На правах рукописи

Терентьев Максим Николаевич

МЕТОД ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ НА БАЗЕ ДИСКРЕТНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Специальность 05.13.15
«Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010 год

Работа выполнена на кафедре 609 «Прикладная информатика» Аэрокосмического факультета Московского авиационного института (государственного технического университета, МАИ)

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Падалко Сергей Николаевич**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, старший научный сотрудник **Ляхов Андрей Игоревич**, заведующий лабораторией методов анализа и синтеза сетевых протоколов ИППИ РАН им. А.А. Харкевича
	кандидат технических наук, доцент **Кудряшов Сергей Вячеславович**, технический директор ООО «ИНФО ПОЛИТЕН»
Ведущая организация:	ОАО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»

Защита состоится «___» _____ 2010 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.01 в Московском авиационном институте (государственном техническом университете, МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета, МАИ).

Отзывы, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, МАИ, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.01,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Корнеенкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Задача обеспечения измерений параметров в различных точках объектов наблюдения/управления (далее – *объектов обслуживания*) с последующей передачей результатов измерений в центр сбора, хранения и обработки данных (ЦОД) является типовой при создании таких объектов и имеет глубокие исторические корни. Средства и методы решения данной задачи, называемой далее *задачей мониторинга параметров* объекта обслуживания, на протяжении всей истории её решения постоянно совершенствуются. Рубежным при создании систем мониторинга параметров (СМП) можно считать переход на использование цифровых технологий. В развитие этих технологий с конца 1990-х годов активно развивается направление, связанное с созданием СМП на базе беспроводных сенсорных сетей (БСС).

Основной особенностью БСС является использование радиоканала для передачи в ЦОД результатов измерений из различных точек объекта обслуживания. СМП при этом представляют собой множество связанных радиоканалами и работающих по единому алгоритму узлов, устанавливаемых в заданных точках измерений. В состав этих узлов, помимо датчиков, входят микропроцессор, приемник-передатчик и обеспечивающий их энергией автономный источник питания. Беспроводной характер связи, а именно, отсутствие проводов, связывающих датчики с ЦОД, открывает принципиально новые возможности создания СМП. Это особенно существенно для случаев, когда датчики должны быть установлены на подвижных элементах объекта обслуживания или, как будем говорить далее, если объект обслуживания может *изменять конфигурацию* во время работы.

Известно, что использование БСС при построении СМП, наряду с преимуществами, порождает, как минимум, две актуальные на сегодняшний день проблемы. Первая из них связана с возможностью потери части результатов измерений при их передаче в ЦОД из-за разрывов связей по радиоканалу между узлами и ЦОД вследствие изменения конфигурации объекта обслуживания, в первую очередь, изменения положения его частей, содержащих узлы и источники помех. Данная проблема может быть сформулирована как необходимость повышения относительной доли успешно дошедших до ЦОД результатов измерений, которую далее будем определять как *надежность* СМП. Вторая проблема связана с необходимостью экономного расхода энергии автономных источников питания узлов во избежание их частой смены или, как будем говорить далее, с целью *повышения долговечности* узлов. Данная проблема, как правило, решается за счет перевода работы узлов на дискретный режим, в котором активные фазы чередуются с фазами сна, когда узлы работают с пониженным энергопотреблением. Это, в свою очередь, чревато потерей данных при чрезмерном сжатии активных фаз в

интересах экономии энергии, а также порождает дополнительную проблему – проблему синхронизации шкал времени внутренних часов узлов сети.

Успешное решение названных проблем позволит расширить использование значительных потенциальных возможностей БСС при построении СМП объектов обслуживания с изменяемой конфигурацией. На решение этих проблем направлена представленная диссертационная работа, что свидетельствует о её актуальности.

Целью работы является сокращение потерь данных в СМП, создаваемых на базе дискретных БСС, при передаче результатов измерений в ЦОД по радиоканалу из различных точек объекта обслуживания с изменяемой конфигурацией и повышение долговечности узлов, работающих в дискретном режиме.

Объект исследования: функционирование системы мониторинга параметров объекта обслуживания изменяемой конфигурации на базе дискретной беспроводной сенсорной сети.

Предмет исследования: разработка метода функционирования СМП объекта обслуживания изменяемой конфигурации на базе дискретной БСС, позволяющего достичь заданных значений показателей функционирования СМП.

Методы исследования: основаны на методах имитационного моделирования и статистических испытаний, а также экспериментального определения характеристик аппаратуры.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней для достижения поставленной цели предложен метод функционирования СМП, базирующийся на следующих новых положениях:

1) структура взаимодействия узлов сети формируется для каждого сеанса измерений адаптивно к текущей конфигурации объекта обслуживания на основе физических адресов узлов;
2) синхронизация шкал времени внутренних часов узлов выполняется с учетом фактических задержек передачи сообщений с эталонным временем;
3) производятся оценка отклонения скорости хода часов от эталона и применение этой оценки для повышения точности момента пробуждения узла.

Практическая значимость полученных в работе результатов заключается в том, что в совокупности они обеспечивают проектирование и практическую реализацию систем мониторинга параметров объектов с изменяемой конфигурацией на базе дискретных БСС, функционирующих на основе предложенного метода. Применение данного метода позволяет

увеличить долговечность узлов системы на 30-40% при фиксированном уровне потерь результатов измерений или снизить уровень этих потерь на 10-15% при заданной долговечности узлов.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Метод функционирования СМП объектов с изменяемой конфигурацией на базе дискретной БСС, обеспечивающий адаптивное формирование структуры взаимодействия узлов сети и их синхронизацию с учетом фактических задержек передачи эталонного времени и нестабильности характеристик осцилляторов узлов в период сна.
2. Модель функционирования СМП на базе предложенного метода, состоящая из имитационного блока (моделирование формирования структуры взаимодействия узлов, автономной работы узлов, нестабильности характеристик их осцилляторов), правил обработки результатов имитационного моделирования и вычислительного блока (расчет долговечности узлов).
3. Инструментальный комплекс, обеспечивающий проектирование (анализ и выбор рациональных параметров СМП на основе разработанной модели) и реализацию (на основе разработанной специализированной операционной системы) СМП, функционирующей согласно предложенному методу.
4. Результаты практической апробации предложенного метода и разработанных в его обеспечение модели и инструментального комплекса при решении задачи построения экспериментальной системы мониторинга параметров психофизиологического состояния космонавтов на борту Международной космической станции (МКС).

Апробация работы и публикации

Основные результаты доложены и обсуждены на международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании ИНФОТЕХ–2009» (Севастополь, 2009), третьей международной конференции «Системный анализ и информационные технологии САИТ-2009» (Москва, 2009), 8-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009» (Москва, 2009), четвертой Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» (Оренбург, 2009), международной конференции «Distributed Computer and Communication Networks. Theory and Applications» (DCCN-2010).

Список публикаций по теме диссертации содержит 8 наименований, из них два – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Достоверность результатов подтверждается строгостью изложения, корректным использованием математического аппарата, методов имитационного моделирования и статистических испытаний, а также проведения экспериментов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из четырех глав, заключения, списка литературных источников из 65 наименований. Работа изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу особенностей и проблем создания систем мониторинга параметров объекта обслуживания изменяемой конфигурации на базе дискретных БСС. При этом выделены три задачи, решаемые далее в представленной работе. Первая из этих задач следует из непостоянства конфигурации объекта обслуживания в процессе функционирования системы мониторинга. При её решении требуется обеспечить гибкое (адаптивное к текущей конфигурации объекта обслуживания) формирование структуры взаимодействия узлов СМП в зависимости от текущих условий их обмена радиосигналами. Следующие две задачи вытекают из дискретного характера функционирования системы мониторинга и направлены на повышение долговечности её узлов за счет более эффективной синхронизации их шкал времени. Решения трех названных задач находятся в тесной взаимосвязи. В работе они объединены в единый метод функционирования СМП объектов с изменяемой конфигурацией. В рассматриваемой главе приведены основные положения данного метода и общая схема функционирования СМП на его основе.

БСС обладают следующими характерными особенностями: 1) для передачи информации используется электромагнитное излучение, 2) мощность передатчиков узлов не превышает 1 мВт, 3) скорость передачи данных в БСС не более 250000 бит в секунду, 4) узлы БСС оснащены датчиками для измерения значений полей физических величин. Таким образом, в состав узла БСС входят: микропроцессор, приемник-передатчик, датчики, источник питания (ИП). По своей роли узел БСС может быть измерителем (он выполняет измерения), маршрутизатором (он обеспечивает связность сети) или шлюзом (этот узел обеспечивает передачу полученных данных в ЦОД).

Из названных особенностей БСС следуют две группы проблем. Первая из них связана с тем, что при использовании радиоканала для передачи результатов измерений в условиях малой мощности узлов, сложной и изменяющейся конфигурации объекта обслуживания и зашумленности эфира возможна потеря результатов измерений того или иного узла в процессе их доставки до шлюза. Данная проблема порождает задачу сокращения потерь информации при передаче результатов измерений от каждого узла-датчика шлюзу сети. Далее будем определять её как обеспечение надежности СМП, а количественную характеристику потерь информации считать основным критерием оценки системы мониторинга.

Вторая группа проблем связана с обеспечением узлов сети электропитанием. Она обусловлена необходимостью использования в БСС

автономных источников питания, т.к. использование сетевых ИП требует прокладывания проводов для питания узлов и делает использование беспроводной технологии для передачи данных бессмысленным. В свою очередь необходимость использования автономных источников питания, срок службы которых без принятия специальных мер может оказаться неприемлемо коротким, порождает проблему обеспечения долговечности СМП, количественная характеристика которой определяется временем исчерпания заряда ИП узлов сети и также рассматривается как критерий оценки СМП.

При произвольном расположении узлов, особенно учитывая возможность их перемещений, наличия нерадиопрозрачных перегородок и т.п. не все узлы-измерители обладают возможностью непосредственного обмена сообщениями по радио с узлом-шлюзом. Это объясняется малой мощностью передатчиков, наличием препятствий для распространения радиосигналов и зашумленностью эфира. В этих условиях с целью недопущения потери информации в СМП или, другими словами, для обеспечения связности сети, на её узлы возлагается задача приема и ретрансляции результатов измерений других узлов, не имеющих связи со шлюзом. При этом предусматривается возможность построения цепочек ретрансляций при доставке данных от некоторых узлов до шлюза. В итоге маршруты доставки сообщений от узлов-измерителей БСС до шлюза в общем случае представляют собой древовидную структуру.

Очевидно, что возможны ситуации, когда не существует маршрута доставки сообщений от отдельных узлов до шлюза, используя только узлы-датчики. В таких случаях в состав БСС вводят маршрутизаторы. Их принципиальным отличием от узлов-измерителей является то, что они не «привязаны» к директивно заданным точкам измерений. Их число и места расположения являются предметом выбора при проектировании СМП.

Выбирая количество и расположение маршрутизаторов, можно построить систему маршрутов доставки сообщений с данными измерений от каждого узла до шлюза. Однако, при изменении конфигурации объекта обслуживания, в первую очередь, при изменении положения его частей, на которых расположены датчики, маршрутизаторы и источники помех, возможна потеря радиовидимости узлов, связанных заранее зафиксированным маршрутом. Следовательно, передаваемые при этом результаты измерений будут потеряны. Данная проблема усугубляется тем, что на практике изменения конфигурации часто носят случайный характер.

Проблема повышения долговечности узлов решается путем организации дискретного режима работы узлов, при котором функционирование каждого узла состоит из двух последовательно сменяющих друг друга фаз: фазы активной работы и фазы сна. На фазе активной работы узлы выполняют свои функции, расходуя энергию ИП без ограничений. На фазе сна узлы не выполняют полезной работы, практически не потребляя энергии. В дальнейшем такого рода БСС будем называть дискретными. Суммарная длительность t^* обеих названных фаз для данной СМП задается директивно.

Очевидным преимуществом дискретных БСС является повышение долговечности в 10-1000 раз. В то же время, область применения БСС в случае

их дискретного режима работы несколько сужается: так как узлы выполняют свою работу только в период активной фазы, исключается непрерывное получение данных от датчиков, входящих в состав узлов.

Использование дискретного режима функционирования БСС, решая проблему долговечности ИП, в свою очередь, порождает новую весьма существенную проблему – проблему синхронизации работы её узлов, степень успешности решения которой прямо влияет и на долговечность, и на надежность сети в целом. Источником данной проблемы является тот факт, что отправленное одним узлом сообщение может быть принято другими узлами только тогда, когда они также находятся в активной фазе. В противном случае сообщение будет потеряно.

Предлагаемый метод функционирования СМП объектов обслуживания с изменяемой конфигурацией узлов направлен на комплексное решение как проблемы надежности передачи результатов измерений, так и проблемы долговечности узлов.

Взаимодействие узлов осуществляется путем обмена сообщениями двух видов: сообщениями, связанными с эталонным временем, при синхронизации часов узлов, и сообщениями с результатами выполненных измерений.

При синхронизации выполняются следующие действия:

1) с периодичностью t^* все узлы сети, включая шлюз, переходят в активную фазу функционирования;
2) шлюз как источник эталонного времени в широковещательном режиме передает сообщение с эталонным временем;
3) узлы в начальный период активной фазы находятся в состоянии ожидания/приема сообщения с эталонным временем;
4) одна часть узлов получает сообщения с эталонным временем и выполняет соответствующие действия по коррекции своих часов. Адрес узла, от которого получено сообщение с эталонным временем, запоминается в памяти узла-приемника. После этого данная часть узлов может стать источником эталонного времени для узлов, до которых по тем или иным причинам при текущей конфигурации объекта обслуживания не дошли сообщения с эталонным временем. Эта часть узлов продолжает находиться в состоянии ожидания;
5) узлы, получившие сообщения эталонного времени и синхронизировавшие свои часы, посылают сообщения с эталонным временем также в широковещательном режиме для еще не синхронизированных узлов.
6) и т.д., переходя к п. 3.

Для предложенного метода принципиально важно, что отправка синхронизирующих сообщений выполняется в широковещательном режиме, что означает следующее: сообщение, переданное одним из узлов, доставляется всем узлам, которые могут его принять в силу своего положения в пространстве относительно передатчика при воздействии помех. Это обеспечивает возможность синхронизации нескольких узлов одним сообщением, исходящим от одного узла. Тогда в результате выполнения представленной рекурсивной

процедуры может быть зафиксирована структура взаимодействия узлов в процессе синхронизации, имеющая древовидный характер, вершиной которой является шлюз. В предлагаемом методе структура взаимодействий узлов фиксируется в виде отдельных упорядоченных пар:

- идентификатор синхронизирующего узла;
- идентификатор синхронизируемого узла.

В дальнейшем структуру взаимодействия узлов будем называть деревом ретрансляций (ДР). Оно строится на этапе синхронизации часов узлов при ретрансляции сообщений с эталонным временем сверху вниз, от шлюза к узлам. При выполнении измерений их результаты ретранслируются снизу вверх, от узлов к шлюзу.

В качестве уникального идентификатора узла предлагается использовать его физический адрес в сети, который, согласно стандарту IEEE 802.15.4, является обязательным атрибутом узла. Тогда названная выше пара реализуется в виде пары адресов взаимодействующих узлов и хранится на синхронизируемом узле (рис. 1).

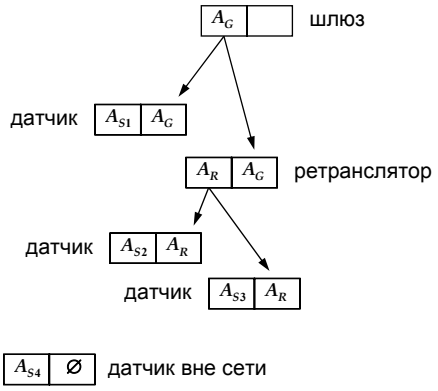

Рис. 1. Использование адресных атрибутов при построении дерева ретрансляций.

Для повышения точности синхронизации предлагается выполнять следующие действия:

1) при передаче эталонных отметок времени измерять фактическую величину задержки доступа к каналу, а результат использовать в качестве поправки к эталонной отметке времени (рис. 2);

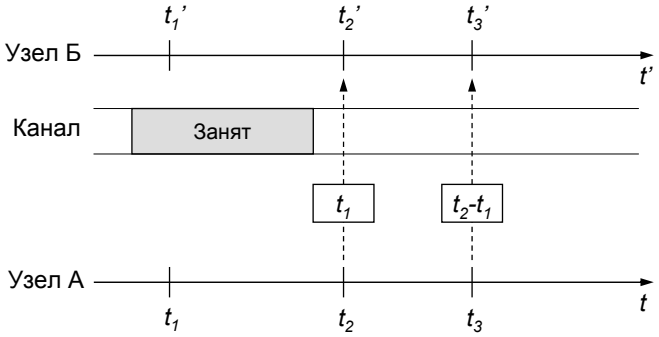

Рис. 2. Измерение фактической величины задержки доступа к каналу.

2) оценивать отклонение скорости хода часов узла от эталона, и эту оценку использовать для уточнения момента пробуждения узла.

<u>Вторая глава</u> работы посвящена построению модели функционирования СМП согласно предложенному методу.

Объект обслуживания Ω представлен своими внутренними обводами, состоящими из множества твердых тел $\{\mathfrak{B}_k\}$, множеством помех $\{W_l\}$, температурой T:

$$\Omega = \left(\{\mathfrak{B}_k\}, \{W_l\}, T\right). \tag{1}$$

При этом каждый источник помех определяется в виде

$$W = \left(Y, V\right), \tag{2}$$

где $Y = \left(y^1, y^2, y^3\right)$ – координаты помехи в декартовой системе координат объекта обслуживания, V – мощность излучения помехи в заданном диапазоне.

Узлы Θ сети определяются набором:

$$\Theta = \left(A, Z, X, F, \Upsilon, H, \widehat{A}\right), \tag{3}$$

где A – уникальный физический адрес узла в сети, Z – признак функционального назначения узла, принимающий значения

$$Z = \begin{cases} Z^{\text{шлюз}}, & \text{если узел является шлюзом} \\ Z^{\text{измеритель}}, & \text{если узел является измерителем} \\ Z^{\text{ретранслятор}}, & \text{если узел является ретранслятором} \end{cases}, \tag{4}$$

$X = \left(x^1, x^2, x^3\right)$ – координаты узла в декартовой системе координат объекта обслуживания, F – параметры аппаратуры узла, Υ – параметры осциллятора узла, H – параметры алгоритма работы узлов, $\widehat{A}$ – адрес узла, являющегося родителем A в ДР.

ДР представлено в виде множества упорядоченных пар:

$$\Psi = \left\{\left(A_i, \widehat{A_i}\right)\right\}, i = \overline{1, N}, \tag{5}$$

где N – общее число узлов СМП.

Таким образом, СМП определяется тройкой $\left(\Omega, \{\Theta\}, t^*\right)$. Ее основными показатели являются надежность P^* и долговечность t_{LC}. Надежность СМП характеризует свойства данной системы, связанные с доставкой результатов измерений, полученных узлами-датчиками за некоторый заданный период $\tilde{t}$, узлу-шлюзу и определяется в виде:

$$P^* = \frac{M_{OK}}{M_{ALL}}, \tag{6}$$

где M_{OK} – число полученных шлюзом сообщений с результатами измерений за некоторый заданный период $\tilde{t}$, M_{ALL} – число сообщений с

результатами измерений, которые должен получить шлюз за этот период. Считая $\tilde{t}$ кратным t^*, получим:

$$M_{ALL} = \frac{\tilde{t}}{t^*} N_S, \tag{7}$$

где N_S - число узлов-измерителей в СМП. Так как $\tilde{t}$, t^* и N_S являются известными величинами, определение надежности (6) сводится к определению M_{OK} – числа сообщений с результатами измерений, полученных шлюзом.

На формируемую модель возлагаются две следующие задачи.

1. Исходя из выбранных параметров алгоритма H, определить число M_{OK} успешно доставленных результатов измерений и диагностировать причины недоставки остальных $M_{ALL} - M_{OK}$ результатов измерений.
2. Исходя из выбранных параметров алгоритма H, определить долговечность t_{LC} узлов СМП.

Разрабатываемая модель учитывает множество недетерминированных и часто не имеющих формульного выражения связей и факторов. Поэтому модель сформируется из двух частей: имитационной и вычислительной, связанных специальной процедурой обработки данных имитационного моделирования. В соответствии с этим разрабатываемая ниже модель имеет следующую структуру (рис. 3).

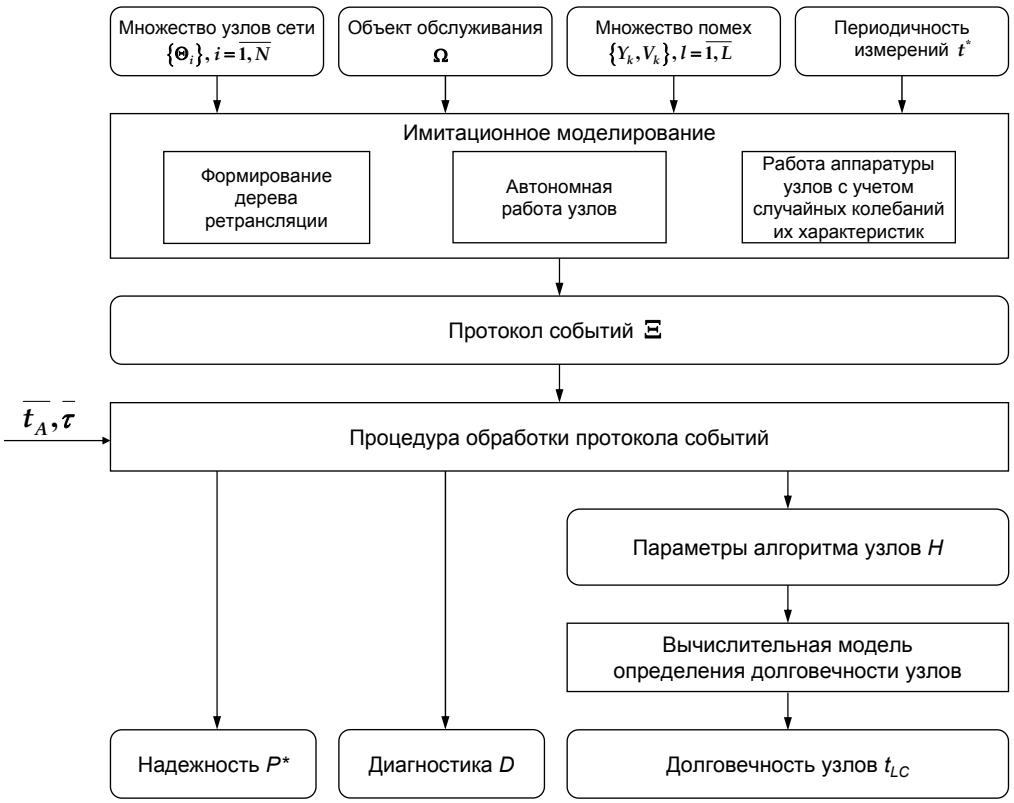

Рис. 3. Структура модели.

Рассмотрим имитационную часть модели. Она состоит из трех блоков: 1) формирование ДР, 2) автономная работа узлов в соответствии с алгоритмом, диктуемым предложенным принципом синхронизации узлов, 3) работа аппаратуры узлов с учетом случайных колебаний их характеристик.

Основной задачей блока формирования ДР Ψ является формирование дерева ретрансляций как множества пар $\left(A_i, \widehat{A_i}\right)$, каждая из которых хранится на i-ом узле. Исходными данными для её решения являются данные о текущей конфигурации объекта обслуживания и параметров узлов. Данное формирование, производится для каждого сеанса измерений (для каждой активной фазы) на основе рассылаемых сообщений с эталонным временем рекурсивно, начиная со шлюза.

В основу формирования дерева ретрансляций Ψ положено моделирование работы радиоканала, работающего в безадресном режиме. При этом далее считается, что взаимодействие пары узлов посредством радиоканала требует выполнения следующих необходимых условий:

1) наличия прямой видимости[1];
2) достаточности мощности передаваемого сообщения с учетом помех;
3) получения доступа к каналу в режиме конкуренции.

Признак наличия прямой видимости δ определяется в следующем виде:

$$\delta = \begin{cases} 1, & \left[\Theta_i \Theta_j\right] \cap \mathfrak{B}_k = \varnothing, k = \overline{1, K} \\ 0 & \end{cases}, \tag{8}$$

где $\left[\Theta_i \Theta_j\right]$ – отрезок, соединяющий узел Θ_i с координатами $X_i = \left(x_i^1, x_i^2, x_i^3\right)$ и узел Θ_j с координатами $X_j = \left(x_j^1, x_j^2, x_j^3\right)$, $\mathfrak{B}_k$ – тело с индексом k, формирующее наряду с другими телами внутренний контур объекта обслуживания, K – общее количество тел.

Условие достаточности мощности P_{RX} принимаемого сигнала без учета действия помех имеет вид

$$P_{RX} \geq P_{RXmin}, \tag{9}$$

где P_{RXmin} – чувствительность приемника. Мощность P_{RX} зависит от мощности передатчика P_{TX}, расстояния d между приемником и передатчиком, длины волны λ, коэффициентов направленного действия передающей G_{TX} и приемной G_{RX} антенн:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2. \tag{10}$$

В вычислительном эксперименте будем считать возможным прием сигнала в условиях помех при выполнении соотношения

[1] Данное условие позволяет получить нижнюю оценку показателя надежности.

$$\frac{P_{RX}}{J_i} \geq \frac{\left(\frac{E_b}{J_0}\right)_{\min}}{\frac{U}{R}} \tag{11}$$

где $\left(\frac{E_b}{J_0}\right)_{\min}$ – предельная величина качества связи, гарантирующая возможность передачи данных, U – ширина диапазона, R – скорость передачи битов, J_i – суммарная мощность помех, действующих в окрестности узла Θ_i. Эта мощность определяется выражением

$$J_i = \sum_{j=1}^{L} \frac{V_j}{k_{ij}}, \tag{12}$$

где k_{ij} – коэффициент, показывающий ослабление излученной мощности помехи с номером j в окрестности узла Θ_i:

$$k_{ij} = \frac{G_{RX}\lambda^2}{16\pi^2\left(\left(x_i^1 - y_j^1\right)^2 + \left(x_i^2 - y_j^2\right)^2 + \left(x_i^3 - y_j^3\right)^2\right)}. \tag{13}$$

Таким образом, условие (9) обеспечивает возможность получения сообщения приемником заданной чувствительности, а условие (11) обеспечивает возможность получения сообщения при наличии помех, уровень которых относительно сообщения не выше заданного.

Имитационное моделирование учитывает занятость радиоканала. Алгоритм множественного доступа стандарта IEEE 802.15.4 позволяет обнаруживать такую занятость только в случае, если передатчик в состоянии обнаружить помеху. Но помеха может действовать не в окрестности передатчика, а в окрестности приемника. Тогда передатчик при проверке занятости канала не обнаружит помеху и начнет свою передачу. В результате на антенне приемника произойдет сложение сигналов двух передатчиков. Такая ситуация называется коллизией.

Блок моделирования автономной работы узла моделирует деятельность узла, протоколируя основные события в журнале Ξ. При имитационном моделировании узлы в фазу сна не переходят, т.е. моделируется непрерывно работающая СМП с дискретно выполняемыми измерениями. Это позволяет получить результаты моделирования, не зависящие от параметров активной фазы.

События ξ, происходящие на узлах, заносятся в единый протокол $\Xi = \{\xi_i\}, i = \overline{1, N_e}$, где N_e – число событий в протоколе. Запись каждого события в этом протоколе содержит следующие данные:

1) время t^e наступления события по истинной шкале,
2) адрес узла a^e, к которому относится событие,
3) тип события s^e

$$s^e = \begin{cases} s^{\text{приём}}, & \text{если протоколируется получение результатов} \\ s^{\text{синхронизация}}, & \text{если протоколируется синхронизация} \\ s^{\text{начало}}, & \text{если протоколируется начало активной фазы} \end{cases}, \tag{14}$$

4) параметры, исчерпывающим образом описывающие событие.

Для названных выше типов событий s^e протоколируются следующие параметры. При протоколировании события $s^{\text{приём}}$ в журнале сохраняется адрес $origin^e$ узла, являющегося источником результатов. При протоколировании события $s^{\text{синхронизация}}$ в журнале сохраняется величина отставания часов узла Δt^e от эталона и адрес узла-родителя в ДР $parent^e$:

$$\xi = \begin{cases} \left(t^e, a^e, s^e, origin^e\right), & s^e = s^{\text{приём}} \\ \left(t^e, a^e, s^e, \Delta t^e, parent^e\right), & s^e = s^{\text{синхронизация}} \\ \left(t^e, a^e, s^e\right), & s^e = s^{\text{начало}} \end{cases}. \tag{15}$$

Сохраненное перед синхронизацией показание собственных часов используется узлом для вычисления коэффициента линейного дрейфа S локальных часов относительно эталона:

$$S = \frac{\theta_n - \theta_{n-1}^*}{\theta_n^* - \theta_{n-1}^*}, \tag{16}$$

где θ_n – показание локальных часов в момент данной синхронизации, θ_n^* и θ_{n-1}^* – показание эталонных часов в момент текущей и предыдущей синхронизации соответственно. Вычисленное значение коэффициента дрейфа применяется к показаниям локальных часов θ для получения скорректированного значения времени $\hat{\theta}$

$$\hat{\theta} = \theta S. \tag{17}$$

Блок моделирования работы аппаратуры узлов с учетом возможностей случайных колебаний их характеристик моделирует нестабильность частоты кварцевых осцилляторов узлов в зависимости от их температуры. Учитывающее эту нестабильность показание часов θ зависит от истинного времени t, номинальной частоты осциллятора φ_0, погрешности изготовления осциллятора $\Delta\varphi$, температурной составляющей ошибки Λ:

$$\theta(t) = t\varphi_0\left(1 + \Delta\varphi + \Lambda\right), \tag{18}$$

$$\Lambda\left(t, T, \dot{T}\right) = \beta\left(\left(T - T_0\right)^2 + \left(T - T_0\right)\dot{T}t + \frac{1}{3}\dot{T}^2 t^2\right), \tag{19}$$

где β – коэффициент температурной нестабильности осциллятора, T_0 – нормальная температура, T – температура осциллятора в начале очередного цикла работы, $\dot{T}$ – скорость изменения температуры осциллятора.

Результатом имитационного моделирования является протокол событий Ξ, зафиксированных в процессе функционирования виртуальной СМП. Процедура обработки этого протокола определяет количество доставленных в ЦОД сообщений и формирует диагностическую информацию, уточняющую причины, по которым не были доставлены остальные сообщения.

Для нахождения количества доставленных сообщений из множества событий протокола выбираются только те события, которые попадают в активные фазы в соответствии с заданными при обработке параметрами t_A и Δt. Начало очередной активной фазы определяется моментом времени события $s^{\text{начало}}$. При этом выполняется ряд проверок, удостоверяющих, что все события, являющиеся причинами проверяемого, также приходятся на активные фазы.

При формировании диагностической информации выявляются узлы, которые не были синхронизированы, и узлы, сообщения которых не были доставлены в ЦОД. Например, если узел A_i получил сообщение с результатами измерений узла A_j, а родитель узла A_i такого сообщения не получал, делается вывод о том, что передача результатов измерений A_j не уложилась в активную фазу, и данные остались на узле A_i. Такая диагностическая информация позволяет разработчику целенаправленно изменить топологию сети или параметры алгоритма узлов.

Рассмотрим вычислительную часть модели определения долговечности сети – времени исчерпания заряда ИП узлов.

Расход заряда q ИП за один период работы узла составляет

$$q = \left(I_A + I_{RX} + I_0\right)t_A + \left(I_W + I_{OFF} + \left(I_A - I_W\right)f_{int}t_{int} + I_0\right)\left(t^* - t_A\right), \qquad (20)$$

где I_A – ток, потребляемый микропроцессором в активном режиме, I_{RX} – ток, потребляемый приемником-передатчиком, настроенным на прием, I_0 – ток потребления датчиков и прочих компонентов узла, I_W – ток, потребляемый микропроцессором в режиме сбережения энергии, I_{OFF} – ток, потребляемый выключенным приемником-передатчиком, f_{int} – частота прерываний по переполнению таймера-счетчика, t_{int} – время, затрачиваемое процессором на обработку каждого из этих прерываний, t_A – длительность активной фазы.

Срок функционирования t_{LC} узла при наличии ИП с зарядом Q^* составляет

$$t_{LC} = \frac{Q^*}{q}t^*. \qquad (21)$$

<u>Третья глава</u> посвящена разработке структуры и компонентов инструментального комплекса (ИК), обеспечивающего проектирование и реализацию СМП, функционирующих на основе предложенного метода. Структура ИК представлена на рис. 4. Проектирование СМП обеспечивают следующие компоненты: симулятор, в основе которого лежит имитационная модель; программа обработки результатов симуляции (журнала событий),

реализующая предложенный подход «наложения масок»; вычислительная модель расчета долговечности узлов, а также стенды экспериментального определения характеристик используемых узлов БСС. Реализация СМП осуществляется путем настройки входящей в ИК параметризованной операционной системы OmegaOS, при разработке которой были учтены все особенности предложенного метода функционирования СМП.

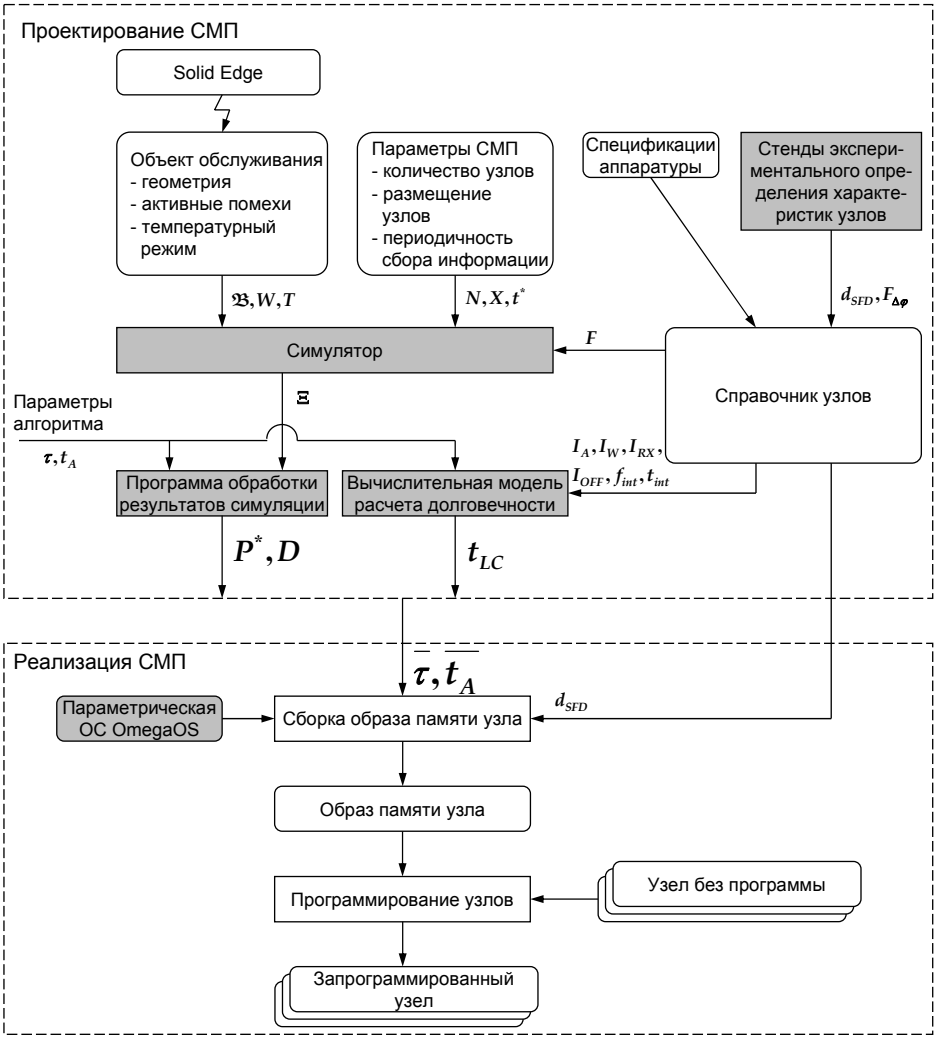

Рис. 4. Структура инструментального комплекса проектирования и реализации СМП.

При задании исходных данных для некоторых параметров симулятор предлагает выбрать одну их двух моделей поведения параметра: постоянное значение или функция времени. К таким параметрам относятся геометрия объекта обслуживания, координаты узлов, координаты и мощность помех. Выбрав функцию времени, пользователь может ввести выражение, которое будет вычисляться всякий раз, когда появляется необходимость в значении параметра после изменения аргумента выражения – системного времени. Кроме детерминированной составляющей функция времени может включать и случайную.

Блок симуляции, в соответствии со структурой модели, выполняет моделирование следующих процессов: 1) формирование структуры

взаимодействия узлов сети с учетом текущей конфигурации объекта обслуживания, 2) автономная работа узла и 3) погрешность хода часов узлов.

Результатом работы симулятора является протокол событий виртуальной БСС. На этот протокол накладывается маска активных фаз, задаваемая параметрами периодичности t^*, длительности активной фазы t_A и величины интервала опережения τ. При этом пользователь указывает только значения t_A и τ, так как периодичность измерений t^* была задана ранее. Исходя из этого, программа обработки протокола событий определяет показатели работы СМП: надежность P^* и (при помощи вычислительной модели) долговечность t_{LC}. При определении долговечности используется величина заряда ИП Q^*.

При проектировании и реализации СМП согласно предложенному методу используются характеристики узлов, отсутствующие в спецификациях аппаратуры. К таким характеристикам относятся закон распределения погрешности $\Delta\varphi$ изготовления осцилляторов и величина задержки оповещения приемника d_{SFD}. Для экспериментального определения этих величин были разработаны соответствующие стенды и методики измерения требуемых величин.

Для реализации СМП, использующей предложенный метод функционирования, была разработана специализированная параметрическая операционная система (ОС) OmegaOS. В качестве параметров ОС OmegaOS выступают выбранные значения длительности активной фазы и величины интервала опережения. Кроме того, разработчик СМП должен создать исходный код функции выполнения измерений. Из экспериментально определенных данных в OmegaOS используется величина задержки оповещения приемника d_{SFD}. Исходные данные используются для настройки OmegaOS на решение конкретной задачи и получения образа памяти узлов СМП. Подготовленный образ памяти заносится в память процессоров узлов (см. рис. 4).

В четвертой главе работы рассмотрено практическое применение результатов предшествующих глав диссертации для построения экспериментальной системы мониторинга параметров медицинского состояния космонавтов в пределах Российского сегмента (РС) МКС.

Объектом обслуживания проектируемой системы мониторинга психофизиологического состояния и координат космонавтов является служебный модуль (СМ) «Звезда», включая находящихся в нем космонавтов. СМП должна функционировать непрерывно, не ограничивая двигательную активность космонавтов.

Располагаемые на объекте обслуживания узлы включают (по терминологии проекта):

- шлюз – узел для передачи по проводам на бортовой медицинский компьютер (БМК) данных, полученных от других узлов сети;

- маяки – мобильные узлы, располагаемые на теле космонавтов, выполняющие измерения и трансляцию медицинских данных;
- реперы – неподвижные узлы, размещаемые на внутренних поверхностях РС МКС и используемые при позиционировании маяков и ретрансляции результатов измерений шлюзу. Их количество и расположение определяется при проектировании системы мониторинга и обеспечивает её связность.

В результате имитационного моделирования были получены данные о надежности данной СМП в зависимости от величины активной фазы и интервала опережения. Графики приведены на рис. 5. Выбранным величинам активной фазы $\mathbf{0,27}$ с и интервала опережения $\mathbf{0,024}$ с при заданных значениях периодичности измерений $\mathbf{20}$ с и ёмкости ИП $\mathbf{450}$ мАч соответствует долговечность $\mathbf{39,05}$ суток.

В этих условиях использование БСС как базы построения системы мониторинга состояния космонавтов определено перспективным и начата подготовка к проведению космического эксперимента (КЭ) «Непрерывный мониторинг психофизиологического состояния и координат космонавтов с использованием беспроводной сенсорной сети» (шифр – «Биосеть») на борту российского сегмента МКС (РС МКС). При проведении КЭ предполагается использовать результаты представленной диссертационной работы.

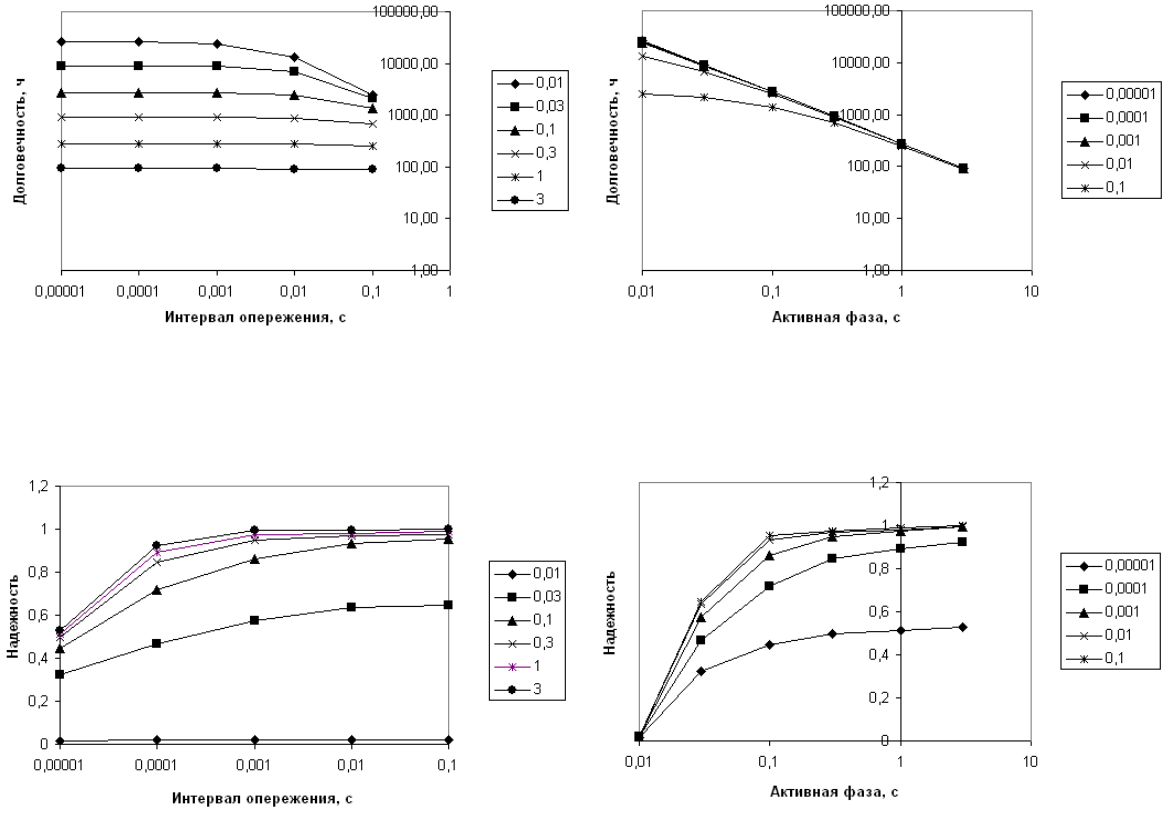

Рис. 5. Зависимость долговечности и надежности от величины интервала опережения и активной фазы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнено исследование систем мониторинга параметров объектов изменяемой конфигурации на базе дискретных беспроводных сенсорных сетей.
2. Предложен метод функционирования систем мониторинга параметров с названными специфическими особенностями, содержащий в своей основе решение следующих трех взаимосвязанных задач: организация адаптивного взаимодействия узлов системы, учет задержек передачи сообщений, учет погрешности осцилляторов узлов.
3. Для организации адаптивного взаимодействия узлов предложен способ самоорганизации сети с использованием постоянных уникальных адресов. Сравнительный анализ, выполненный на основе разработанного симулятора, показал, что использование предложенного способа позволяет повысить надежность систем мониторинга параметров до 10 раз (для объектов обслуживания с интенсивно изменяемой конфигурацией).
4. Для повышения точности синхронизации узлов СМП предложено выполнять измерения и учитывать фактические задержки передачи сообщений. Также предложен механизм учета погрешности осцилляторов узлов. Сравнительный анализ, выполненный на основе разработанного симулятора, показал, что синхронизация узлов на базе предложенного метода позволяет увеличить их долговечность на 30-40%.
5. Процесс функционирования СМП согласно предложенному методу формализован в виде модели, связывающей топологические и функциональные параметры системы с показателями надежности и долговечности.
6. В обеспечение проектирования и реализации систем мониторинга параметров разработан инструментальный комплекс. Для решения задачи проектирования реализованы симулятор, блок обработки результатов симуляции и вычислительная модель.
7. Разработана специализированная операционная система, обеспечивающая быструю реализацию СМП, использующих предложенный метод.
8. Предложенный метод функционирования системы мониторинга параметров апробирован при решении задачи построения экспериментальной системы мониторинга параметров медицинского состояния космонавтов на Международной космической станции (МКС). По результатам апробации была подана заявка на проведение космического эксперимента на российском сегменте МКС, которая одобрена и включена в программу космических экспериментов с шифром «Биосеть».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Терентьев М.Н. Модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / Вестник Московского авиационного института.– Москва: МАИ, 2009. – Т. 16. – № 4. – с. 79–84.
2. Терентьев М.Н. Имитационная модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / Вестник Московского авиационного института.– Москва: МАИ, 2010. – Т. 17. – № 3. – с. 178–183.

иные публикации

3. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети с режимом сбережения энергии // Материалы межд. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании ИНФОТЕХ–2009» – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – с. 311–312.
4. Терентьев М.Н. Метод синхронизации узлов беспроводных сенсорных сетей с режимом сбережения энергии // Труды третьей международной конференции «Системный анализ и информационные технологии САИТ-2009»: М., 2009. – с. 53.
5. Терентьев М.Н. Синхронизация узлов беспроводных сенсорных сетей с режимом сбережения энергии. // 8-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2009». Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009, с. 207.
6. Терентьев М.Н. Двухуровневая структура модели беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени. // Четвертая всероссийская научно-практическая конференция «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии»: Сб. материалов, г. Оренбург 2009 г. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – с. 448-454.
7. Терентьев М.Н. Метод самоорганизации дискретной беспроводной сенсорной сети при обслуживании объекта изменяемой конфигурации // Proceedings of Distributed Computer and Communication Networks. Theory and Applications (DCCN-2010). Moscow: R&D Company «Information and Networking Technologies», 2010. – pp. 117-119.
8. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети: Учебное пособие – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. – 96 с.