

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ИНФРАСТРУКТУР ДЛЯ БЕСПРОВОДНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА¹

Аннотация. Рассматриваются основные подходы и технологии для построения самоорганизующихся беспроводных сетей для мониторинга широкого класса процессов и систем. Разработаны системные требования и трехуровневая инфраструктура системы распределенного мониторинга. Предложена математическая модель гетерогенной инфраструктуры для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга.

Ключевые слова: самоорганизующиеся беспроводные сети, система мониторинга, модель гетерогенной инфраструктуры.

Abstract. The paper considers basic approaches and technologies for self-organizing wireless networks assigned for a monitoring of a wide class of processes and systems. Authors have developed system requirements for the three-level infrastructure of distributed monitoring system. It's suggesting the mathematical model of a heterogeneous infrastructure for a wireless informational support of monitoring processes.

Keywords: self-organizing wireless networks, monitoring system, modeling of heterogeneous infrastructures.

Введение

Разнообразие задач и ситуаций, в которых применяется автоматизированный сбор информации, обуславливает широкий спектр типов и принципов функционирования датчиков с интеллектуальными возможностями первичной обработки и передачи информации. Совокупность интеллектуальных сенсоров с модулями беспроводной связи может использоваться для построения инфраструктуры системы распределенного мониторинга (СРМ) физических, химических, технических и других процессов. Модель подобной самоорганизующейся всепроникающей инфраструктуры миниатюрных взаимодействующих сенсоров принято называть «облаком интеллектуальной пыли» [1]. Определим некоторые системные требования к СРМ:

1. *Расширяемость и масштабируемость.* При разработке сенсорной СРМ необходимо учитывать возможность расширения и усложнения объекта мониторинга в процессе построения инфраструктуры СРМ.

2. *Мобильность.* Функциональность сенсорной СРМ не должна зависеть от пространственно-временной привязки активных сенсорных узлов.

3. *Гетерогенность.* Будем различать функциональную (информационную) гетерогенность – возможность эффективной работы разного типа датчиков в составе единой среды мониторинга, а также гетерогенность среды

¹ Работа выполнена в рамках проекта № 2.1.2/979 «Исследование методов и принципов управления информационными процессами в сенсорных и ячеистых сетях нового поколения» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)».

сбора, обработки и передачи информации (канальную) – возможность использования различных беспроводных и проводных сетевых технологий и протокольных стеков.

4. *Функциональная интеграция.* Данное требование означает интеграцию сенсорных датчиков, радиопередающих модулей, микроконтроллеров первоначальной обработки данных, контроллеров маршрутизации в едином интеллектуальном устройстве.

5. *Автономность.* Требование включает автономность низкого и сверхнизкого энергопитания устройств, максимально возможную независимость от источников внешнего питания, возможность управления режимами энергосбережения.

6. *Адаптивность.* Адаптация СРМ к объектам мониторинга означает возможность «тонкой» автонастройки на объект исследования без непосредственного участия человека на основе информации, отражающей текущее состояние этого объекта.

7. *Самоорганизация.* Это базовый синергетический принцип функционирования сложных открытых систем [2], к которым следует отнести СРМ.

8. *Децентрализация.* Данное требование, с одной стороны, относится к реализации в СРМ принципа децентрализованного управления процессами сбора, обработки и передачи информации в сенсорной среде. С другой стороны, определяет поддержку децентрализованного выбора информационных маршрутов в ячеистой или кластерно-ячеистой структуре облака «интеллектуальной пыли».

Архитектура сенсорной среды в виде «облака интеллектуальной пыли» характерна для динамических, изменяющихся как в пространстве, так и во времени сетей. Она может использоваться в прикладных областях, в которых практически неприменимы традиционные алгоритмы управления, известные принципы маршрутизации и существующие архитектурные решения распространенных беспроводных сетей.

1. Обзор технологий беспроводной передачи данных

Анализ достижений современной науки в области беспроводной передачи данных [3] позволяет выделить ряд технологий, которые в комплексе могут использоваться для создания гетерогенной самоорганизующейся инфраструктуры СРМ, отвечающей вышеуказанным требованиям. Перечислим основные из них.

ZigBee [1] – технология сверхнизкого энергопотребления, которая позволяет разрабатывать и эксплуатировать сенсорные сети сбора и передачи информации от разнородных датчиков без смены источников питания в течение нескольких лет.

Технология обладает малым энергопотреблением, надежностью передачи данных и защиты информации, совместима с устройствами различных производителей. ZigBee ориентирована на передачу данных в системах, где не выдвигаются жестких требований к задержкам при передаче данных. Эта технология позволяет охватить единой беспроводной сетью здания и другие крупные объекты с большим числом узлов (по стандарту – до 65 тыс.). Все это достигается за счет применения сложных механизмов маршрутизации сообщений, что позволяет передавать информацию через десятки промежуточных узлов сети к конечной точке.

В общем случае сеть ZigBee содержит узлы трех основных типов: координаторы, маршрутизаторы и оконечные сенсорные устройства. Координатор – обязательный узел, который образует сеть, выбирая для нее номер частотного канала и идентификатор. Затем к нему подключаются маршрутизаторы и оконечные устройства, количество которых можно наращивать.

Для экономии энергопотребления используются режимы синхронизированного доступа и «спящие» режимы работы сетевых устройств. Сетевые устройства «слушают» эфир и передают кадры в моменты времени, «привязанные» к сигналам маяков. В остальное время устройства находятся в спящем режиме. Сам координатор также находится в спящем режиме, переходя в активный режим в определенное время для подачи сигнала маяка и приема/передачи кадров. Эту ситуацию можно трактовать как гомогенное (однородное) управление процессом распределения мощности между всеми сетевыми устройствами.

Bluetooth [4] – технология беспроводного соединения мобильных устройств. Bluetooth – это радиоинтерфейс малой мощности, разработанный, прежде всего, для замены существующих кабельных и инфракрасных соединений офисной и бытовой электронной техники. В отличие от инфракрасной связи, технология Bluetooth разработана для организации как двухточечных соединений, так и многоточечного радиоканала не обязательно в зоне прямой видимости.

В спектре радиочастот системе беспроводной связи Bluetooth отведено 79 радиоканалов в диапазоне 2,4465–2,4835 ГГц (примерно по 1 МГц каждый). Модули Bluetooth способны передавать данные со скоростью до 720 кбит/с на расстояние от 10 до 100 м. Энергопотребление большинства передатчиков не превышает 10 мВт.

Соединение происходит автоматически, как только Bluetooth-устройства оказываются в пределах досягаемости, причем не только по принципу точка – точка (два устройства), но и по принципу точка – много точек (одно устройство работает с несколькими другими). В последнем случае устройства Bluetooth способны соединяться друг с другом, формируя пикосети, когда одно из устройств является ведущим (Master), еще семь – ведомыми (Slave). Несколько пикосетей могут перекрываться, образуя распределенную сеть (scatternet) с общим числом устройств до 256.

Технология беспроводного USB (Wireless USB – WUSB) [5] – базируется на концепции сверхширокополосной передачи данных (Ultra Wideband, UWB). UWB – это беспроводная технология, предназначенная для передачи данных на короткие (до 10 м) расстояния, с высокой пропускной способностью (до 480 Мбит/с) и низкой потребляемой мощностью. Основное назначение UWB – беспроводная передача высококачественного мультимедийного контента (например, видео) между устройствами бытовой электроники и периферийными устройствами персонального компьютера. Одно из основных преимуществ технологии UWB заключается в том, что она не создает помех для других беспроводных технологий, используемых в настоящее время, таких как WiFi, WiMAX и сотовой связи.

Принцип UWB связи подразумевает генерацию передатчиком множества импульсов в очень широком – порядка нескольких гигагерц, частотном спектре. Приемная часть преобразовывает импульсы в данные путем отслеживания схожих последовательностей импульсов. Современная технология

UWB описывает принцип модуляции сигнала как мультиплексирование по ортогональным несущим частотам (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Использование модуляции OFDM в совокупности с использованием ряда частотных диапазонов представляет суть технологии MultiBand OFDM.

Технология WiFi (Wireless Fidelity) [6] – технология беспроводной передачи цифровых данных по радиоканалам в рамках стандартов IEEE 802.11 b/g/n. Протокол IEEE 802.11b, принятый в июле 1999 г., предусматривает максимальную скорость передачи 11 Мбит/с при ширине спектра сигнала 22 МГц в частотном диапазоне от 2,4 до 2,4835 ГГц. Стандарт IEEE 802.11g является развитием стандарта 802.11b и предполагает передачу данных в том же частотном диапазоне, но с более высокими скоростями. Кроме того, стандарт 802.11g полностью совместим с 802.11b. Максимальная скорость передачи в стандарте 802.11g составляет 54 Мбит/с. Развитием стандарта 802.11g является черновой стандарт 802.11n (draft), в рамках которого скорость передачи данных повышается теоретически до 480 Мбит/с в двух диапазонах: 2,4 или 5,0 ГГц.

2. Математическое моделирование гетерогенных инфраструктур для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга

Предлагаемая инфраструктура для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга в общем случае представляет собой иерархическую систему, состоящую из трех уровней (рис. 1).

1. Нижний уровень – совокупность встраиваемых или автономных интеллектуальных объектов ZigBee и Bluetooth-модулей, обеспечивающих сбор и обработку телеметрической, биометрической и мультимедийной информации от источников и ее передачу в центры-координаторы первичного накопления данных. Организация инфраструктуры нижнего уровня имеет ряд важных особенностей, среди которых, во-первых, параллельное использование нескольких беспроводных технологий (ZigBee, Bluetooth) и, во-вторых, ячеистая самоорганизующаяся структура сенсорных кластеров.

Узлы нижнего уровня предназначены только для сбора информации и не поддерживают возможность ретрансляции и маршрутизации «чужих» информационных пакетов. Они непосредственно связаны по звездообразной топологии с координаторами второго уровня и образуют первичные сенсорные кластеры.

Управление связями и синхронизация работы узлов на данном уровне инфраструктуры осуществляется узлами-координаторами (для ZigBee-сенсоров) и Master-устройствами (для Bluetooth-модулей). Координаторы предлагают узлам нижнего уровня алгоритмы управления энергопитанием для оптимизации энергопотребления за счет гибкого чередования периодов их активного и спящего состояний. Количество, местоположение, тип датчиков, стратегия «бесшовной» интеграции технологий беспроводных сетей на уровне IP пакетов определяются создаваемой СРМ, динамикой протекающих информационных процессов, характером и особенностями исследуемых объектов и субъектов.

2. Средний уровень – совокупность простейших вычислительных устройств (персональные компьютеры, ноутбуки, микрокомпьютеры), имеющих

возможность организации беспроводных каналов связи с устройствами нижнего и верхнего уровней (Bluetooth, WiFi), предназначенных для промежуточного накопления первичной телеметрии. Основное назначение устройств среднего уровня: устранение проблемы информационной и канальной гетерогенности (свойственной нижнему уровню инфраструктуры), а также приведение потоков первичных данных к единому унифицированному формату. Кроме этого, устройства среднего уровня решают проблему пространственных ограничений, накладываемых технологиями ZigBee и Bluetooth. Каждое такое устройство обеспечивает прием телеметрии от группы датчиков нижнего уровня, локализованных в пределах ограниченного пространства (от 10 до 100 м), унифицирует получаемые данные и с установленной периодичностью отправляет накопленные данные на верхний уровень инфраструктуры по беспроводной сети WiFi.

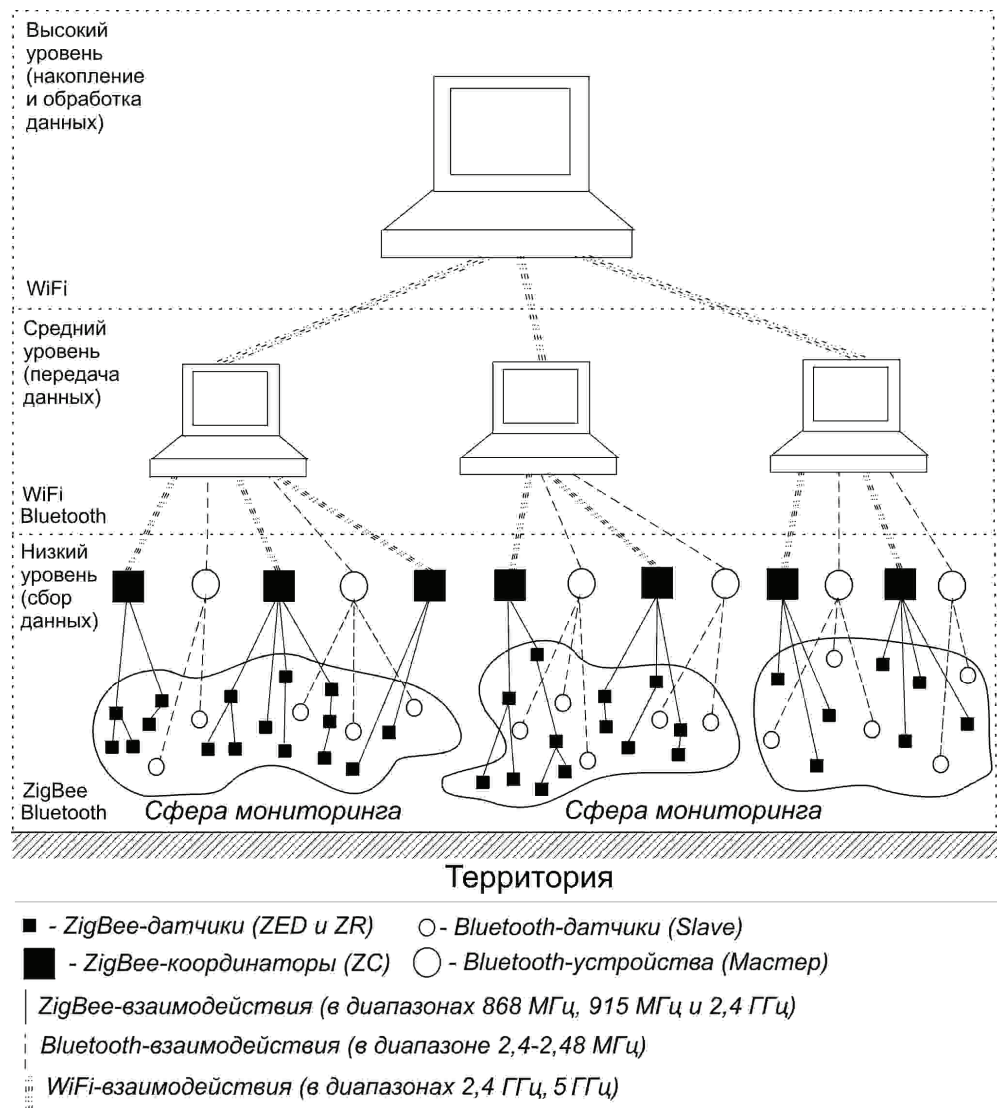


Рис. 1. Схема гетерогенной инфраструктуры для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга

3. Высокий уровень представляет собой центральный сервер или группу серверов, предназначенных для сбора потоков данных от устройств среднего уровня, представления информации в виде централизованной базы данных, обработки поступающих данных в реальном режиме времени.

Моделирование подобного рода гетерогенных инфраструктур сбора информации требует наличия математической модели, которая отражала бы такие особенности, как:

- 1) четкая идентификация уровней инфраструктуры;
- 2) описание процессов информационного взаимодействия внутри уровней по горизонтали и между уровнями по вертикали;
- 3) возможность оперативного (в реальном режиме времени) описания динамически меняющихся структур виртуальных связей самоорганизующихся кластерных ячеек на горизонтальных и вертикальных уровнях инфраструктуры;
- 4) возможность определения маршрутов различных информационных потоков (от объекта исследования до центральной базы данных) и выявления узких и проблемных мест (с точки зрения пропускной способности, времени отклика, управления энергопотреблением, разрешения конфликтов при интерференции радиоволн и т.п.);
- 5) возможность пространственно-временной привязки интеллектуальных сенсоров посредством радиочастотных RFID маркеров (Radio-Frequency Identification – радиочастотная идентификация) локального или глобального позиционирования для моделирования поведения объектов в условиях их реального функционирования.

Для решения перечисленного комплекса задач предлагается использовать гиперграфовую модель с расширенным набором свойств.

Пусть имеется гиперграф

$$G = (V_{\{x,y\}}^{id}, U_{\text{const}}^{id}, U_{\text{var}}), \quad (1)$$

где V – множество вершин, описывающих элементы инфраструктуры (датчики, координаторы, вычислительные устройства, сервера); id и $\{x, y\}$ – весовые атрибуты вершин и некоторых гиперребер; U_{const} – гиперребра постоянной инцидентности (множество вершин, инцидентных любому гиперребру из U_{const} , с течением времени остается постоянным); U_{var} – гиперребра переменной инцидентности (множество вершин, инцидентных любому гиперребру из U_{var} , может меняться с течением времени).

С точки зрения тематики предметной области множество вершин (множество V) является гетерогенным, поскольку моделирует различные и зачастую несовместимые друг с другом виды устройств. Для практического использования такой модели необходимы механизмы классификации вершин с произвольно выбранных точек зрения. Структура гиперребер графа G играет роль такого механизма, где каждое гиперребро выступает определенным классом, включающим подмножество вершин со сходными свойствами (рис. 2).

Гиперребра из множества $U_{\text{const}} (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, $n = \text{const}$, описывают классы вершин с точки зрения уровней инфраструктуры (иерархическая классификация), а также на низком уровне – типы датчиков, работающих по одной технологии (типологическая классификация). На протяжении всего процесса сбора и обработки информации иерархическая и типологическая классификации элементов инфраструктуры остаются неизменными.

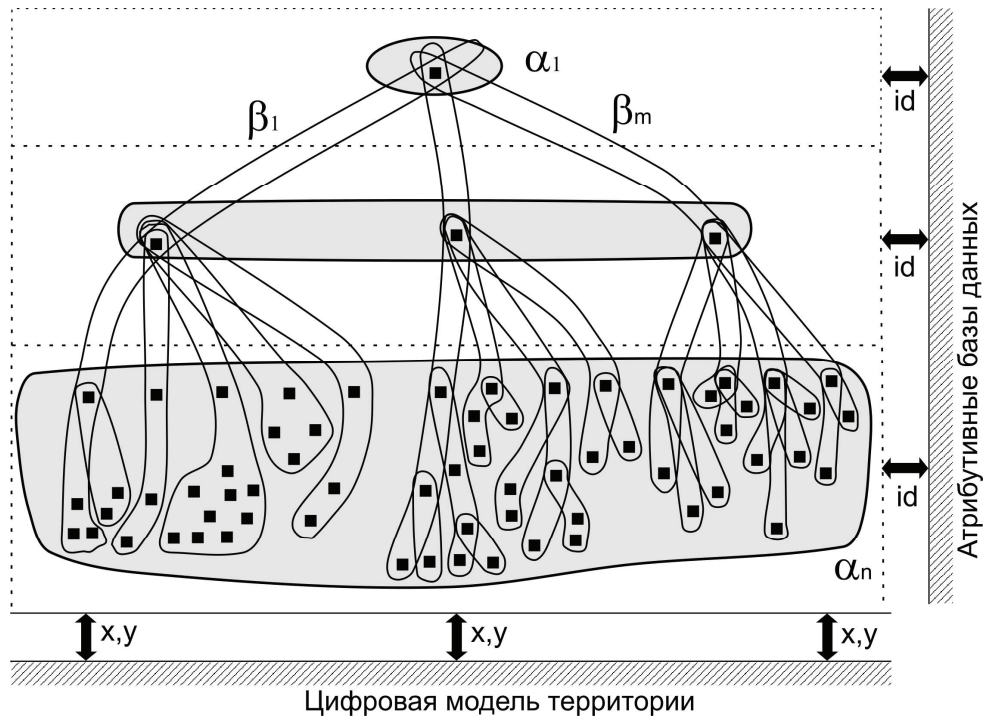


Рис. 2. Гиперграфовая модель гетерогенной инфраструктуры сбора информации

Гиперребра из множества U_{var} ($\beta_1, \dots, \beta_m$), $m \neq \text{const}$, описывают маршруты информационных потоков как внутри отдельных уровней иерархии, так и при межуровневом взаимодействии. Динамика изменения структуры маршрутов может быть достаточно высокой, и на уровне модели она будет описываться в реальном режиме времени изменением структуры гиперребер множества U_{var} .

Семантическое описание модели осуществляется за счет атрибутивной базы данных (БД) реляционного вида, где каждому элементу инфраструктуры (вершине гиперграфа) соответствует запись в БД, содержащая информацию о типе, технических характеристиках и т.п. этого элемента. Кроме элементов, семантическое описание (связь с атрибутивной БД) имеют статические гиперребра из множества U_{const} . Логическая и физическая связь с атрибутивной БД осуществляется за счет специальных весовых атрибутов id , которые имеются у каждой вершины и у гиперребер множества U_{const} .

Другой важной особенностью модели является пространственная привязка гиперграфа за счет весовых атрибутов $\{x, y\}$, которые имеются у каждой из вершин. Атрибуты $\{x, y\}$ – это пара числовых координат, однозначно описывающих местоположение элемента инфраструктуры в пространстве. Пространство описывается цифровой моделью территории (цифровой картой), сформированной в общепринятой для географических карт проекции, системе координат, условных знаков и способов изображения.

Подобная организация модели позволяет:

- отслеживать динамически изменяющуюся структуру информационных потоков в горизонтальном и вертикальном разрезе иерархических уровней;

- определять альтернативные и отбирать наиболее и наименее эффективные маршруты информационных потоков;

- привязывать маршруты информационных потоков к модели реальной сенсорной сети с учетом географических и территориальных особенностей расположения объектов исследования и их мобильного характера, а также учитывать факторы окружающей среды;

- для каждого информационного маршрута в каждый момент времени иметь детальное описание технических характеристик элементов сбора и передачи данных (частотные диапазоны, технология беспроводной связи, энергопотребление, уровень помехозащищенности, уровень и способ защиты передаваемых данных, скорость передачи данных, пропускная способность в каждом его узле и т.п.);

- моделировать совместимость информационных маршрутов в пределах ограниченных территориальных участков при использовании различных технологий беспроводной передачи и работающих в одних и тех же частотных диапазонах;

- моделировать совместимость информационных маршрутов с другими инфраструктурами окружающей среды, имеющими оборудование, использующее те же или близкие частотные диапазоны;

- оптимизировать структуру информационных маршрутов за счет поиска их узких мест (узлов с недостаточной пропускной способностью или производительностью) или, наоборот, узлов, технические возможности которых используются не в полной мере;

- оптимизировать структуру информационных маршрутов с точки зрения совокупной минимизации энергопотребления образующих их узлов.

Основными механизмами для обеспечения перечисленных возможностей являются:

1. Реализация стандартных гиперграфовых и графовых алгоритмов: поиск кратчайших путей, построение минимальных деревьев, нахождение изоморфизма, решение задачи о максимальном потоке, поиск циклов и независимых подмножеств, раскраска графа и т.п.;

2. Реализация нестандартных алгоритмов, вытекающих из возможностей расширенной гиперграфовой модели (1). В качестве таких алгоритмов могут быть рассмотрены булевы операции между гиперребрами (вычитание, объединение, пересечение) – безусловные и условные. Например, для выбранной совокупности гиперребер – поиск общих вершин (безусловная операция пересечения). Для выбранной совокупности инцидентных гиперребер – поиск вершин, находящихся в определенных территориальных границах и соответствующих одной и той же технологии беспроводной передачи данных (условная операция объединения). Таким образом, условные булевы операции между гиперребрами подразумевают включение в саму операцию дополнительных фильтров (условных правил для тех или иных атрибутов вершин и ребер).

3. Реализация алгоритмов работы с реляционными базами данных (поиск, сортировка, калькуляция и т.п.).

4. Реализация алгоритмов интеллектуального анализа данных (кластеризация, классификация, ассоциация, поиск последовательностей, поиск временных закономерностей).

5. Реализация алгоритмов позиционирования интеллектуальных сенсоров и пространственного анализа сети. Эта возможность обеспечивается за

счет пространственной привязки гиперграфа, что позволяет в полной мере использовать аналитический аппарат геоинформационных технологий.

Заключение

Предлагаемый подход к моделированию гетерогенных инфраструктур СРМ является удобным и эффективным средством для аналитических исследований способов построения сенсорных мониторинговых сетей с разными принципами управления информационными потоками и маршрутизации передачи трафика. Методы управления информационными потоками базируются на синергетическом принципе самоорганизации единого гетерогенного информационного пространства с возможностью передачи мультимедийных потоков от устройств различных классов, начиная от сенсорных датчиков до мобильных телефонов и цифровых видеокамер по «всепроникающей» беспроводной сети нового поколения.

Предлагаемая математическая модель предоставляет широкие возможности для исследования единой гетерогенной среды как с точки зрения ее структуры, так и с точки зрения организуемых ею информационных потоков. Особый набор свойств модели позволяет использовать не только классический аппарат теории графов, но и интегрировать ее с технологиями оперативного анализа данных (OLAP), интеллектуального анализа данных (DataMining), геоинформационными системами (ГИС) для решения конкретных прикладных задач.

Список литературы

1. **Варгаузин, В. А.** Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / А. В. Варгаузин // Теле-Мультимедиа. – 2005. – № 6. – С. 23–27.
2. **Финогеев, А. Г.** Моделирование и исследование системно-синергетических процессов в информационных средах : монография / А. Г. Финогеев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – 223 с.
3. **Финогеев, А. Г.** Беспроводные технологии передачи данных для создания систем управления и персональной информационной поддержки [Электронный ресурс] / А. Г. Финогеев // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». – 2008. – 51 с. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window/library?p_rid=56177
4. **Архипкин, В. Я.** Bluetooth. Технические требования. Практическая реализация. Приложения / В. Я. Архипкин, А. В. Архипкин. – СПб. : Питер, 2004. – 203 с.
5. **Татарников, О. А.** Wireless USB / О. А. Татарников // КомпьютерПРЕСС. – 2006. – № 4. – С. 84–86.
6. **Крылов, Ю. В.** IEEE 802.11n / Ю. В. Крылов // Беспроводные технологии. – 2006. – №3. – С. 14–20.

Бершадский Александр Моисеевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой систем
автоматизированного проектирования,
Пензенский государственный
университет
E-mail: bam@pnzgu.ru

Bershadsky Alexander Moiseevich
Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of CAD systems,
Penza State University

Финогеев Алексей Германович

доктор технических наук, профессор,
кафедра систем автоматизированного
проектирования, Пензенский
государственный университет

E-mail: finogeev@sura.ru

Finogeev Aleksey Germanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of CAD systems,
Penza State University

Бождай Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра систем автоматизированного
проектирования, Пензенский
государственный университет

E-mail: bam@pnzgu.ru

Bozhday Alexander Sergeevich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of CAD systems, Penza State University

УДК 621.391:007

Бершадский, А. М.

Разработка и моделирование гетерогенных инфраструктур для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга /
А. М. Бершадский, А. Г. Финогеев, А. С. Бождай // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1 (13). – С. 36–45.