции (центру сбора информации);

время жизни сети определяет время работы БСС без замены или подзарядки аккумуляторов (более детально будет рассмотрен далее);

пропускная способность определяет объём информации, проходящий через сеть в единицу времени с заданным качеством;

множество алгоритмов и протоколов, реализуемые системой управления сетью и другие.

При решении практических задач функционирования автономных БСС и управлении ними возникает ряд задач, связанных с показателями времени и качества их функционирования:

1. Оценка предполагаемого времени жизни сети при заданных характеристиках аппаратных средств, алгоритмах ее работы, условиях функционирования сети.

2. Увеличение времени жизни сети за счет применения совокупности методов и алгоритмов управления ее функционированием.

3. Оценка и обеспечение качества функционирования сети (ее функциональных подсистем: мониторинга, телекоммуникационной и др. [3]).

Показатели энергоэффективности

Беспроводные сенсорные сети представляют собой совокупность автономных сенсорных узлов, работающих от автономных источников питания. Обычно таким источником является обычный аккумулятор с непополняемой в процессе работы энергией. Со временем он разряжается, и сенсорный узел перестает работать.

В работах, посвященных БСС, понятие энергоэффективности близко к понятию времени автономной работы. То есть считается, что большее время автономной работы обеспечивает большую энергоэффективность.

Исследование понятия „времени жизни сети” и связанных с ним задач является одним из основных вопросов настоящей статьи. В ней описываются модели расчета времени жизни отдельных узлов и даются подходы к определению времени жизни сети в целом, предлагаются новые выражения, учитывающие весь функционал БСС.

Так как любой узел выполняет некоторый набор функций, возложенных на него, то выход его из строя может привести к следующему. В случае, если набор задач, выполняемый узлом, не критичен, то можно говорить о падении качества обслуживания сети (временном или окончательном). Понятие качества обслуживания, в том числе применительно к БСС, подробно исследуется в работе [8]. Временное падение качества обслуживания предполагает, что через некоторое время задачи вышедшего из строя узла будут возложены на другие узлы сети. При окончательном падении качества обслуживания сеть перестает выполнять одну или несколько функций. Если узел является ключевым элементом системы, например, выполняет задачи маршрутизации большого числа потоков, то его отказ и невозможность построения новых маршрутов означает отказ всей сети.

Так как в общем случае все элементы БСС являются автономными, обязательно наступает момент, когда сеть более не может решать возложенные на нее задачи. Время от начала работы сети до данного момента называется временем жизни – $T_{ж}$.

Проблема заключается в том, что в каждом отдельном случае момент выхода сети из строя может определяться по-разному, в зависимости от требований к качеству обслуживания.

Однако надо отметить, особенностью БСС является возможность самоорганизации и самовосстановления. Самоорганизация представляет собой процесс самостоятельного создания, настройки и поддержания работы беспроводной сети с динамическим регулированием параметров и логики ее работы в зависимости от внешних факторов. Целью самоорганизации является создание автономной, автоматически настраиваемой сети, которая после развертывания должна функционировать без вмешательства оператора. Самовосстановление тесно связано с самоорганизацией и предполагает, что при выходе из строя отдельных узлов сети через определенный интервал времени сеть перестраивается и снова начинает выполнять возложенные на нее функции.

Функции самоорганизации и самовосстановления реализуются системой управления в протоколах сетевого, транспортного и прикладного уровней эталонной модели OSI.

Рассмотрим подробнее понятие „время жизни сети”. Его определение и расчет сводится к двум основным задачам [5, 13]:

1. Определение времени жизни каждого узла сети.
2. Определение времени жизни сети в целом.

Время жизни узла БСС

Время жизни каждого узла сети зависит от [3, 13, 14]:

характеристик аппаратных средств (емкость батареи, потребляемые мощности процессора, приемопередатчика, датчиков и всех электронных компонентов узла при различных режимах работы);

интенсивности сбора, объема передаваемых данных, которые зависят от конкретного приложения, определяющего параметры мониторинга и интенсивности происходящих событий в зоне мониторинга;

протоколов физического и канального уровней, определяющие, прежде всего, механизмы контроля доступа к среде;

алгоритмов (протоколов) управления топологией сети. Каждая топология сети характеризуется своим энергопотреблением [14];

алгоритмов (протоколов) маршрутизации, вносящих в сеть дополнительный служебный трафик по построению и поддержанию маршрутов передачи [14].

Например, уже сегодня разработан ряд алгоритмов и протоколов, направленных на уменьшение потребляемой мощности устройств сети на канальном (Berkeley MAC, Sensor MAC, D-MAC и др.), сетевом и прикладном уровнях [3, 5].

Зная начальную энергию батареи e_{i0} i -го узла и среднюю потребляемую им мощность p_i , можно приблизительно оценить время его жизни по формуле:

$$t_{жи} = e_{i0} / p_i.$$

Формула средней потребляемой мощности для узла имеет вид:

$$p = (p_{мон} t_{мон} + p_{пер} t_{пер} + p_{прм} t_{прм} + p_{ож} t_{ож} + p_{сон} t_{сон}) / t_{ц}, \quad (1)$$

где $t_{ц} = t_{мон} + t_{пер} + t_{прм} + t_{сон} + t_{ож}$ – продолжительность одного цикла работы узла (считывание данных мониторинга, передача и прием данных, ожидание, сон);

$p_{пер}$, $t_{пер}$ – средняя мощность и время, затрачиваемых в процессе передачи данных;

$p_{прм}$, $t_{прм}$ – средняя мощность и время приема данных;

$p_{мон}$ – потребляемая мощность в режиме мониторинга

$t_{мон}$ – суммарное время, затрачиваемое на считывание показаний с датчиков, их обработку и подготовку к передаче;

$p_{сон}$, $t_{сон}$ – потребляемая мощность в режиме сна и время сна;

$p_{ож}$, $t_{ож}$ – время и затрачиваемая энергия в режиме ожидания.

В формуле (1) величины $\rho_{\text{пер}}$, $\rho_{\text{прм}}$ определяются протоколами физического, канального (используемого стандарта беспроводной передачи, размера передаваемых данных, а также вероятности ошибок при передаче) и сетевого уровней (используемый метод маршрутизации – ряд протоколов маршрутизации в качестве метрики выбора маршрута использую мощность передачи) и наявной топологией сети. Значения $\rho_{\text{сон}}$ и $\rho_{\text{мон}}$ определяются особенностями конкретной аппаратной реализации устройства и программной реализации алгоритмов обработки данных и являются постоянными. Время $t_{\text{мон}}$ зависит как от характеристик используемого процессора, датчиков, так и от сложности программной реализации алгоритмов обработки данных. Время ожидания $t_{\text{ож}}$ определяется протоколами канального и сетевого уровней.

Показатели времени жизни сети

В общем случае время жизни сети складывается из продолжительности работы ее узлов. Однако учитывая различные требования приложений по качеству обслуживания различных функциональных подсистем БСС, а также то, что в сети часто заложена избыточность, могут использоваться различные показатели оценки времени жизни всей сети.

Показатели, основанные на количестве работающих узлов

Рассмотрим сеть, состоящую из N сенсорных узлов [5, 10 – 12]. В самом простейшем случае время жизни сети $T_{\text{ж}}$ может определяться минимальным временем жизни любого из узла сети $t_{\text{жи}}$

$$T_{\text{ж}} N = \min_{i \in N} t_{\text{жи}}.$$

В общем виде данная оценка имеет серьезный недостаток, так как не различает типы узлов. В частности, в большинстве сетей имеется ряд ключевых маршрутизаторов, обычно расположенных вокруг шлюза, выход из строя которых автоматически приводит к неработоспособности сети. Поэтому в ряде работ [5] при анализе времени жизни сети выделяются l критических узлов – $T_{\text{ж}}(l)$ (например, они могут быть головными узлами локальных кластеров или маршрутизаторами в единственном пути), которые все время должны быть в работоспособном состоянии и в тоже время допускают отказ k -узлов в $\{N-l\}$ множестве. Тогда

$$T_{\text{ж}}(n) = \min_{i \in n} t_{\text{жи}}$$

Для остальных узлов применяется оценка $T_{\text{ж}}(N-n)$ при $T_{\text{ж}}(N-n) < T_{\text{ж}}(n)$.

Причем необходимо различать принадлежность критических узлов к функциональным подсистемам: покрытия $n_{\text{п}}$ и связности $n_{\text{с}}$; $n = n_{\text{п}} + n_{\text{с}}$.

Тогда

$$T_{\text{ж}}(n) = \min_{i \in n} \{T_{\text{жи}} n_{\text{п}} ; T_{\text{жи}} n_{\text{с}} \}.$$

В [5] авторы также предлагают использовать оптимистичную метрику – время жизни сети определяется временем жизни узла, который последний израсходует свою энергию.

$$T_{\text{ж}} N = \max_{i \in N} t_{\text{жи}}.$$

Хотя она носит оптимистичный характер, но при определенных условиях может использоваться. Например, при использовании множества методов минимизации расхода энергии [14] система управления сети пытается равномерно во времени распределять расход энергии по узлам сети и пытается тем самым, чтобы все узлы прекратили функционирование одновременно.

Таким образом, использование только метрик, основанное на количестве работоспособных узлов, нецелесообразно, т.к. они не отображают весь функционал БСС.

Показатели, основанные на размере и типе зоны (объекта) покрытия сети

Использование данных показателей обусловлено назначением сенсорных сетей – наблюдением за некоторыми параметрами среды: в определенной зоне покрытия – П(3) (все

точки пространства в зоне датчика узла), за множеством объектов (целей) с известным местоположением в зоне – П(Ц), барьера – П(Б) [12 – 14].

Обозначим качество покрытия $K(\Pi)$. Есть два основных подхода к определению показателей данной группы. Согласно первому подходу сеть считается работающей, пока α процентов от зоны мониторинга (З), целей наблюдения (Ц), барьера (Б) покрыто хотя бы одним сенсорным узлом (α -покрытие) – $K(\Pi)=\alpha Z$ ($K(\Pi)=\alpha C$, $K(\Pi)=\alpha B$). Для времени жизни

$$T_{ж}(\Pi(\alpha Z)) = \min_i \text{покрывают } \alpha Z t_{жи},$$

$$T_{ж}(\Pi(\alpha C)) = \min_i \text{покрывают } \alpha C t_{жи},$$

$$T_{ж}(\Pi(\alpha B)) = \min_i \text{покрывают } \alpha B t_{жи}.$$

Второй подход, направленный на обеспечение избыточности, требует, чтобы каждая точка целевой области была покрыта, по крайней мере, k узлами (k -покрытие).

$$T_{ж}(\Pi(\alpha Z)) = \min_{k \text{ узлов покрывают } \alpha Z} t_{жk}$$

Среди них наиболее распространенное определение времени жизни использует 1-покрытие – время, в течение которого область мониторинга полностью находится в диапазоне чувствительности, по меньшей мере, одного сенсорного узла, то есть область покрыта, по меньшей мере, одним узлом. По аналогии с ранее рассмотренными подходами могут рассматриваться время жизни узлов, обеспечивающих покрытие и α -покрытие наиболее важных (критичных) зон (z_1, z_2, \dots, z_z), целей (c_1, c_2, \dots, c_x), барьеров (b_1, b_2, \dots, b_y) (табл. 1).

Таблица 1

Тип покрытия	$T_{ж}$ покрытия	$T_{ж}$ α -покрытия
z наиболее важных зон	$T_{ж}(\Pi(z_1, z_2, \dots, z_z))$	$T_{ж}(\Pi(\alpha_1 z_1, \alpha_2 z_2, \dots, \alpha_z z_z));$
x наиболее важных целей	$T_{ж}(\Pi(c_1, c_2, \dots, c_x));$	$T_{ж}(\Pi(\alpha c_1, \alpha c_2, \dots, \alpha c_x));$
y наиболее важных барьеров	$T_{ж}(\Pi(b_1, b_2, \dots, b_y)).$	$T_{ж}(\Pi(\alpha b_1, \alpha b_2, \dots, \alpha b_y)).$

Например,

$$T_{ж}(\Pi(z_1, z_2, \dots, z_\xi, \dots, z_z)) = \min_{\xi} T_{ж}(\Pi(z_\xi)).$$

Целями управления также могут быть минимум пустых (непокрытых) зон (целей, барьеров); минимальное количество сенсоров, задействованных для заданного покрытия, максимизация времени жизни узлов, обеспечивающих заданное покрытие и другие.

Недостатком описанных выше показателей является то, что наличие покрытия не гарантирует качество мониторинга и доставки информации пользователям. Кроме этого в большинстве моделей принимаются ограничение в виде тождественности радиуса мониторинга и радиуса покрытия, что накладывает дополнительные ограничения по связности и возможности построения определённой топологии.



Рис. 1 Классификация показателей оценки эффективности функционирования БСС

Показатели, основанные на времени выполнения задач на различных этапах функционирования сети

Основными этапами функционирования БСС являются: планирования, развертывания, восстановления (наращивания) и оперативного управления.

Временные интервалы на реализацию данных этапов должны быть не больше заданных, т.е. время планирования $t_{пл} \leq t_{плзад}$, время развертывания $t_{раз} \leq t_{раззад}$, время восстановления (наращивания) $t_{вос} \leq t_{восзад}$ сети должны быть не более заданных (директивных).

Эффективность оперативного управления может определяться величиной цикла управления $T_{ц} \rightarrow \min$, качеством принимаемых решений центром управления сетью (в целом оценивается степенью достижения цели управления на множестве показателей функционирования сети) и объемом служебной информации $V_{ст}$, затрачиваемой на ее реализацию. Здесь существует классическое противоречие проблемы управления сетью. Чем больше собираем служебной информации о состоянии сети (увеличиваем объем служебного трафика), тем лучше принимаем решение (при условии адекватности моделей управления сетью). И наоборот. Чем меньше собираем служебной информации о состоянии сети (уменьшаем объем служебного трафика), тем принимаем решение менее качественное.

Показатели подсистемы телекоммуникаций (основаны на связности графа сети, ее топологии и качестве маршрутов передачи)

Так как сенсорная сеть представляет собой распределенную систему сбора данных, то помимо непосредственного считывания информации с датчиков, важно доставить ее до базовой станции с заданным качеством. Данные мониторинга передаются по маршруту (через маршрутизаторы), которые должны быть в активном состоянии.

Поэтому, при использовании данной группы показателей, сеть считается работоспособной до тех пор, пока существует связная топология и маршруты $M = \{m_v\}$, $v = 1 \dots V$ доставки событий от всех конечных узлов j (или от определенной доли конечных узлов $|j| \subset J$ мониторинга) до базовой станции – BS [9]. Необходимо отметить, что возможные маршруты передачи зависят от предварительно построенной системой управления топологии сети.

$$T_{ж} M = \min_{i, j \in m_v} t_{ji}, \text{ где } i - \text{ретранслятор в маршруте } m_{j-BS}, j - \text{узел мониторинга.}$$

Качество каждого из маршрутов $K(m_v)$ всего множества маршрутов $K(M)$ характеризуется своими параметрами: пропускная способность, задержка передачи, время существования, время построения и др. Более подробно данные параметры рассмотрим далее при обсуждении качества обслуживания при передаче данных.

Кроме этого качество маршрутов и их наличие определяется текущей топологией сети G_s , $s = 1 \dots S$ и ее параметрами $K(G_s)$, определяющими ее качество: время построения, степень связности узлов, диаметр сети, плотность размещения узлов, мощности передач узлов, величина энергозатрат узлов и т.п.). На сегодня разработано достаточно большое количество методов управления топологией БСС для достижения различных целей управления сетью [3]; минимум расхода энергии, кратчайшие маршруты, оптимум степени связности и др.

Таким образом показатели телекоммуникационной подсистемы должны оцениваться показателями качества топологии, маршрутов передачи и временем жизни маршрутов при данной топологии $K(TKM) = \{K(G_s), K(M_{G_s}), T_{ж}(M_{G_s})\}$.

Интегральные показатели (основанные на покрытии, связности и функциональной полноте работающих узлов)

В работе [12] для оценки времени жизни сети предложено объединить три группы показателей: связности $T_{ж}(M)$, покрытия $T_{ж}(\alpha\Pi)$ с критически необходимым количеством работоспособных в сети $T_{ж}(n)$ узлов:

$$T_{ж} = \min \{T_{ж}(M), T_{ж}(\alpha\Pi), T_{ж}(n)\}.$$

Т.е. время жизни сети определяется минимальным временем жизни критических узлов, обеспечивающих заданные мониторинг (покрытие) и связность (топологию и маршруты). Необходимо отметить, что одним из методов балансировки расхода энергии узлов в сети является поочередное включение и выключение определенных множеств узлов. Например, одна часть узлов может выполнять мониторинг области в одно время Δt_1 , другая часть узлов в другое время Δt_2 . Аналогично передачу данных могут осуществлять определенная часть узлов (определяющих топологию сети и маршруты передачи G_1) в один интервал времени, а другая G_2 в другой интервал.

В этом случае время жизни определяется как сумма времен жизни в эти отрезки времени:

$$T_{ж} = T_{ж}(G_1, \Delta t_1) + T_{ж}(G_2, \Delta t_2).$$

Показатели, основанные на требованиях приложений (качестве QoS)

Как отмечалось ранее, система управления БСС состоит из подсистем мониторинга (сюда входит функция покрытия) и телекоммуникаций и энергосбережен [3].

Показателями качества функционирования подсистемы мониторинга $K(MON)$ могут быть: время развертывания, степень покрытия заданной зоны (цели, барьера) – α , время ее мониторинга $t_{мон\min} < t_{мон} < t_{мон\max}$, время жизни $T_{ж}(П)$ подсистемы покрытия, вероятность обнаружения событий $p_{ос}$, точность наблюдения (ошибки измерения), необходимое количество узлов (параметров мониторинга) конкретных объектов мониторинга ($n_{обмон}$), интенсивность ($\lambda_{мон}$) и тип трафика мониторинга $\eta_{мон}$ и т.д. От степени достижения данных показателей заданным будет определяться качество мониторинга.

Для подсистемы телекоммуникаций основными параметрами являются $K(TKM)$: пропускная способность, задержка передачи, вариации задержки передачи данных (джиттер), вероятность ошибок и т.п. Рассмотрим некоторые из них более подробно. Например, для мультимедийных приложений должно быть:

гарантированы требования по пропускной способности, задержки, джиттера и потерь. Т.е. сеть должна обеспечить пропускную способность S_c не ниже заданной $S_c > S_{зад}$, (определяется приложением) в пределах заданного промежутка времени. В свою очередь пропускная способность сети S_c определяется как сумма пропускных способностей направлений. Пропускная способность направления s_j равна сумме пропускных способностей маршрутов в этом направлении, а пропускная способность маршрута равна минимальной пропускной способности l -канала, входящего в этот маршрут m .

$$S_c = \sum_{j=1}^J s_j, \quad s_j = \sum_{m=1}^M s_m, \quad s_m = \min_{l \in m} \{k_l\}.$$

гарантия задержки передачи данных – гарантия того, что доставка данных от источника к потребителю выполняется в строго определенный интервал времени $t_{дос} \leq t_{зад}$.

гарантия вариации задержки – свидетельство того, что задержки, вносимые компонентами системы вдоль всего маршрута перемещения данных, находятся в строго определенных пределах;

гарантия потерь – условие, при выполнении которого потери данных не превышают заданную приложением долю пакетов в процессе их передачи от источника к потребителю.

Критерий минимума максимальной задержки передачи:

$$\max_{t \in T} \{t_{zi-BS}\} \rightarrow \min$$

где T – время работы системы; t_{zi-BS} – время задержки в доставке данных от узла i до базовой станции BS в момент времени t . Такой критерий может применяться для системы реального времени, которая требует необходимого уровня качества связи для каждого узла, причем недопустимо даже кратковременное ухудшение качества связи. Примерами таких систем являются: военные системы обнаружения объектов, системы контроля технического

состояния промышленных агрегатов, системы предупреждения аварий на промышленных объектах. Особенностью таких систем является возможная необходимость быстрой реакции в ответ на изменение параметров, регистрируемых сенсорами. Например, при появлении человека в опасной зоне необходимо немедленно отключить работающее там оборудование.

Критерий суммарной средней задержки:

$$M\{t_{zi-BS}\} \rightarrow \min$$

где N – количество узлов сети; $M\{t_{zi-BS}\}$ – математическое ожидание времени доставки данных от узла i до базовой станции. Включает в себя время непосредственной передачи, а также другие задержки, такие как время передачи на канальном уровне, ожидание в очередях узлов-маршрутизаторов и другие. Такой критерий подходит для систем, где единичная задержка доставки пакета не критична, однако в целом от сети ожидается эффективная производительность. В качестве примера можно привести системы для научных исследований, сбора статистической информации с целью дальнейшей обработки, системы учета для промышленных объектов. Предполагается, что сбор и обработка информации в таких системах – два разных, слабо связанных по времени этапа.

В работе [8] рассматриваются отличия в качестве обслуживания для БСС и в традиционных сетях:

необходимость простых алгоритмов поддержки качества обслуживания из-за ограниченности ресурсов узлов;

несбалансированный трафик от узлов мониторинга до базовой станции требует эффективных механизмов реализации QoS-передачи;

избыточность данных (несколько узлов мониторинга в одной зоне могут передавать одинаковые данные) требует применения алгоритмов их агрегации;

дополнительная сложность в реализации QoS из-за динамичность топологии;

необходимость учета балансировки расхода энергии между узлами сети;

механизмы QoS должны учитывать значительную размерность сети (сотни и тысячи узлов) и не деградировать при изменении плотности размещения узлов;

поддержка различных требований к качеству обслуживания от нескольких базовых станций;

наличие нескольких датчиков в узле может генерировать различные типы трафика с разной интенсивностью;

механизмы QoS должны приоритезировать трафик в зависимости от важности происходящих событий.

Обозначим множество интервалов времени $\Delta\tau_\phi$, когда сеть удовлетворяла требованиям по покрытию $K(\Pi)$ и мониторингу $K(MON)$, т.е. необходимое количество параметров (событий) отслежено в заданных областях и информация о них доставлена за заданное время на базовую станцию (удовлетворены $K(TKM)$).

Тогда сумма всех времен будет представлять собой интегральный показатель времени жизни сети

$$T_{ж} = \int_{\phi=1}^{\phi} T_{ж}(\Delta\tau_\phi)$$

до момента, когда время восстановления сети $\Delta t_{j \geq}^B \geq \Delta t_j^{B*}$ – максимальное время восстановления сети после сбоя, вызванных отказами узлов либо внешними факторами, превышает заданное значение. Данное определение имеет простой смысл – оно фиксирует момент времени, после которого события, возникающие в одной из областей мониторинга сети, не доставляются к базовой станции с заданным качеством, а восстановление либо не происходит, либо занимает время, превышающее установленный порог.

Необходимо отметить, что предложенные показатели эффективности могут выступать в качестве критериев при различных оптимизационных задачах (рис. 1): однокритериальных

и многокритериальных; в четкой и нечеткой постановке; быть статическими или зависимыми от времени, носить общий или частный характер.

Выводы. Рассмотрены различные аналитические модели оценки эффективности функционирования БСС. Определены множества показателей эффективности функционирования для каждой из функциональных подсистем системы управления БСС: мониторинга, телекоммуникационной, энергосберегающей. Предложено на первом этапе проводить оценку качества функционирования БСС каждой из подсистем по множеству собственных показателей; на втором – интегральную оценку для БСС в целом.

Предложенная оценка времени жизни сети по минимуму времени жизни ее функциональных подсистем позволяет анализировать причины отказов сети и наличие узких мест в ее функционировании. Направлением дальнейших исследований является использование предложенных моделей для постановки и решения оптимизационных задач функциональными подсистемами системы управления сетью и координации целевых функций управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж / О.В. Жук, А.І. Міночкін, В.А. Романюк // Збірник наукових праць № 2. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – С. 111 – 119.
2. Rawat P. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies / P.Rawat, K.-D.Singh, H.Chaouchi, J.Bonnin // The Journal of Supercomputing, April 2013.
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. Тужилкин О.В. Методы оценки эффективности работы сенсорной сети / О.В. Тужилкин, Н.С. Ульянин // Известия ЮФУ. Технические науки. – С. 28 – 32.
5. Dietrich I. On the Lifetime of Wireless Sensor Networks / I. Dietrich, F. Dressler // ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 5, no. 1, January 2009.
6. Wang B. Coverage problem in sensors networks: a survey / B. Wang // ACM computing survey. – № 43. – 2011. – P. 1 – 53.
7. Zhu C. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks / C. Zhu , C. Zheng, L. Shu, G. Han // Journal of Network and Computer Applications, no. 35, 2012. – P. 619 – 632.
8. Chen D. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey / D. Chen, P. K. Varshney // Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICON 2004). – P. 227 – 233.
9. Ерзин А. И. О максимизации времени функционирования сенсорных сетей при ресурсных ограничениях / А.И. Ерзин, Р.В. Плотников // Дискретный анализ и исследование операций, 2011, том 18, № 6. – С. 17 – 32.
10. Madan R. A. Goldsmith Cross-Layer Design for Lifetime Maximization in Interference-Limited Wireless Sensor Networks / R. Madan, S. Cui, S. Lall // IEEE Transaction on Wireless Communications, vol. 5, no. 11, 2006.
11. W. Wang, V. Srinivasan, K.-C. Chua Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks // MobiCom 2005.
12. Wu K. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks / K.Wu, Y.Gao, F.Li, Y.Xiao // Mobile Networks Application, vol. 10, no. 6, 2005. – P. 837 – 852.
13. Ефремов С.Г. Моделирование времени жизни динамически реконфигурируемых сенсорных сетей с мобильным стоком: дис. кан. техн. наук: 05.13.18 / Ефремов Сергей Геннадьевич – М, 2012. – 143 с.
14. Blough D. M. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks/ D. M. Blough, P. Santi // In 8th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, 2002. – P. 183 – 192.