

И.В. Карпов

## БЕСПРОВОДНЫЕ АУДИО-СЕНСОРНЫЕ СЕТИ. КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

В статье рассматривается класс беспроводных сенсорных сетей, обеспечивающих получение, передачу и обработку аудиоданных. В отличие от аудио-сенсорных сетей, где сеть используется для сбора и анализа аудиоданных, в потоковых аудио-сенсорных сетях на первый план выступает проблема эффективного использования имеющихся ограниченных энергетических ресурсов сети с учетом качества предоставляемого сервиса, поскольку основной сферой их применения является проведение спасательных работ. В статье выделяются факторы, влияющие на энергопотребление узла, рассматриваются подходы сокращения энергопотребления, а также вводятся требования к качеству предоставляемого сервиса. Проведенный обзор исследований показал отсутствие единого подхода к проблеме эффективной передачи аудиоданных, что затрудняет оценку энергоэффективности применяемых методов.

**Ключевые слова:** беспроводные аудио-сенсорные сети, энергоэффективность, качество обслуживания, аудиосвязь

Постоянное развитие электроники и микроэлектроники дало возможность обновить устаревшую техническую базу элементов из громоздких электронных компонентов в миниатюрные системы на одном чипе (SoC). Всё большая миниатюризация и интеграция узлов позволила создать новые электронные устройства (микрокомпьютеры), включающие в себя сразу несколько технических элементов - микроконтроллер, ПЗУ, ОЗУ, приемопередатчик, различные сенсоры. На базе данных устройств появилась возможность создавать распределенные самоорганизующиеся системы с небольшим энергопотреблением для различного применения - от мониторинга окружающей среды (наблюдение за животными, отслеживание перемещения человека, мониторинг трафика на дорогах) до систем аудио-связи. Такие самоорганизующиеся сети стали называться беспроводными сенсорными сетями (БСС), и они являются частным случаем беспроводных самоорганизующихся ситуационных сетей (ad-hoc). По мере развития в БСС выделились отдельные направления исследований, связанные с применением определенных типов датчиков в сети. Так, например, появилось направление сенсорных сетей камер (camera sensor networks), в которых основным источником получения информации из окружающего мира является камера, а сети, где в качестве сенсора используется микрофон, получили название аудио-сенсорные (audio sensor networks).

В последнее время исследования в области беспроводных аудио-сенсорных сетей проводятся такими зарубежными университетами, как Carnegie Mellon University (США), University of Alberta (Канада), University of Victoria (Канада), The University of New South Wales (Австралия) [1, 2, 3, 4]. Аудио-сенсорные сети в исследованиях применяются для создания аудио-связи при чрезвычайных ситуациях [1], при построении систем в области здравоохранения [5], в военных целях [6], для мониторинга энергопотребления [7], дорожной ситуации [2].

Беспроводные аудио-сенсорные сети можно разделить на два класса:

- 1) сети сбора аудиоданных (сбор, анализ, обработка);
- 2) сети с потоками данных, предназначенные для аудио-связи.

Класс системы определяет условия её использования. Так, например, в работе [3] БСС выступает в качестве сети сбора аудиоданных для дальнейшего распознавания и классификации музыки или речи. Поскольку распознавание речи требует значительных вычислительных ресурсов (быстродействия, памяти), то сам процесс происходит на устройстве с большими вычислительными ресурсами, а сбор данных осуществляется маломощными узлами. Применяемые сенсоры могут быть не автономными, поэтому в данном случае отсутствует проблема энергопотребления.

В тех же системах, где беспроводная аудио-сенсорная сеть применяется в качестве системы для организации аудио-связи, как, например, представлено в работах [1, 8], проблема энергопотребления выходит на первый план. Например, при осуществлении спасательных работ подобные сети выступают в качестве быстро развёртываемой, не требующей специальной инфраструктуры, системы аудио-связи. К преимуществам использования технологии БСС для организации связи можно отнести масштабирование системы, то есть способность реконфигурации при подключении / отключении узлов, увеличенную дальность связи за счет ретрансляции данных, адресную и коллективную передачу данных благодаря уникальной идентификации узлов. Однако, наряду с преимуществами, имеется ряд трудностей при организации работы системы. Время работы подобной сети должно быть максимально долгим из-за специфики области применения. Использование такой системы на открытой местности или в труднодоступном месте, где невозможно подключить устройство к сети электроснабжения, требует применения аккумуля-

торов или альтернативных источников питания, например, солнечных батарей. Таким образом, энергетические ресурсы системы становятся ограниченными, поэтому актуальна проблема их рационального использования.

### Энергоэффективность в беспроводной аудио-сенсорной сети

"Энергетическая эффективность - характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования топливно-энергетических ресурсов к затратам топливно-энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу..." [9].

В беспроводной аудио-сенсорной сети полезным эффектом является объем информации, переданный от узла отправителя к узлу получателя. Для определения энергетической эффективности введем "показатель энергоэффективности", который определяет количество затраченной энергии на переданную единицу информации:

$$C_{\text{сист.}} = \frac{N_{\text{TX}}}{E_{\text{сист.}}}; \quad E_{\text{сист.}} > 0, \quad (1)$$

где  $C_{\text{сист.}}$  - показатель энергоэффективности передачи аудиоданных;  $E_{\text{сист.}}$  - энергия, затраченная узлами, участвующими в передаче за промежуток времени  $t$ ;  $N_{\text{TX}}$  - объем переданных аудиоданных за тот же промежуток времени.

Количество затраченной энергии при передаче зависит от факторов, указанных в Таблице 1, а именно, аппаратных характеристик устройств (потребляемая мощность приемопередатчика при приеме и передаче, микроконтроллера при обработке данных), дальности передачи данных,

протокола канального уровня (доступ к среде передачи данных), протокола маршрутизации данных, топологии сети.

В свою очередь,  $E_{\text{сист.}}$  является совокупностью затраченных энергий узлов, участвующих в передаче данных, где каждая затраченная энергия есть сумма энергий, израсходованных модулем в каждом из возможных его состояний (прием, передача, режим сна, активный режим).  $E_{\text{сист.}}$  определяется по формуле (2):

$$E_{\text{сист.}} = \sum_{i=1}^N (P_{\text{TX}i} * t_{\text{TX}i} + P_{\text{RX}i} * t_{\text{RX}i} + P_{\text{ACTIVE}i} * t_{\text{ACTIVE}i} + P_{\text{SLEEP}i} * t_{\text{SLEEP}i}); \quad (2)$$

где  $P_{\text{TX}i}$ ,  $t_{\text{TX}i}$ ,  $P_{\text{RX}i}$ ,  $t_{\text{RX}i}$ ,  $P_{\text{ACTIVE}i}$  - мощность устройства при данном режиме работы (передача, прием, активном режиме и сне соответственно),  $t_{\text{ACTIVE}i}$ ,  $P_{\text{SLEEP}i}$ ,  $t_{\text{SLEEP}i}$  - время работы устройства в режимах передачи, приема, активном и сне соответственно.

Таким образом, для сокращения количества затрачиваемой энергии на переданный бит информации, необходимо уменьшить время нахождения устройств в режиме с большим энергопотреблением, что позволит повысить энергоэффективность передачи аудиоданных.

Приведенные формулы справедливы для определения затрачиваемой энергии при передаче любых данных по БСС - числовых (температуры, давления, влажности), мультимедийных (аудио, видео). Поскольку в статье рассматривается задача энергоэффективной передачи аудиопотоков, то определим их специфику передачи.

Во-первых, передача должна происходить в режиме реального времени, во-вторых, при соблю-

Таблица 1. Факторы, влияющие на энергопотребление в зависимости от уровня модели OSI

Уровень модели OSI	Фактор
Физический	- окружающая среда (помехи от других устройств, отражение, препятствия и т.п.)
	- аппаратная составляющая используемых устройств (архитектура процессора, применяющиеся элементы (микроконтроллер, приемопередатчик, наличие дополнительного периферийного оборудования))
	- частота, применяемая при передаче
	- дальность связи
	- способ кодирования сигнала
	- способ модуляции сигнала
Канальный	- расположение оборудования (удаленность друг от друга, наличие перекрытых областей)
Сетевой	- протокол доступа к каналу
	- топология сети
Транспортный	- протокол передачи данных
Сеансовый	-
Представительский	-
Прикладной	- расписание работы устройства

дении заданного качества предоставляемого сервиса (QoS), в-третьих, повторная отправка при потере одного или нескольких пакетов с аудиоданными не требуется, при условии удовлетворения QoS.

Качество обслуживания в беспроводных аудио-сенсорных сетях

Основными передаваемыми данными по беспроводной аудио-сенсорной сети являются аудиоданные, которые должны быть доставлены от узла источника до принимающего узла. Поскольку используемые модули маломощные, то при получении данных из окружающей среды невозможно без задержек принимать или отправлять пакеты другим модулям (рис. 1) [10].

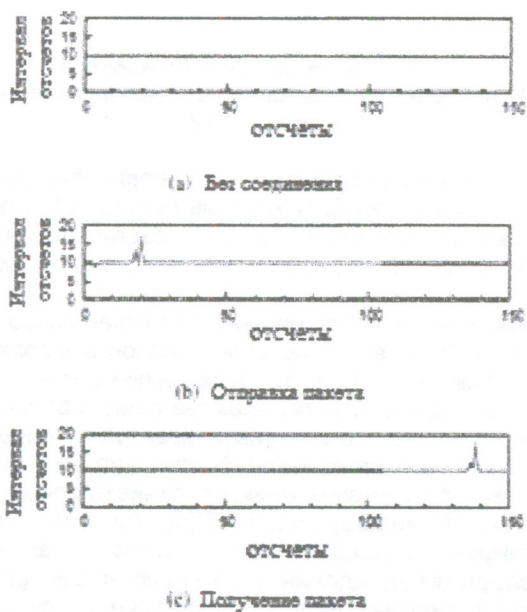


Рис. 1. Интервал выборки между пакетами [10]

Как видно на рис. 1(а), модуль занимается только дискретизацией данных, поэтому задержки отсутствуют. По рис. 1(б) модуль начинает передавать получаемую информацию, поэтому появляются задержки, так же, как и на рис. 1(с), когда принимаются данные от другого модуля. При этом задержки могут повлечь потерю получаемых данных. Следовательно, передача пакетов по сети должна происходить с учетом определенных ограничений, накладывающихся на работу системы, а, именно:

- временных задержек пакета (задержка при передаче пакета, джиттер);
- количества потерянных пакетов;
- пропускной способности канала.

По стандарту ITU-T G.114 [11] задержка при передаче аудиоданных от узла отправителя до узла получателя в 150 мс не оказывает существенного влияния, а задержка более 400 мс является недопустимой. Вариация задержки между пакетами не должна превышать 100 мс [12]. В работе [13] 5% потерь пакетов привели к ухудшению качества сервиса на 30%, в то время как 17% потерь оказа-

лись недопустимы. Согласно стандарту IEEE 802.15.4, пропускная способность канала составляет 250 Кбит/с [14]. Приведенные значения необходимо учитывать при выборе топологии и протоколов маршрутизации данных по сети.

Проведенный обзор литературы показал, что исследования, направленные на сокращение энергопотребления при передаче данных, проводятся в сторону разработки новых аппаратных платформ с улучшенными техническими характеристиками по сравнению с аналогами, специализированного программного обеспечения, реализующего различные режимы работы устройств, протоколов доступа к сети и алгоритмов маршрутизации данных.

Так, в работе [1] была организована стационарная аудио-сеть для экстренных ситуаций на шахте в Пенсильвании. Разработанная сеть состояла из 42-х разработанных модулей FireFly и имела протяженность порядка 3 км. Используемый приемопередатчик CC2420 потреблял в среднем 18.8 мА и 17.4 мА в режиме приема и передачи соответственно [15]. Данная сеть поддерживала один голосовой поток (в дуплексном режиме) с детерминированной задержкой на передачу в 24 мс (при 8 ретрансляциях). В работе [13] была предложена новая аппаратная платформа SenEar, учитывающая качество предоставляемого сервиса (E-модель оценки качества) и QVS (Quality-Aware Voice Streaming) для передачи нескольких голосовых потоков по сети в режиме реального времени без дублирования потоков. Используемый приемопередатчик CC1100 в режиме приема потреблял в среднем 15.2 мА, а при передаче 16.9 мА [16]. Уменьшение энергопотребления используемых электронных компонентов, при одинаковых технических параметрах, несомненно, приводит к увеличению энергоэффективности. Однако развитие аппаратных платформ имеет свои ограничения, а, именно, ограничения на имеющиеся технологии микроэлектроники, которые создают текущую технологическую базу компонентов. Поэтому необходимо развивать не только аппаратные платформы, но и механизмы взаимодействия устройств в системе.

Синхронизация узлов, использованная в работе [1], является одним из примеров энергоэффективных механизмов взаимодействия устройств. Применение протокола TDMA (Time Division Multiple Access) позволяет координированно управлять состоянием всех узлов в сети, уменьшая тем самым количество коллизий при передаче и энергопотреблении. Для этого главным узлом выделяются временные слоты, состоящие из занятых слотов (по расписанию) и свободных. Во время активного слота только один узел передает данные, а остальные находятся в режиме с пониженным энергопотреблением. Возможность регулирования состояния узлов является одним из важных факторов при создании энергоэффективной системы, поскольку наибольшее количество энергии тратится при передаче и приеме данных. Подобное регулирование состоянием устройства называется динамичес-

ким управлением питанием (Dynamic Power Management). Тем не менее, при большом количестве узлов, большой протяженности и высокой нагрузке на сеть пропускная способность ухудшается, и повышаются накладные расходы сети. Поэтому механизм синхронизации может быть применим лишь к конкретной реализации сети с небольшим количеством узлов и потоков данных.

Большое количество узлов требует специализированных протоколов для организации взаимодействия работы сети и передачи нескольких потоков данных. В работе [17] авторами рассматривается возможность передачи аудиоданных в режиме реального времени от нескольких источников к нескольким получателям с использованием ретрансляции. Для этого разработан механизм ASM (Adaptive Stream Multicast), который включает в себя эмпирическую модель качества обслуживания, основанную на текущем состоянии сети и FEC-схему (Forward Error Correction), предназначенную для адаптации качества связи к изменяющейся нагрузке на сеть. Данные механизмы позволяют не только поддерживать качество предоставляемого сервисом, но и за счет контроля времени жизни пакета сокращают энергетические затраты, что повышает эффективность работы сети. Распределенный алгоритм управления позволяет при создании нового потока следить за качеством предоставляемого сервиса для других существующих потоков.

Одним из важных элементов работы сети является протокол маршрутизации. В качестве протокола маршрутизации в данной работе используется дерево TOR (Tree-based Opportunistic Routing), которое позволяет вести широкоэвентурную и коллективную передачу. Данный протокол относится к категории Location-based протоколов, в которых узлы адресуются в зависимости от своего расположения. Согласно протоколу маршрутизации TOR, ретрансляция данных осуществляется узлу, ближайшему к узлу получателя. При наличии в сети нескольких потоков узлы ретрансляторы, таким образом, занимают общую передающую среду, что приводит к коллизиям и повышению энергопотребления при передаче пакетов с аудиоданными.

О данной проблеме упоминается и в работе [12]. Отсутствие динамичной политики переключения каналов между узлами с одинаковым PAN-ID является одним из главных недостатков текущей спецификации ZigBee. Поскольку узлы подключены к одной сети, то они разделяют единое передающее пространство, конкурируя за него, влияя тем самым на время утилизации пакетов с данными. Для уменьшения количества коллизий при передаче предлагается уменьшить радиус действия узлов до ближайших соседей (рис. 2).

На рис. 2(а) показана сеть с разделяемым каналом передачи. При отправке данных от узла 1 к узлу 5 другие узлы, например, 2 и 6 не могут одновременно обмениваться данными, поскольку передающая среда занята. На рис. 2(б) показано пространственное разделение узлов, благодаря которому

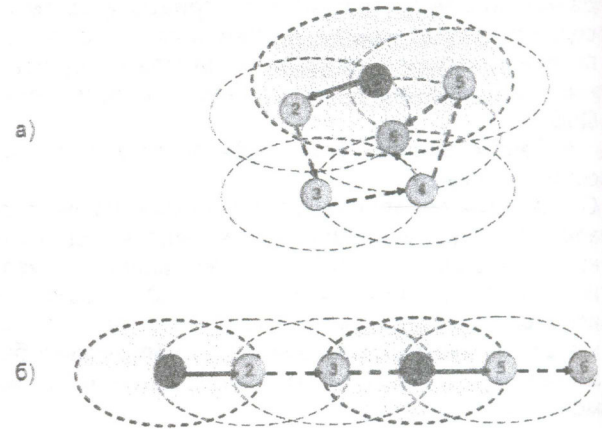


Рис. 2. Сеть: а) с разделяемым и б) пространственно-повторным использованием каналов [12]

узлы 1 и 4 могут одновременно передавать данные на одном канале. Проведенные авторами опыты с 9 узлами на расстоянии 160 м показали увеличение пропускной способности сети с 10 Кбит/с до 30 Кбит/с.

Однако увеличилась ли энергетическая эффективность работы сети? Уменьшая мощность передатчика, можно сократить затрачиваемую энергию при передаче данных в пределах выбранной дальности связи, но при этом увеличивается количество необходимых ретрансляций для доставки аудиоданных до узла назначения, в отличие от описанного протокола маршрутизации TOR, где узел может перекрывать соседние модули. То есть увеличивается время нахождения узлов в наиболее энергозатратных режимах работы - передаче и приеме, а также такие параметры QoS, как задержка при передаче пакета от узла отправителя до узла получателя. Согласно работе [18], где исследуется вопрос преимуществ передачи данных на большое расстояние с маленьким и большим числом ретрансляций, сокращение дальности связи не приводит к пропорциональному уменьшению энергопотребления. Также за счет сокращения радиуса связи ухудшается связность сети, что приводит к дополнительным расходам на её поддержание.

Таким образом, говоря об энергоэффективности, необходимо рассматривать не только готовые конкретные системы, но и изучать применяемые в них принципы взаимодействия, которые оказывают влияние на энергопотребление непосредственно при передаче данных. Дальнейшие исследования энергоэффективной передачи аудиоданных являются актуальными, поскольку позволяют определить применимость существующих общих методов взаимодействия узлов в БСС для беспроводных аудио-сенсорных сетей.

#### Выводы

В настоящее время технология беспроводных сенсорных сетей активно развивается. Это развитие

связано как с внедрением новых технологических решений (создание новых аппаратных платформ), так и с разработкой новых протоколов и принципов взаимодействия всей системы. В связи с внедрением технологии БСС в разные сферы деятельности (медицина, охрана, сельское хозяйство) исследователи сталкиваются с появлением новых проблем.

В данной статье рассмотрена проблема энергоэффективной передачи аудиоданных в беспроводных аудио-сенсорных сетях. Определен показатель энергоэффективности сети через отношение количества переданных "полезных" данных по сети к затраченной при этом энергии всеми узлами, участвующими в их передаче. В проведенном обзоре литературы можно выделить несколько принципов, позволяющих сократить энергопотребление при передаче аудиоданных. При рассмотрении вопросов энергопотребления выявлено отсутствие универсального алгоритма передачи данных, в котором затрачиваемая энергия была бы минимальной. Таким образом, проведение дальнейших исследований в данном направлении является актуальным. Анализ существующих протоколов позволит определить применимость методов взаимодействия узлов в БСС для беспроводных аудио-сенсорных сетей. При выборе способа взаимодействия узлов в системе необходимо учитывать качество предоставляемого сервиса и количество одновременно передаваемых потоков (загруженность сети), что также влияет на энергопотребление. Комплексный подход и выработка единого критерия для всех направлений беспроводных аудио-сенсорных сетей позволит создать модели, методы и алгоритмы повышения энергоэффективности не только для беспроводных аудио-сенсорных сетей, но и для беспроводных ситуационных сетей с возможной проверкой их на имитационных моделях и в натурном эксперименте.

#### Литература:

1. Mangharam R., Rowe A. [et al.], Voice over sensor networks // Real-Time Systems Symposium, 2006. RTSS '06. 27th IEEE International, 2006. - P.291-302.
2. Malhotra B. [et al.], Distributed classification of acoustic targets in wireless audio-sensor networks // Computer Networks, vol. 52, 2008. - P.2582-2593.
3. Bidong C., Audio recognition with distributed wireless sensor networks: thesis; University of Victoria - Canada, 2010. - P.59.
4. Hu W., The design and evaluation of a hybrid sensor network for cane-toad monitoring // Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium, 2005. - P.503-508.
5. Baker C., Armijo K. [et al.], Wireless Sensor Networks for Home Health Care // Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW '07. 21st International Conference, vol.2, 2007. - P.832-837.
6. Ledeczi A., Nadas A. [et al.], Countersniper System for Urban Warfare // ACM Transactions on Sensor Networks, 2005. - P.153-177.

7. Kim Y. [et al.], ViridiScope: Design and implementation of a fine grained power monitoring system for homes // Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing, New York, USA, 2009.

8. Facchinetti T. et al. Real-time voice streaming over IEEE 802.15.4 // Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on. 2010. P.985-990.

9. GOST R 53905-2010 Energy conservation. Terms and definitions, Moscow, 2011.

10. Lu L., Cao Q. [et al.] EnviroMic: Towards Cooperative Storage and Retrieval in Audio Sensor Networks // Distributed Computing Systems, 2007. ICDCS '07. 27th International Conference, 2007. - P.34.

11. ITU-T G.114, One-way transmission time, 2003.

12. Brunelli D., Maggiorotti M. [et al.], Analysis of audio streaming capability of ZigBee networks // Wireless Sensor Networks, Lecture Notes in Computer Science, 2008, vol. 4913, 2008. - P.189-204.

13. Li L., Xing G. [et al.], QVS: Quality-aware Voice Streaming for Wireless Sensor Networks, in ICDCS, 2009.

14. IEEE Standards 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). - IEEE Computer Society, 2006.

15. Datasheet, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 ZigBee-ready RF Transceiver, CC2420, 2013

16. Datasheet, Low-power Sub-1 GHz RF Transceiver, CC1100, 2013

17. Li L., Xing G. [et al.], Adaptive Voice Stream Multicast over Low-power Wireless Networks, Technical Report MSU-CSE-10-16, Computer Science and Engineering, Michigan State University, East Lansing, Michigan, 2010.

18. M. Haenggi, Twelve reasons not to route over many short hops // Vehicular Technology Conference, 2004, VTC2004-Fall, vol. 5, 2004. - P.3130-3134.

**Карпов Иван Викторович,**  
аспирант каф. ВСУС, МИЭМ НИУ ВШЭ.  
тел.: +7 (916) 927-04-48  
e-mail: ivakarpov@gmail.com

I.V. Karpov

**WIRELESS AUDIO-SENSOR NETWORKS. QOS AND ENERGY EFFICIENCY**

In this article we review a class of Wireless Sensor Networks (WSNs), which are engaged in the reception, transmission and processing of audio data. Unlike audio sensor networks, where the network is used to collect and analyze audio data, in streaming audio sensor networks we have a problem with energy efficiency and quality of services (QoS). The main area of such WSNs is rescue operations. The article is highlighted factors affecting the energy of sensors, discussed approaches to reduce energy consumption and introduced requirements for QoS. A review of studies showed the absence of a common approach to the energy efficiency transmission of audio data, because it is difficult to estimate appropriate methods.

**Keywords:** wireless audio-sensor networks, energy efficiency, quality of service, audio communication

**References:**

1. Mangharam R., Rowe A. [et al.], Voice over sensor networks // Real-Time Systems Symposium, 2006. RTSS '06. 27th IEEE International, 2006. - P.291-302.
2. Malhotra B. [et al.], Distributed classification of acoustic targets in wireless audio-sensor networks // Computer Networks, vol. 52, 2008. - P.2582-2593.
3. Bidong C., Audio recognition with distributed wireless sensor networks: thesis; University of Victoria - Canada, 2010. - P.59.
4. Hu W., The design and evaluation of a hybrid sensor network for cane-toad monitoring // Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium, 2005. - P.503-508.
5. Baker C., Armijo K. [et al.], Wireless Sensor Networks for Home Health Care // Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW '07. 21st International Conference, vol.2, 2007. - P.832-837.
6. Ledeczki A., Nadas A. [et al.], Countersniper System for Urban Warfare // ACM Transactions on Sensor Networks, 2005. - P.153-177.
7. Kim Y. [et al.], ViridiScope: Design and implementation of a fine grained power monitoring system for homes // Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing, New York, USA, 2009.
8. Facchinetti T. et al. Real-time voice streaming over IEEE 802.15.4 // Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on. 2010. P. 985-990.
9. GOST R 53905-2010 Energy conservation. Terms and definitions, Moscow, 2011.
10. Lu L., Cao Q. [et al.], EnviroMic: Towards Cooperative Storage and Retrieval in Audio Sensor Networks // Distributed Computing Systems, 2007. ICDCS '07. 27th International Conference, 2007. - P.34.
11. ITU-T G.114, One-way transmission time, 2003.
12. Brunelli D., Maggiorotti M. [et al.], Analysis of audio streaming capability of ZigBee networks // Wireless Sensor Networks, Lecture Notes in Computer Science, 2008, vol. 4913, 2008. - P.189-204.
13. Li L. Xing G. [et al.], QVS: Quality-aware Voice Streaming for Wireless Sensor Networks, in ICDCS, 2009.
14. IEEE Standards 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). - IEEE Computer Society, 2006.
15. Datasheet, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 ZigBee-ready RF Transceiver, CC2420, 2013
16. Datasheet, Low-power Sub-1 GHz RF Transceiver, CC1100, 2013
17. Li L., Xing G. [et al.], Adaptive Voice Stream Multicast over Low-power Wireless Networks, Technical Report MSU-CSE-10-16, Computer Science and Engineering, Michigan State University, East Lansing, Michigan, 2010.
18. M. Haenggi, Twelve reasons not to route over many short hops // Vehicular Technology Conference, 2004, VTC2004-Fall, vol. 5, 2004. - P.3130-3134.

**Karpov Ivan Viktorovich,**

*Ph.D. student of VSIS dep. of MIEM HSE.*

*tel.: +7 (916) 927-04-48*

*e-mail: ivakarpov@gmail.com*