

---

---

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

---

## THEORETICAL FOUNDATIONS OF COMPUTER SCIENCE

---

---

УДК 004.9,004.94

### КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

К. С. МУЛЯРЧИК<sup>1)</sup>, А. С. ПОЛОЧАНСКИЙ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Дано определение понятию «качество обслуживания» для беспроводных сенсорных сетей. Проанализировано различие в качестве обслуживания в беспроводных сенсорных и классических компьютерных сетях. Выделены особенности беспроводных сенсорных сетей и требования, предъявляемые к качеству обслуживания. Определены характеристики качества обслуживания с учетом особенностей беспроводных сенсорных сетей: задержка доставки пакета, пропускная способность, надежность доставки, время жизни сети, покрытие заданной области, устойчивость к изменению топологии. Проанализированы взаимосвязь характеристик качества обслуживания с технологиями различных уровней сетевой модели и влияние используемых технологий на значения связанных с ними характеристик качества обслуживания. На основе различий в модели передачи данных проведена классификация задач, решаемых посредством беспроводных сенсорных сетей. Отдельно рассмотрены сети с постоянной и изменчивой топологией.

**Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть; качество обслуживания; характеристики качества обслуживания; классы задач для беспроводных сенсорных сетей.

---

#### Образец цитирования:

Мулярчик К. С., Полочанский А. С. Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2017. № 2. С. 65–70.

#### For citation:

Mulyarchik K. S., Polochanskiy A. S. Quality of service in wireless sensor networks. *J. Belarus. State Univ. Math. Inform.* 2017. No. 2. P. 65–70 (in Russ.).

---

#### Авторы:

**Константин Сергеевич Мулярчик** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры телекоммуникаций и информационных технологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий.

**Алексей Сергеевич Полочанский** – аспирант кафедры телекоммуникаций и информационных технологий факультета радиоп физики и компьютерных технологий. Научный руководитель – К. С. Мулярчик.

#### Authors:

**Konstantin Mulyarchik**, PhD (engineering), docent; associate professor at the department of telecommunications and information technologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

*k.mulyarchik@gmail.com*

**Aleksei Polochanskiy**, postgraduate student at the department of telecommunications and information technologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

## QUALITY OF SERVICE IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

*K. S. MULYARCHIK<sup>a</sup>, A. S. POLOCHANSKIY<sup>a</sup>*

<sup>a</sup>*Belarusian State University, Niezaliežnasci Avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus*

*Corresponding author: K. S. Mulyarchik (k.mulyarchik@gmail.com)*

The definition for the concept «quality of service» for wireless sensor networks has been given. The differences of the concept «quality of service» for wireless sensor networks from classic computer networks has been analyzed. Wireless sensor networks features have been analyzed as well as the requirements related to the quality of service. Based on the results of the analysis of wireless sensor networks features the following quality of service characteristics have been defined: latency, bandwidth, packet loss, network lifetime, area coverage and tolerance to change in the topology. The dependency of the quality of service characteristics on technologies used at different network model layers has been analyzed as well as the influence of the used technologies on the values of the corresponding quality of service characteristics. Classification of problems that can be solved by wireless sensor networks has been introduced based on different network traffic models, networks with constant and variable topology have been considered separately.

**Key words:** wireless sensor network; quality of service; quality of service characteristics; classes of tasks of wireless sensor networks.

### Введение

Телекоммуникационная сеть является программно-аппаратной системой. Основная ее задача – предоставление оконечным устройствам сервиса по передаче данных. Для телекоммуникационных сетей вводится понятие «качество обслуживания» в целях задания количественных характеристик сервиса по передаче данных и определения соответствия этих характеристик заданным требованиям в заданных условиях. Качество обслуживания является интегральным показателем, описывает сервис по передаче данных как таковой и состоит из набора количественных характеристик сервиса, при этом каждая из них связана с определенным аспектом функционирования самой телекоммуникационной системы.

В классических компьютерных сетях количественными характеристиками сервиса выступают временная задержка при передаче пакета, разброс задержек, пропускная способность канала связи, а также доля потерь пакетов в канале связи (или вероятность доставки пакета).

Телекоммуникационные сети используются для решения большого количества задач, а соответствующий им трафик в сети имеет разнообразный характер. Так, для задачи потоковой передачи аудио- или видеoinформации трафик выступает как непрерывный поток больших по размеру пакетов, а для задачи обмена текстовыми сообщениями между различными пользователями – как нестационарный поток пакетов небольшого размера. Таким образом, можно обобщить и выделить набор классов решаемых задач, в рамках которых трафик характеризуется определенным паттерном. В свою очередь, в зависимости от решаемой задачи к сервису по передаче данных предъявляются разные требования, характеристики функционирования сети получают определенный приоритет, а также используются соответствующие механизмы обработки трафика [1]. Классические телекоммуникационные сети используются, как правило, для одновременного решения различных классов задач.

Беспроводные сенсорные сети представляют собой особый класс информационно-телекоммуникационных систем. С точки зрения архитектуры и физического построения они состоят из большого количества миниатюрных приемопередатчиков с автономным источником питания. Беспроводные сенсорные сети предназначены для решения широкого круга мониторинговых и управленческих задач в таких сферах, как промышленность, сельское хозяйство, медицина, защита от чрезвычайных ситуаций и т. д. К основным свойствам беспроводных сенсорных сетей можно отнести самоорганизацию, автономность, наличие или отсутствие мобильности узлов, одноранговую топологию. Таким образом, беспроводные сенсорные сети, в отличие от классических, представляют собой сервис не только по передаче данных, но и по их сбору и обработке. Соответственно, понятие «качество обслуживания» для беспроводных сенсорных сетей и его характеристики несколько отличаются от классического представления [2–4] и требуют переопределения. Необходимо произвести классификацию задач, которые решаются при помощи беспроводных сенсорных сетей, и установить соответствующие им требования к качеству обслуживания.

### Особенности качества обслуживания в беспроводных сенсорных сетях

Выделим характерные для беспроводных сенсорных сетей особенности, которые определяются условиями их функционирования, влияющими на определение качества обслуживания.

*Ограниченные ресурсы.* Одной из основных особенностей беспроводных сенсорных сетей является ограниченность ресурсов узла. Поскольку узел сети должен быть минимизирован по размеру и стоимости, он обладает небольшими вычислительными возможностями, размером буфера, мощностью передачи, а также ограниченным временем функционирования. В связи с этим одной из задач качества обслуживания является эффективное использование имеющихся ресурсов для более длительного поддержания функционирования сети.

*Устойчивость.* Беспроводные сенсорные сети состоят из большого числа сенсоров и должны быть устойчивыми к изменениям топологии – добавлению нового узла, выходу из строя или перемещению имеющегося узла, перераспределению по кластерам и т. д. С точки зрения качества обслуживания все эти изменения не должны повлиять на функционирование и доступность сети.

*Различные виды трафика.* В зависимости от назначения беспроводной сенсорной сети к передаваемому трафику могут предъявляться определенные требования. Например, задержка передачи пакета может играть разную роль в различных приложениях. Требования к качеству обслуживания варьируются в зависимости от класса задач.

*Модель передачи данных.* Беспроводная сенсорная сеть может обладать одной из трех моделей передачи данных: узлы передают данные на базовую станцию с определенным периодом; станция сама инициирует передачу данных, запрашивая информацию о состоянии определенного узла или их группы; узел посылает пакет данных при определенном событии.

*Характер сбора данных.* В беспроводных сенсорных сетях данные, полученные от каждого отдельно взятого узла, как правило, не играют большой роли. Обычно данные принимаются с нескольких датчиков, которые расположены внутри некоторой области, а передается их усредненное значение. Поскольку ресурсы, затрачиваемые на передачу данных, сравнительно велики, предварительная обработка данных может быть осуществлена в самих узлах для уменьшения количества передаваемых данных. Гарантия доставки отдельно взятого пакета имеет небольшое значение для качества обслуживания при сборе информации с региона.

*Мобильность.* Для некоторых приложений узлы сенсорной сети не устанавливаются статично, их местоположение может изменяться. Это вносит дополнительные сложности при маршрутизации, определении координат и др.

Таким образом, качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях – это интегральная характеристика, которая определяет возможность сети выполнять сбор, обработку и передачу данных при тех или иных заданных условиях (ограниченность ресурсов, мобильность узлов, модель передачи данных и др.).

### Характеристики качества обслуживания в беспроводных сенсорных сетях

Выделим критерии, относящиеся к передаче данных в беспроводных сенсорных сетях, по которым можно оценивать качество обслуживания.

*Задержка.* Анализируя задержку в беспроводных сенсорных сетях, необходимо учитывать используемую в сети модель передачи данных. При периодической трансляции данных на базовую станцию задержка будет состоять из времени передачи пакета от узла к узлу, построения маршрута, ожидания узлом свободного канала передачи и, возможно, времени предварительной обработки, осуществляемой на узлах. Когда на узел поступает запрос со станции, задержка равна времени, которое прошло с момента отправки запроса и до получения пакета данных. При событийной модели задержка будет состоять из времени, прошедшего от наступления события, до его получения базовой станцией. Задержка в беспроводных сенсорных сетях зависит от времени передачи и обработки данных на узлах, а также от алгоритма маршрутизации и механизма доступа к среде. В общем виде время задержки можно выразить следующим образом:

$$\Delta t_3 = \Delta t_d + \Delta t_m + \sum_n (\Delta t_{ок} + \Delta t_{обр} + \Delta t_{пер}),$$

где  $\Delta t_d$  – время, требуемое на детектирование события;  $\Delta t_m$  – время построения маршрута;  $\Delta t_{ок}$  – время ожидания свободного канала связи;  $\Delta t_{обр}$  – время обработки пакета на узле;  $\Delta t_{пер}$  – время передачи пакета между узлами.

*Пропускная способность.* Пропускная способность сети определяет количество данных, которые могут быть переданы в единицу времени, и измеряется в битах в секунду. Скорость передачи данных, как и задержка, зависит от выбора маршрута, ресурсов отдельных датчиков и сети в целом. В беспроводных сенсорных сетях количество передаваемых пакетов зависит от специфики задачи. Оно может варьироваться от нескольких пакетов в час до сотен пакетов в секунду. Пропускная способность выражается через количество пакетов, которые узел способен обработать за единицу времени:

$$B = n \cdot \langle S \rangle,$$

где  $n$  – максимальное количество пакетов, обрабатываемых на узле за 1 с;  $\langle S \rangle$  – средний размер пакета.

*Потери.* Потери пакетов данных в беспроводных сенсорных сетях на канальном уровне могут возникать из-за коллизий, а на уровне маршрутизации – из-за неправильно построенного маршрута или при выходе из строя какого-либо узла. Потери выражаются через отношение потерянных пакетов к общему количеству:

$$\eta = \frac{N_{\text{пот}}}{N_{\text{общ}}},$$

где  $N_{\text{пот}}$  – количество потерянных пакетов;  $N_{\text{общ}}$  – общее количество.

*Время жизни сети.* Один из параметров качества обслуживания для беспроводных сенсорных сетей – время, в течении которого сеть сможет обеспечивать передачу данных. Поскольку время работы датчиков ограничено, необходимо минимизировать затраты при установке сети, обработке и, что особенно важно, при передаче данных. На энергетические затраты влияют выбор маршрута, режим прослушивания канала (спящий или активный режим работы сенсора), объем передаваемых данных и др.

*Покрывание заданной области.* Качество обслуживания беспроводной сенсорной сети оценивается относительно того, какая часть области, с которой собираются данные или ведется контроль, находится в радиусе действия сенсоров. Таким образом определяется полнота информации, которой потенциально располагает система. Этот параметр может быть выражен в количестве  $n$  сенсоров, необходимых для покрытия области площадью  $S$  с минимально допустимым уровнем сигнала.

*Устойчивость к изменению топологии.* Как уже упоминалось, беспроводная сенсорная сеть должна функционировать в условиях изменения топологии: при выходе узла из строя, по истечении срока его действия, при добавлении новых или перемещении существующих узлов. Для беспроводных сенсорных сетей устойчивость является одним из основных критериев качества обслуживания, поскольку они могут быть распределены таким образом, что контроль каждого узла, замена батареи или починка невозможны или сильно затруднены. Количественно эта характеристика может выражаться во времени, которое прошло с момента изменения топологии сети до восстановления ее функционирования. На характеристику устойчивости в первую очередь влияет то, как организована маршрутизация в сети, а также способ получения узлами сети информации друг о друге (таблицы маршрутизации, периодическая нотификация соседних узлов).

Обеспечение качества обслуживания зависит от особенностей протокола на каждом уровне сетевой модели [5, р. 130–141]: на физическом уровне качество обслуживания зависит от уровня шума, способа кодировки и др., на канальном – от времени доступа к среде и надежности доставки пакетов. В зависимости от реализации алгоритма маршрутизации могут изменяться расход энергии сети, задержка и скорость доставки сообщений. В табл. 1 приведены факторы, которые влияют на характеристики качества обслуживания, относящиеся к тому или иному уровню сетевой модели.

Таблица 1

**Взаимосвязь характеристик качества обслуживания с различными факторами реализации сетевой модели**

Table 1

**Relation of quality of service characteristics with network model implementation factors**

Характеристика качества обслуживания	Физический уровень	Канальный уровень	Сетевой уровень
Задержка	Способ кодировки	Расписание доступа к каналу	Время определения маршрута, длина пути
Пропускная способность	Размер сообщений	Синхронизация доступа к каналу, избыточные пакеты	Маршрутизация по нескольким путям, дополнительные данные маршрутизации в пакете, кластеризация
Потери	Уровень шума	Коллизии	Тупиковые маршруты, заикливания
Время жизни сети	Способ кодировки, мощность передачи	Время активного и пассивного режимов, повторная передача пакетов	Использование одних и тех же узлов при построении маршрута, кластеризация

Окончание табл. 1  
Ending table 1

Характеристика качества обслуживания	Физический уровень	Канальный уровень	Сетевой уровень
Покрытие	Мощность передачи	–	–
Устойчивость	Мощность передачи	Период смены режимов	Динамическая маршрутизация, кластеризация

### Классы задач качества обслуживания

Для того чтобы выяснить, какие параметры качества обслуживания являются существенными в каждой конкретной задаче, необходимо выделить классы задач, решаемых при помощи беспроводных сенсорных сетей, а также определить, какие показатели являются наиболее важными. Можно выделить следующие классы задач (или классы обслуживания в беспроводных сенсорных сетях в зависимости от реализуемой модели передачи данных) [6].

*Задачи, связанные с мониторингом окружающей среды, состояния промышленных объектов.* Узлы сети измеряют некоторые параметры (температуру, давление, влажность) и отправляют данные через равные промежутки времени. В связи с предсказуемостью трафика доступ к каналу может быть синхронизирован и определено время доставки. В данном случае главный критерий качества обслуживания – время жизни сети, поскольку в реальных условиях замена датчиков или их батарей может быть затруднена. Время жизни сети возможно увеличить за счет равномерного использования узлов при маршрутизации, а также введения спящего режима во время неактивности узла.

Поскольку время доставки в таких приложениях особой роли не играет, оно может достигать нескольких десятков секунд. Время жизни таких систем должно достигать от нескольких месяцев до нескольких лет.

*Задачи, в которых датчики должны постоянно измерять какой-либо показатель и сразу передавать его на базовую станцию.* Здесь приоритетным показателем является скорость доставки (задержка) и пропускная способность сети, обуславливающая возможность обрабатывать одновременно большое количество пакетов. Узлы отправляют пакеты без синхронизированного расписания доступа к каналу, соответственно, в этом классе задач наблюдается низкая гарантия доставки пакетов.

*Задачи, связанные с детектированием некоторого события (датчики движения, сигнализация и др.).* Главным критерием качества обслуживания в таких задачах является гарантия доставки данных за приемлемый промежуток времени. Трафик в такой сети генерируется непредсказуемо.

*Задачи, в которых измерение показателя среды узлами сети происходит не постоянно, а по запросу, исходящему от базовой станции.* Энергопотребление узлов такой сети уменьшается, поскольку большую часть времени они находятся в пассивном режиме, кроме того, доступ к каналу передачи данных может контролироваться на уровне базовой станции, что упрощает реализацию MAC-протокола в узлах. Для задач такого типа приоритетными параметрами качества обслуживания являются гарантия доставки пакета и задержка, т. е. время, прошедшее с момента генерации запроса до момента получения данных базовой станцией.

Беспроводные сенсорные сети также могут разделяться по характеру изменения своей физической топологии во времени:

- сети со статичными узлами. Во многих задачах беспроводных сенсорных сетей местоположение сенсоров не меняется с течением времени. Для получения информации о взаимном расположении узлов и построения таблиц маршрутизации необходимо провести начальную настройку сети, в процессе которой узлы обмениваются информацией о своем положении и определяются уровни сигнала, который доходит от одного узла к другому. В соответствии с этими данными в зависимости от реализации протокола маршрутизации будет происходить построение маршрута и передача данных от узла к узлу. Повторная настройка сети проводится только при добавлении нового или выходе из строя старого узла;

- сети с мобильными узлами. Существует ряд задач, в которых взаимное расположение узлов (физическая топология) беспроводной сенсорной сети не является фиксированным. Узлы в такой системе должны периодически обмениваться данными о своем положении. В зависимости от изменения топологии конфигурация сети может изменяться – кластеры переформируются, маршруты меняться и т. д. В таких задачах приоритетным является непрерывное функционирование сети в условиях изменения топологии, даже если оно будет достигаться за счет увеличения задержки или уменьшения пропускной способности.

Следует отметить, что в зависимости от среды (окружения), в которой расположена сеть, между узлами могут появляться и исчезать препятствия, затрудняющие передачу сигнала, а также возникать

помехи в канале связи, что приводит к изменению уровня радиосигнала между узлами. Это эквивалентно изменению их взаимного расположения, или топологии. В данном случае даже сеть со статическими узлами может рассматриваться как мобильная.

В табл. 2 приведены приоритетные показатели качества обслуживания для выделенных классов задач, решаемых при помощи беспроводных сенсорных сетей, по топологии сети и по модели передачи данных.

Таблица 2

Приоритетные показатели качества обслуживания  
для различных классов задач беспроводных сенсорных сетей

Table 2

Quality of service priority characteristics  
for different wireless sensor networks problem classes

Класс задачи	Сети со статическими узлами	Сети с мобильными узлами
Периодическое измерение показателя	Время жизни	Время жизни
Постоянное измерение показателя	Задержка, пропускная способность	Устойчивость, задержка
Детектирование события	Гарантия доставки (надежность) за предсказуемый период времени	Устойчивость, потери
Измерение показателя по запросу	Потери, задержка	Устойчивость, потери

## Заключение

Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях определяется способностью сети обеспечить определенный уровень сервиса по сбору, обработке и передаче данных в заданных условиях. Для эффективного использования беспроводных сенсорных сетей необходимо при их построении применять технологии, позволяющие обеспечить требуемый уровень качества обслуживания. В этих целях были определены характеристики качества обслуживания, существенные для беспроводных сенсорных сетей, и проанализирована их зависимость от использования технологий и протоколов на тех или иных уровнях сетевой модели. В зависимости от специфики задачи приоритетными являются те или иные показатели качества обслуживания. Проведенная классификация задач позволяет определить требуемый класс обслуживания для каждой конкретной задачи, решаемой при помощи беспроводных сенсорных сетей.

## Библиографические ссылки

1. Firoiu V., Le Boudec J. Y., Towsley D., et al. Theories and Models for Internet Quality of Service // Proc. IEEE. 2002. Vol. 90, issue 9. P. 1565–1591.
2. Xia F. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks // Sensors. 2008. Vol. 8, issue 2. P. 1099–1110.
3. Balen J., Zagar D., Martinovic G. Quality of service in wireless sensor networks: a survey and related patents // Recent Pat. Comput. Sci. 2011. Vol. 4, № 3. P. 188–202.
4. Wang Y., Liu X., Yin J. Requirements of quality of service in wireless sensor network // International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies : proc. int. conf. on netw. Washington, 2006. P. 116.
5. Ramassamy C., Fouchal H., Hunel P. Impact of application layers over wireless sensor networks. Bonn, 2012.
6. Мулярчик К. С., Полочанский А. С. Анализ характеристик качества обслуживания в беспроводных сенсорных сетях [Электронный ресурс] // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии : материалы междунар. науч. конгресса (Минск, 24–27 окт. 2016 г.). URL: <http://www.elib.bsu.by/handle/123456789/160468> (дата обращения: 10.12.2016).

## References

1. Firoiu V., Le Boudec J. Y., Towsley D., et al. Theories and Models for Internet Quality of Service. *Proc. IEEE*. 2002. Vol. 90, issue 9. P. 1565–1591. DOI: 10.1109/JPROC.2002.802002.
2. Xia F. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks. *Sensors*. 2008. Vol. 8, issue 2. P. 1099–1110. DOI: 10.3390/s8021099.
3. Balen J., Zagar D., Martinovic G. Quality of service in wireless sensor networks: a survey and related patents. *Recent Pat. Comput. Sci.* 2011. Vol. 4, No. 3. P. 188–202. DOI: 10.2174/2213275911104030188.
4. Wang Y., Liu X., Yin J. Requirements of quality of service in wireless sensor network. *International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies* : proc. int. conf. on netw. Washington, 2006. P. 116.
5. Ramassamy C., Fouchal H., Hunel P. Impact of application layers over wireless sensor networks. Bonn, 2012.
6. Mulyarchik K. S., Polochanskiy A. S. Quality of service characteristics analysis in wireless sensor networks. *International congress on informatics: information systems and technologies* : mater. of the int. sci. congr. (Minsk, 24–27 Oct., 2016). URL: <http://www.elib.bsu.by/handle/123456789/160468> (date of access: 10.12.2016) (in Russ.).