

Исследование моделей связности сенсорных сетей

Т. Н. Астахова^а, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-7032-0697, ctn_af@mail.ru

Н. А. Верзун^{б, в}, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-0126-2358

В. В. Касаткин^г, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-7523-4926

М. О. Колбанев^{б, в}, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-4825-6972

А. А. Шамин^а, канд. экон. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-7690-8718

^аНижегородский государственный инженерно-экономический университет, Октябрьская ул., 20а, Княгинино, 606340, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

^вСанкт-Петербургский государственный экономический университет, Садовая ул., 21, Санкт-Петербург, 191023, РФ

^гСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Введение: одним из ключевых и актуальных направлений исследований беспроводных сенсорных сетей является изучение способов экономии энергии отдельными устройствами для увеличения времени их функционирования без перезаряда батареи. В настоящей статье вводится и исследуется новая, учитывающая энергопотребление, стохастическая характеристика качества функционирования беспроводной сенсорной сети, расширяющая понятие связности. Эта характеристика отражает способность сети устанавливать соединения между сетевыми элементами в пределах геометрических границ сенсорного поля в реальном масштабе времени при определенном уровне заряда батарей сенсорных устройств. **Цель исследования:** выявление взаимной зависимости вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик, а также влияния на эти характеристики таких параметров беспроводной сенсорной сети, как геометрические размеры, модель распределения сенсорных устройств в пределах сенсорного поля, топология сети и алгоритмы маршрутизации сообщений. **Результаты:** предложена новая стохастическая характеристика качества функционирования беспроводных сенсорных сетей – связность, которая охватывает в комплексе пространственные, временные и энергетические характеристики сети, что позволяет с общих позиций описать широкий комплекс задач, возникающих при исследовании процессов функционирования беспроводных сетей на этапах сбора, распространения и обработки данных сенсорными устройствами; введены стохастические показатели связности беспроводных сенсорных сетей, которые описывают сеть как целое, что позволяет исследовать процессы задержки и блокировки информационного обмена с учетом размера сенсорного поля и мощности, потребляемой отдельными устройствами; построены модели для оценки вероятности связности беспроводных сенсорных сетей, времени доставки сообщений и квантили времени доставки, что позволяет повысить точность оценок качества функционирования беспроводной сенсорной сети. **Практическая значимость:** полученные модели и методы нацелены на использование при цифровизации сельскохозяйственных организаций и в учебном процессе Княгининского университета.

Ключевые слова – беспроводная сенсорная сеть, вероятностно-временные характеристики, вероятностно-энергетические характеристики, вероятность связности, время доставки сообщений, кластер, мощность сигнала на передающей антенне, связность сети, μ -квантиль времени доставки.

Для цитирования: Астахова Т. Н., Верзун Н. А., Касаткин В. В., Колбанев М. О., Шамин А. А. Исследование моделей связности сенсорных сетей. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 5, с. 38–50. doi:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50

For citation: Astakhova T. N., Verzun N. A., Kasatkin V. V., Kolbanev M. O., Shamin A. A. Sensor network connectivity models. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 38–50 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50

Введение

В последнее время широкое распространение интернета вещей и других технологий третьей платформы информатизации [1] привело к появлению большого числа публикаций, посвященных исследованию всепроникающих сенсорных сетей, объединяющих сенсорные устройства, которые контролируют те или иные параметры физического пространства, свободно перемещаются в этом пространстве и имеют автономное питание.

К числу наиболее актуальных направлений исследования беспроводных сенсорных сетей относится изучение способов экономии энергии отдельными устройствами для увеличения времени их функционирования без перезаряда батареи [2–7]. Исследования такого рода имеют и ярко выраженный экологический аспект, поскольку объем энергии, потребляемой инфокоммуникационными системами и сетями, достиг трети от всей электроэнергии, генерируемой в мире, так что сети оказывают все большее негативное влияние на окружающую среду [8, 9].

В настоящей статье вводится и исследуется новая, учитывающая энергопотребление, стохастическая характеристика качества функционирования беспроводной сенсорной сети, расширяющая понятие связности. Она отражает способность сети устанавливать соединения между сетевыми элементами в пределах границ сенсорного поля в реальном масштабе времени при определенном уровне заряда батарей сенсорных устройств.

В фиксированных сетях связи [10], использующих системы с центральной батареей, связность обусловлена топологией сети, т. е. способом соединения сетевых элементов друг с другом. Передача данных между стационарно расположенными терминалами обеспечивается здесь оконечными станциями и транзитными узлами и может быть заблокирована только в случае перегрузки сети или отказа ее элементов.

При определении связности беспроводных сенсорных сетей необходимо учитывать не только выбранную топологию, сетевые перегрузки и надежность сетевых элементов, но и емкость электрических батарей каждого из устройств, поскольку к нарушению связности могут привести:

— разрывы соединений в моменты окончания запаса энергии батареи одного из сетевых элементов;

— невозможность установить соединения из-за ограниченной мощности сигнала на передающей антенне сенсорного устройства и слишком больших расстояний от него до соседних сетевых элементов.

Остаточная емкость батареи является функцией энергопотребления, а энергопотребление, в свою очередь, зависит и от размеров контролируемого физического пространства, и от закона распределения сенсорных устройств в этом пространстве, и от протоколов функционирования беспроводной сенсорной сети на физическом, канальном и сетевом уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем [11]. Изменяя размеры сенсорного поля, которое охватывает беспроводная сенсорная сеть, проектируя специальные алгоритмы модуляции, множественного доступа и маршрутизации, которые используют сенсорные устройства, можно существенно сократить расход энергии. Это означает, что возможно восстановление связности, частично потерянной в ходе функционирования беспроводной сенсорной сети, не только путем заряда батареи, но и путем сокращения пространственных параметров беспроводной сенсорной сети или изменения протоколов информационного взаимодействия сенсорных устройств.

Связность как характеристика качества функционирования беспроводной сенсорной сети пред-

ставляет собой обобщение другой характеристики беспроводной сенсорной сети — времени жизни сети, под которой понимают [12–14] интервал времени с момента запуска сети в эксплуатацию до момента разряда батареи у любого из сетевых устройств с автономным питанием. Время жизни сети можно рассматривать как частный случай связности, когда прерывается информационное взаимодействие с одним из сетевых устройств. Связность сети, в отличие от времени жизни сети, характеризует сеть в целом, а не свойства ее отдельных элементов [15, 16]. Она дает возможность исследовать как процессы задержки и блокировки информационного обмена из-за недостаточной мощности радиопередатчика, так и процессы функционирования сети при восстановлении энергопитания сетевых элементов, временно прекративших свою работу.

Объектом исследования в данной статье является беспроводная сенсорная сеть связи, состоящая из сенсорных узлов, контролирующего физическое пространство, и головного узла, который аккумулирует информацию, поступающую от сенсоров всех устройств. Предметом исследования выступают модели связности беспроводной сенсорной сети, описывающие, с одной стороны, вероятностно-временные характеристики процесса обмена сообщениями и, с другой стороны, вероятностно-энергетические характеристики процесса потребления электроэнергии, обеспечивающего такой обмен в физическом пространстве.

Цель исследования — выявление взаимной зависимости вероятностно-временных и вероятностно-энергетических характеристик, а также влияния на эти характеристики таких параметров беспроводной сенсорной сети, как ее геометрические размеры, модель распределения сенсорных устройств в пределах сенсорного поля, топология беспроводной сенсорной сети и алгоритмы маршрутизации сообщений.

Показателями связности беспроводной сенсорной сети выбраны следующие вероятностно-временные характеристики процесса информационного взаимодействия сенсорных устройств друг с другом и с головным узлом, рассчитываемые при заданном уровне энергопотребления устройствами и размерах сенсорного поля:

- вероятность связности сети;
- время доставки сообщений до головного узла кластера беспроводной сенсорной сети;
- μ -квантиль времени доставки сообщений.

Получены функциональные зависимости этих вероятностно-временных характеристик от мощности радиосигнала на передающей антенне сенсорного устройства, используемого частотного диапазона и коэффициентов усиления передающей и приемной антенн.

Кластерная организация беспроводной сенсорной сети

Основные электропотребители типичного сенсорного устройства представлены на рис. 1. Помимо собственно сенсорной подсистемы, объединяющей группу аналоговых и (или) цифровых сенсоров для измерения некоторого набора физических параметров окружающей среды, это подсистемы обработки и коммуникации. Подсистема коммуникации всегда строится при помощи модулей радиосвязи, поскольку только так можно обеспечить мобильность устройства.

Каждая из этих трех подсистем сенсорного устройства нуждается в энергии электрической батареи, но главным потребителем оказывается радиопередатчик, которому для передачи одного бита данных требуется примерно в миллион раз больше энергии, чем для обработки одного бита в микроконтроллере [6].

На этом основании задача исследования связности беспроводной сенсорной сети с достаточной степенью точности сводится к оценке той энергии, которую потребляет сенсорное устройство для отправки сообщений внутри заданного пространства в соответствии с протоколами работы беспроводной сенсорной сети.

Рассмотрим беспроводную сенсорную сеть, в которой все сенсорные узлы разделены по какому-либо принципу на группы или кластеры [17, 18]. Принципы разделения устройств на группы могут быть различными: географические координаты, типы сенсоров, уровни энергопотребления, емкости электрических батарей и пр. В каждом кластере одно из сенсорных устройств выполняет роль головного кластерного узла, который агрегирует трафик всех остальных сенсорных устройств кластера и продвигает его дальше к базовой станции. Взаимодействие сенсорных

устройств с облаком или с сенсорными устройствами других кластеров реализуется через базовые станции. Наиболее общий случай подобной архитектуры — это беспроводная сенсорная сеть, в которой любое сенсорное устройство кластера может в разные моменты времени выполнять роль головного кластерного узла. В работе [19] отмечается, что кластерная организация сенсорной сети эффективна и масштабируема для функционирования беспроводной сенсорной сети лишь при условии рационального выбора головного узла в конкретный момент времени [20–23]. Оценка надежности систем, предусматривающих перераспределение запросов, объединенных в кластеры, дана в работах [24, 25].

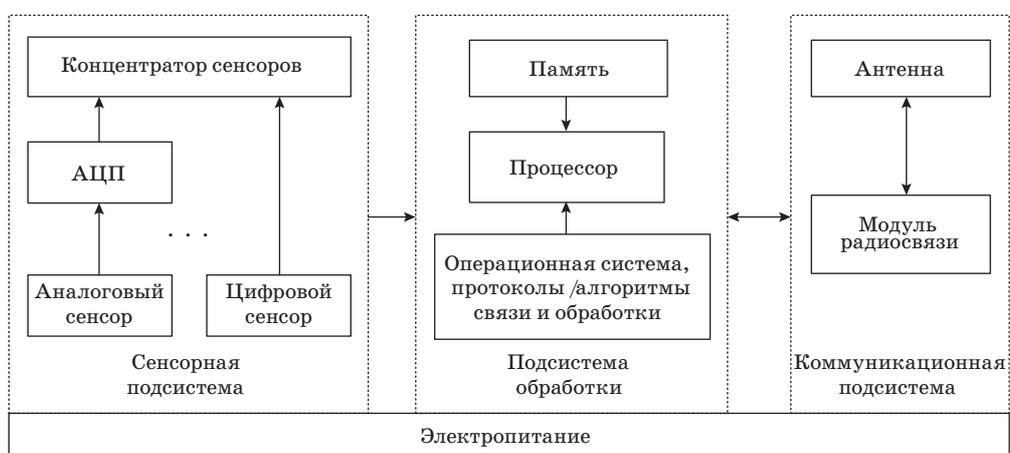
Примером протоколов выбора головного кластерного узла служат протоколы LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), BCDCP (Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol), которые опираются на выбор устройства с наибольшим уровнем остаточной энергии.

Без потери общности полученных результатов ограничимся рассмотрением процессов передачи данных, собираемых сенсорными устройствами одного кластера. Предположим, что каждое из сенсорных устройств с некоторой периодичностью формирует сообщения и передает их головному узлу кластера. На рис. 2 показаны два возможных варианта передачи данных внутри кластера [13]:

— непосредственная передача предусматривает доставку сообщений от каждого сенсорного устройства напрямую головному узлу без транзитов (рис. 2, а);

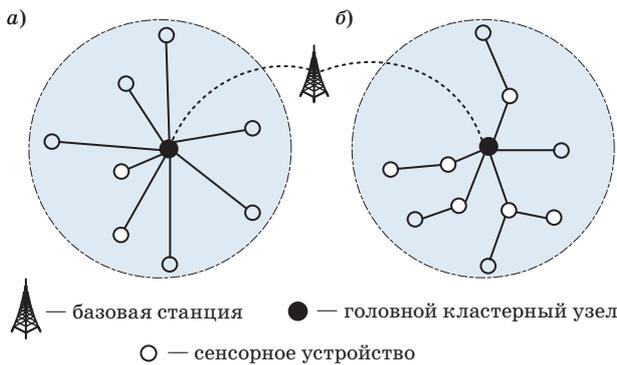
— транзитная передача допускает использование некоторых сенсорных устройств того же кластера в качестве промежуточных (рис. 2, б).

Узел сенсорной сети может потерять возможность передавать данные головному узлу по многим причинам: внешние воздействия, отказ обо-



■ Рис. 1. Архитектура сенсорного устройства

■ Fig. 1. Architecture of sensory unit



■ **Рис. 2.** Варианты взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети внутри кластеров: *a* — одноинтервальная связь; *b* — многоинтервальная связь

■ **Fig. 2.** Versions of interaction of wireless sensor network nodes within clusters: *a* — single interval connection; *b* — multiinterval connection

рудования, сбой в программном обеспечении и др. Рассмотрим одну из возможных причин такого рода — разряд аккумулятора сенсорного узла. Очевидно, что время наступления этого события зависит от начальной емкости батареи и уровня энергопотребления, а энергопотребление, в свою очередь, является случайной величиной, на которую влияют:

- объем передаваемых данных;
- интенсивность взаимодействия устройств;
- используемый радиочастотный спектр;
- геометрический размер кластера;
- плотность расположения сенсорных устройств;
- количество хопов (транзитов) при передаче;
- распределения сенсорных устройств в пространстве;
- используемые протоколы маршрутизации;
- другие параметры и алгоритмы работы беспроводной сенсорной сети и сенсорных устройств.

В рассматриваемой беспроводной сенсорной сети с кластерной организацией сенсорные устройства могут быть мобильными устройствами, а это значит, и число сенсорных устройств в кластере, и координаты их размещения случайны и изменяются с течением времени. Поэтому вероятность того, что какое-либо сенсорное устройство (из-за низкого заряда аккумулятора или удаленности от других устройств) не сможет передать данные головному кластерному узлу в фиксированный момент времени (либо напрямую в случае непосредственной связи, либо через промежуточные сенсорные устройства в случае транзитной связи), может быть отличной от нуля. Это отражает тот факт, что не все попытки передать блок данных от сенсорного головному узлу могут оказаться успешными. Если допустить возможность многократных попыток передачи, осуществляемых че-

рез определенные интервалы времени, то время доставки блока данных от сенсорного устройства к головному узлу будет случайной величиной, зависящей не только от фактического расстояния между ними, но и от вероятности связности сенсорного узла с головным кластерным узлом.

Вероятность связности беспроводной сенсорной сети

Для оценки связности беспроводной сенсорной сети и ее жизнеспособности целесообразно использовать показатели, учитывающие вероятностную и переменную (т. е. изменяющуюся во времени) топологию подобных сетей.

Введем следующие показатели связности беспроводной сенсорной сети:

— вероятность связности сенсорных устройств, $P_{св}$ — вероятность того, что передача данных от сенсорного узла к головному кластерному узлу возможна. Будем считать беспроводную сенсорную сеть работоспособной (жизнеспособной), если вероятность связности сенсорных устройств больше допустимого значения $P_{св,д}$, т. е. когда выполняется условие $P_{св} > P_{св,д}$;

— среднее время доставки блока данных от сенсорного устройства до головного кластерного узла, T [с];

— μ -квантиль случайной величины времени доставки блока данных от сенсорного к головному кластерному узлу, t_μ — значение, которое случайная величина t времени доставки блока данных от сенсорного устройства к головному кластерному узлу не превышает с заданной вероятностью μ .

Дополнительно предположим следующее:

— сенсорные устройства образуют сенсорное поле точек, распределенных на плоскости по закону Пуассона;

— сенсорные узлы собирают данные о каких-либо физических параметрах окружающей их среды и передают их в виде блоков данных с некоторой периодичностью;

— имеется возможность передавать блоки данных от сенсорных устройств либо непосредственно головному узлу, либо через дополнительные транзитные узлы, т. е. способ организации взаимодействия внутри кластера — многоинтервальный (см. рис. 2, б);

— в фиксированный момент времени известны географические координаты головного и каждого сенсорного узла сети. Это позволяет сенсорному устройству вычислить расстояние от себя до головного узла (обозначим через R [м]), а также определить направление передачи для транзита;

— из-за переменной топологии и возможного отсутствия связности между сенсорными узла-

ми и головным узлом ($P_{св} \neq 0$) не всегда имеется возможность доставить блок данных до головного узла. Перед успешной попыткой сенсорное устройство может предпринимать бесконечное или ограниченное число попыток передачи блока данных;

— мощность, которую использует сенсорный узел при передаче данных, ограничена величиной $P_{пер}$.

Передача радиосигнала через различные преграды в городской среде с радиочастотными шумами на дистанции несколько сотен метров может быть такой же трудной, как и обеспечение связи в прямой видимости на дистанции несколько километров. Примеры реалистических прогнозов расстояния рассматриваются на базе двухлучевой модели распространения радиоволн по формуле Фрииса (Harald Friis) [26]. Будем считать, что передача происходит в однородной среде при отсутствии препятствий, отражений, помех и иных факторов, влияющих на распространение и прием сигнала. Согласно уравнению для передачи мощность $P_{пер}$ с известной степенью приближения можно пересчитать в радиус круга — r [м], в пределах которого может быть выбрано сенсорное устройство для транзита блока данных:

$$r = \frac{\gamma}{4\pi\sqrt{P_{пр}}} \sqrt{C_{пер}C_{пр}P_{пер}}, \quad (1)$$

где γ — длина волны передаваемого радиосигнала, м; $P_{пр}$ — мощность радиосигнала на принимаемой антенне, Вт, будем считать заданной константой; $P_{пер}$ — мощность радиосигнала на передающей антенне, Вт; $C_{пер}$ — коэффициент усиления передающей антенны; $C_{пр}$ — коэффициент усиления приемной антенны.

Выше мы предположили, что каждое сенсорное устройство знает направление для передачи блока данных к головному узлу. Если дополнительно предположить, что сенсорное устройство расположено в центре круга, то в этом круге можно выделить сектор (обозначим его как Q), ориентированный в направлении головного кластерного узла (рис. 3). Сенсорные устройства, попавшие в сектор Q , можно использовать как транзитные для передачи блока данных к головному кластерному узлу.

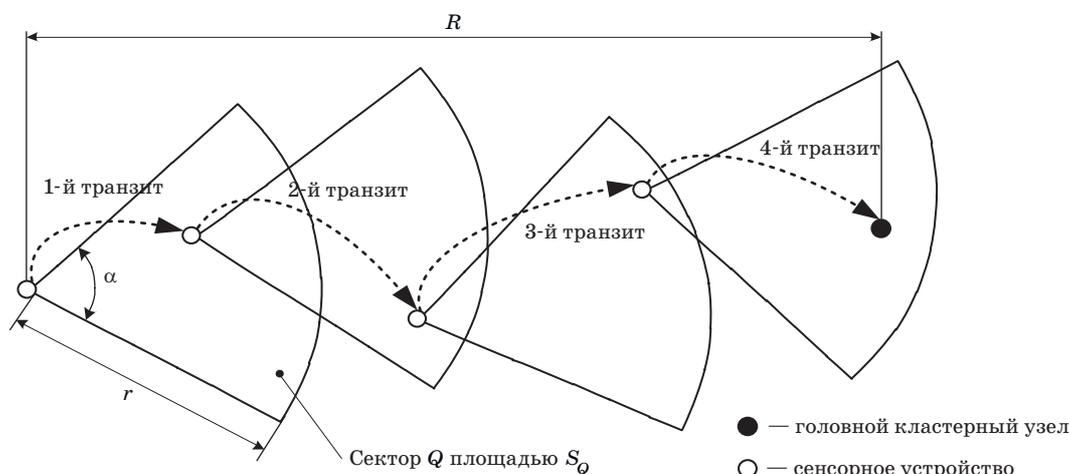
Площадь сектора Q вычисляется по формуле $S_Q = \frac{1}{2}r^2\alpha$, где α — угол сектора, рад; r — радиус круга [определяется из (1)], в пределах которого может вестись продуктивная передача блока данных от сенсорного узла (либо транзитному узлу, либо головному узлу кластера). Вероятность того, что в этом секторе будет обнаружен сенсорный узел (или головной узел кластера), который можно использовать для передачи ему блока данных в случае, когда узлы образуют пуассоновское поле точек, определяется по следующему закону:

$$F(r) = 1 - e^{-\frac{1}{2}r^2\alpha\lambda}, \quad (2)$$

где λ — плотность размещения сенсорных узлов.

Если фактическое расстояние от сенсорного узла до головного кластерного узла равно R , то количество транзитов (хопов) при передаче одного блока данных будет не меньше, чем $\left\lceil \frac{R}{r} \right\rceil$.

Существует вероятность того, что таких хопов потребуется больше $\left\lceil \frac{R}{r} \right\rceil$. Более того, существу-



■ **Рис. 3.** Передача блока данных от сенсорного устройства к головному кластерному узлу через транзитные сенсорные узлы

■ **Fig. 3.** Transmission a data block from the sensor node to the cluster head via transit sensor nodes

ет вероятность, что сообщение вообще не будет доставлено из-за того, что в радиусе r в нужном секторе отсутствует сенсорный узел, и поэтому ретрансляция блока данных невозможна, т. е. нарушается связность сенсорных устройств с головным узлом кластера.

Вероятность связности определяется вероятностями нахождения узла в требуемом секторе для осуществления транзита блока данных. Вероятность связности зависит от количества хопов, которые должен преодолеть блок данных. Событие, которое заключается в доставке блока до головного узла, наступит только в том случае, если будут найдены транзитные узлы для каждого хопа. Поэтому для вероятности связности справедлива формула

$$P_{св} = \prod_i F_i(r_i) = \prod_i \left(1 - e^{-\frac{1}{2}r_i^2\alpha\lambda} \right),$$

где i — номер транзита; r_i — расстояние между транзитными узлами на i -м хопе.

Доставка блока данных требует некоторых энергетических затрат. Определим их следующим образом.

Плотность функции распределения вероятности того, что при ограниченной мощности сигнала $P_{пер}$ блок данных будет доставлен от сенсорного к головному узлу кластера, определяется формулой

$$f_{\xi_1+\dots+\xi_X}(x_1, \dots, x_X) = f_{\xi_1}(x_1) * f_{\xi_2}(x_2) * \dots * f_{\xi_X}(x_X), \quad (3)$$

где $f_{\xi_1}(x_1), f_{\xi_2}(x_2), \dots, f_{\xi_X}(x_X)$ — плотности распределений случайных независимых непрерывных величин ξ_1, \dots, ξ_X соответственно, а X — количество хопов; «*» — операция свертки [27].

В нашем случае результат свертки имеет смысл случайной величины расстояния, которое проходит блок данных от узла источника к головному узлу. Без потери общности найдем это расстояние для случая двух хопов (т. е. когда $X = 2$).

Вероятность того, что в секторе Q будет обнаружен сенсорный узел (или головной узел кластера), задается формулой (2). Предположим, что расстояние r между двумя сенсорными узлами не больше радиуса действия передающего сенсорного устройства. Тогда из (3) можно написать

$$f_{\xi_1+\xi_2}(r) = f_{\xi_1}(r) * f_{\xi_2}(r) = \int_0^r f_{\xi_1}(u) f_{\xi_2}(r-u) du,$$

и случайная величина расстояния, которое преодолевает сообщение от сенсорных устройств, примет вид

$$f_{\xi_1+\xi_2}(r) = \frac{\sqrt{\alpha\lambda}}{4} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{1}{2}r\sqrt{\alpha\lambda}\right) \sqrt{\pi}(\alpha\lambda r^2 - 2) + 2r\sqrt{\alpha\lambda} e^{-\frac{1}{4}\alpha\lambda r^2} \right) \times e^{-\frac{1}{4}\alpha\lambda r^2},$$

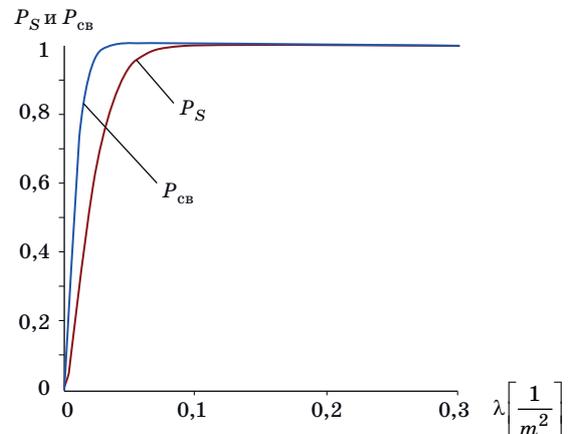
где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ — функция ошибок.

Вероятность $P_S(r)$ того, что расстояние, которое проходит блок данных, не меньше, чем R , определяется путем интегрирования функции $f_{\xi_1+\xi_2}(r)$:

$$P_S(r) = F_{\xi_1+\xi_2}(r) = -\frac{1}{2} \left(\sqrt{\pi} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2}r\sqrt{\alpha\lambda}\right) r\sqrt{\alpha\lambda} e^{-\frac{1}{4}\alpha\lambda r^2} - 2e^{-\frac{1}{4}\alpha\lambda r^2} + 2 \right) \times e^{-\frac{1}{4}\alpha\lambda r^2}. \quad (4)$$

Сравнение формул (2) и (4) показывает, что вероятность $P_S(r)$ приближается снизу к вероятности $P_{св}$ по мере увеличения плотности λ и может рассматриваться как нижняя граница вероятности связности (рис. 4). В дальнейших расчетах, при оценке вероятности связности, будем использовать формулу (4), поскольку она позволяет сопоставить вероятностно-временные и вероятностно-энергетические характеристики функционирования в плотных и сверхплотных беспроводных сенсорных сетях [28–31].

Подставив расстояние из формулы Фрииса в выражение (4), получим функцию распределения требуемой для этого мощности передатчика



■ **Рис. 4.** Сравнение вероятностей $P_{св}$ и P_S
 ■ **Fig. 4.** Comparison of probabilities $P_{св}$ and P_S

$$P_S(P_{\text{пер}}) = -\frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} A \sqrt{\alpha \lambda} \sqrt{P_{\text{пер}}} \right) \sqrt{\pi} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\alpha \lambda} e^{\frac{1}{4} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda} A \sqrt{P_{\text{пер}}} - 2e^{\frac{1}{2} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda} + 2 \right) \times \\ \times e^{-\frac{1}{2} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda}, \quad (5)$$

где $A = \frac{\gamma}{4\pi\sqrt{P_{\text{пр}}}} \sqrt{C_{\text{пер}} C_{\text{пр}}}$.

Определим далее время доставки блока данных от сенсорного до головного кластерного узла с учетом того, что связность сенсорных устройств — случайная величина.

Время доставки блока данных от сенсорного узла до головного кластерного узла — случайная дискретная величина T , складывающаяся, при условии, что $P_{\text{св}} \neq 0$, из нескольких t . В рамках данной модели за время t принимается интервал времени между попытками доставки. Для передачи блоков данных от сенсорного устройства выше предположили режим с бесконечным числом попыток, т. е. перед успешной передачей блока данных возможно несколько $(0, 1, 2, \dots, \infty)$ неудачных попыток, длительность каждой из которых равна t . Под неудачей будем понимать несостоявшуюся попытку передачи блока по причине отсутствия связности сенсора с головным кластерным узлом.

Среднее время доставки блока данных от сенсорного до головного кластерного узла определяется из следующего соотношения:

$$T = \frac{t(1 - P_S(P_{\text{пер}}))}{P_S(P_{\text{пер}})}, \quad (6)$$

или в явном виде

$$T = \frac{e^{\frac{1}{4} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda} \left(\sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} A \sqrt{\alpha \lambda} \sqrt{P_{\text{пер}}} \right) \times \right. \\ \left. \times A \sqrt{\alpha \lambda} \sqrt{P_{\text{пер}}} + 2e^{\frac{1}{4} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda} \right)}{e^{\frac{1}{4} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda} \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} A \sqrt{\alpha \lambda} \sqrt{P_{\text{пер}}} \right) \times \\ \times A \sqrt{\alpha \lambda} \sqrt{P_{\text{пер}}} - 2e^{\frac{1}{2} A^2 P_{\text{пер}} \alpha \lambda} + 2} t. \quad (7)$$

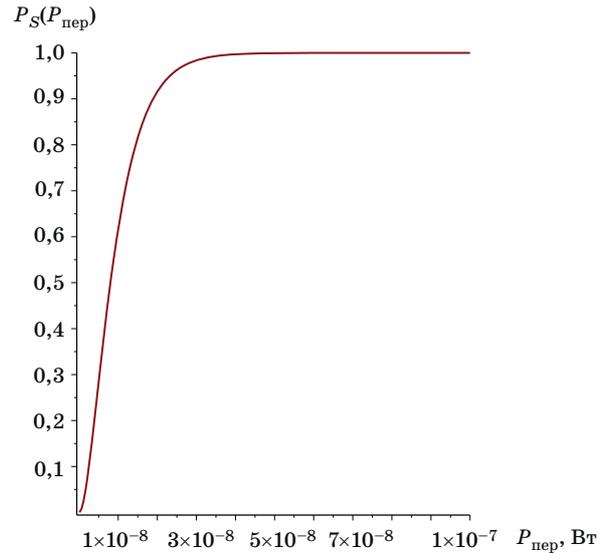
Вероятность того, что сообщение будет доставлено за N попыток, имеет вид

$$P_T(P_{\text{пер}}) = 1 - (1 - P_S(P_{\text{пер}}))^N.$$

Показатель связности μ -квантиль случайной величины времени доставки блока данных от сенсорного устройства к головному кластерному

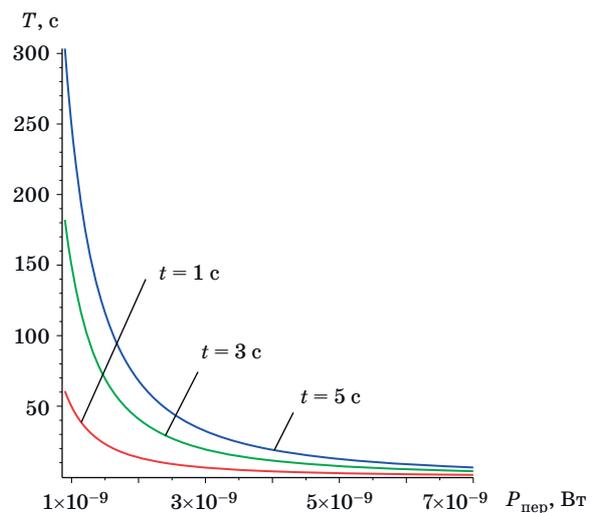
узлу, t_μ — это значение, которое случайная величина t времени доставки блока данных от сенсорного узла к головному кластерному узлу не превышает с заданной вероятностью μ ; t_μ определяется как решение уравнения вида

$$P_T(P_{\text{пер}}) = \mu \text{ или } 1 - (1 - P_S(P_{\text{пер}}))^N = \mu. \quad (8)$$



■ **Рис. 5.** Зависимость вероятности связности сенсорных узлов P_S от мощности радиопередатчика $P_{\text{пер}}$

■ **Fig. 5.** The dependence of the connectivity probability of the sensor nodes P_S on the radio transmitter power $P_{\text{пер}}$



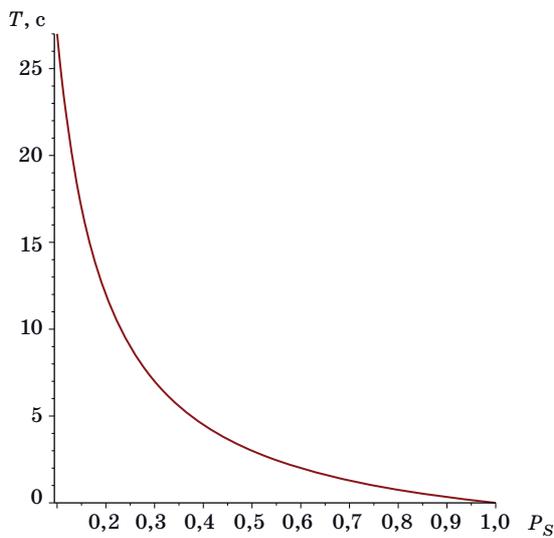
■ **Рис. 6.** Зависимость среднего времени доставки от мощности радиопередатчика $P_{\text{пер}}$ при фиксированном t

■ **Fig. 6.** The dependence of the average delivery time on the radio transmitter power $P_{\text{пер}}$ with fixed t

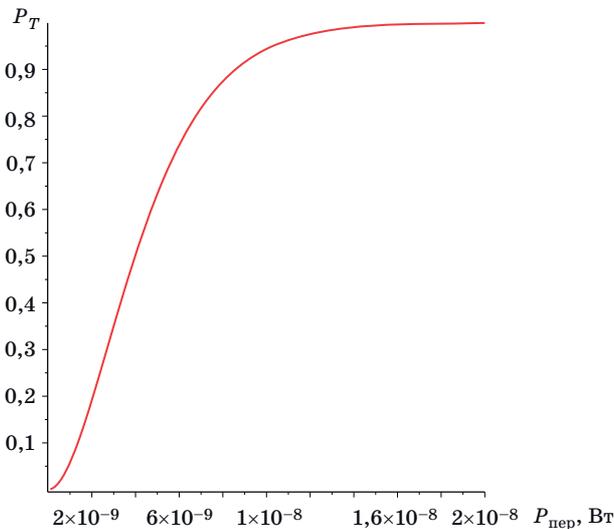
Для рассматриваемой модели предполагается, что среднее количество попыток вычисляется следующим образом:

$$N_{cp} = \frac{1}{P_S(P_{пер})} \left(1 - (1 - P_S(P_{пер}))^N (NP_S(P_{пер}) + 1) \right) + NP_S(P_{пер}).$$

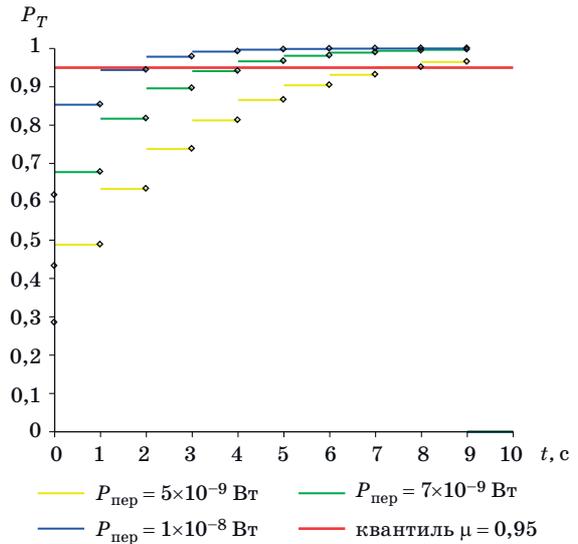
Применяя вышеприведенные выражения, проведем численный расчет и анализ влияния мощности радиопередатчика сенсорного устройства на вероятность связности беспроводной сенсорной сети. Расчеты проводились при сле-



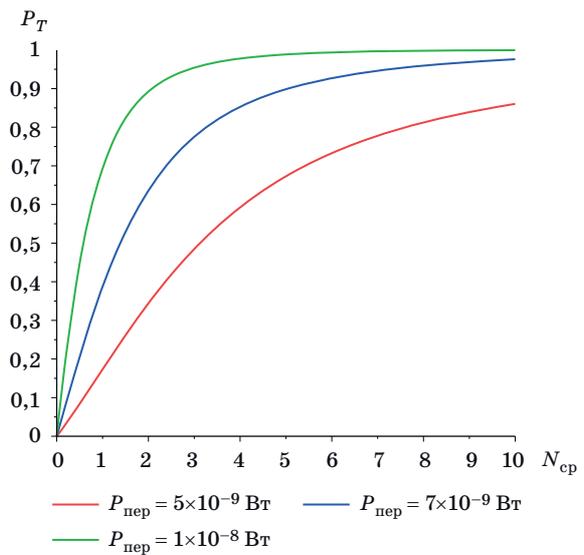
■ **Рис. 7.** Среднее время доставки блока данных от сенсорного узла до головного кластерного узла
 ■ **Fig. 7.** Average delivery time of a data block from the sensor node to the cluster head



■ **Рис. 8.** Вероятность доставки при $N = 3$
 ■ **Fig. 8.** Delivery probability at $N = 3$



■ **Рис. 9.** Вероятность $P_T(P_{пер})$ при различных значениях излучаемой мощности
 ■ **Fig. 9.** Probability $P_T(P_{пер})$ at various values of the radiated power



■ **Рис. 10.** Зависимость вероятности доставки от количества попыток
 ■ **Fig. 10.** Dependence of the delivery probability on the number of attempts

дующих исходных данных: $\alpha = \frac{\pi}{4}$, $\lambda = 0,1 \text{ 1/м}^2$, $C_{пер} = 1$, $C_{пр} = 1$, $\gamma = 0,122 \text{ м}$, $X = 2$. Предел чувствительности приемника -110 дБм , что соответствует $P_{пр} = 10^{-14} \text{ Вт}$. На рис. 5–10 представлены взаимные зависимости временных энергетических и пространственных характеристик беспроводной сенсорной сети. Графики позволяют определить любую из этих характеристик, если заданы две другие.

Обсуждение

В качестве одной из метрик для описания устойчивости сети к повреждениям была введена [10, 32] связность сети связи (network connectivity), которая, как правило, оценивалась детерминированными и независимыми от времени характеристиками. Например, в работе [10] связность предлагается определить «как минимальное число параллельных трактов между любой парой узлов». Однако такой подход справедлив лишь для стационарных сетей с фиксированной постоянной неизменной топологией. Когда же речь идет о мобильных сетях, в которых топологическая структура переменна, число, местоположение узлов, их распределение в пространстве случайно и меняется во времени, подобный подход не в полной мере отражает специфику взаимодействия узлов и работы сети.

На стохастическую природу связности указывается в разделе «Терминология» ГОСТ Р 53111-2008 [33] применительно к «направлению электросвязи»: «вероятность того, что на заданном направлении электросвязи существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемыми качеством и объемом».

Применительно к беспроводным сенсорным сетям понятие связности исследовалось в работах [14, 19, 34–36]. Так, в [19] отмечается, что в качестве основного параметра функционирования сенсорных сетей целесообразно рассматривать «доступность сети (возможность сети оказывать услугу), которая в свою очередь характеризуется связностью или вероятностью связности». Были представлены [19] модели беспроводных сенсорных сетей, позволяющие оценить связность сети или потенциальные возможности ее обеспечения. Целью исследований являлся «поиск зависимости связности сети от распределения узлов и влияние распределения узлов и их параметров на решение задач по построению сетей с заданными требованиями к связности», а при создании моделей беспроводных сенсорных сетей и исследовании связности рассматривалось и анализировалось влияние пространственных характеристик сети (число, распределение узлов на плоскости и пр.), но не принимались во внимание энергетические параметры устройств беспроводной сети.

Энергопотребление как один из ключевых вопросов для беспроводных сенсорных сетей анализируется, например, в публикациях [2, 37–43]. В работе [2] предлагается решать задачу увеличения времени жизни беспроводной сенсорной сети за счет управления энергетическим балансом приемопередающих узлов, обеспечивающих коррекцию мощности сигналов на основании результатов измерений дальности связи и с учетом особенностей прохождения сигнала в радиоканале и приема, а в статье [43] для обеспечения максимальной

продолжительности жизни беспроводной сенсорной сети предусматривается использование многопутевой маршрутизации с поддержкой режима энергетической балансировки узлов сети.

В отличие от указанных работ, в данном исследовании предлагается при определении связности принимать во внимание в комплексе пространственные, временные и энергетические характеристики беспроводных сетей и предложены показатели и модели для проведения соответствующих количественных оценок.

Заключение

В статье получены следующие научные результаты:

- предложена новая стохастическая характеристика качества функционирования беспроводных сенсорных сетей — связность, которая, в отличие от известных, охватывает в комплексе пространственные, временные и энергетические характеристики сети, что позволяет с общих позиций описать широкий комплекс задач, возникающих при исследовании процессов функционирования беспроводных сетей на этапах сбора, распространения и обработки данных сенсорными устройствами;

- введены стохастические показатели связности беспроводных сенсорных сетей, которые, в отличие от известных, описывают сеть как целое, а не свойства ее отдельных элементов, что позволяет исследовать процессы задержки и блокировки информационного обмена с учетом размера сенсорного поля и мощности, потребляемой отдельными устройствами;

- построены модели для оценки вероятности связности беспроводных сенсорных сетей, времени доставки сообщений и квантиля времени доставки, которые, в отличие от известных, учитывают мощность сигнала на выходной антенне сенсорного устройства, используемый частотный диапазон, количество хопов, число попыток передачи сообщений, взаимное расположение сенсорного устройства и головной станции и другие параметры, что позволяет повысить точность оценок качества функционирования беспроводной сенсорной сети.

Полученные модели и методы нацелены на использование при цифровизации сельскохозяйственных организаций и в учебном процессе Княгининского университета.

Финансовая поддержка

В статье представлена часть результатов научно-исследовательской работы «Сетевые центры

системы управления цифровым сельским хозяйством посредством сквозных технологий», выполняемой авторами по гранту ГБОУ ВО НГИЭУ

в рамках базовой части государственного задания № 10/01-41 от 03.03.2017 г.

Литература

1. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Татарникова Т. М. Технологическая платформа четвертой промышленной революции. *Геополитика и безопасность*, 2016, № 2 (34), с. 73–78.
2. Шостко И. С., Куля Ю. Э. Метод увеличения времени жизни автономной беспроводной сенсорной сети за счет применения энергоэффективных режимов работы передатчика. *Проблемы телекоммуникаций*, 2015, № 1 (16), с. 3–15. http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_shostko_ttl.pdf (дата обращения: 29.05.2019).
3. Бакин Е. А., Евсеев Г. С., Смирнов К. Н. Разработка и анализ алгоритмов сбора информации для одной модели телекоммуникационной системы с топологией «правильная решетка». *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 6, с. 107–112. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.107
4. Воробьев А. И., Колбанев А. М., Колбанев М. О. Модель оптимизации энергопотребления умными вещами. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2015, № 7, с. 46–49.
5. Астахова Т. Н., Колбанев М. О., Шамин А. А. Обеспечение энергоэффективности интернета вещей. Региональная информатика и информационная безопасность: сб. науч. тр. Санкт-Петербургское общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2018, с. 203–204.
6. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Шамин А. А. Энергетическая эффективность взаимодействия в беспроводных сенсорных сетях. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2017, т. 5, № 1, с. 88–96. <https://www.sut.ru/> (дата обращения: 29.05.2019).
7. Галинина О. С., Андреев С. Д., Тюрликов А. М. Учет специфики доступа большого числа устройств при межмашинном взаимодействии в современных сотовых сетях. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 4, с. 105–114. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114
8. Воробьев А. И., Колбанев А. М., Колбанев М. О. Зеленые информационные технологии. *Ученые записки Международного банковского института*. СПб., Изд-во МБИ, 2015, вып. 12, с. 153–165.
9. Воробьев А. И., Колбанев А. М., Колбанев М. О. Экологическая безопасность информационных технологий. *Геополитика и безопасность*, 2015, № 4 (32), с. 90–99.
10. Орлов С. А., Цилькер Б. Я. *Организация ЭВМ и систем*. СПб., Питер, 2015. 688 с.
11. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омелян А. В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей. *Омский научный вестник. Сер. Информатика, вычислительная техника и управление*, 2016, № 4 (14), с. 147–151.
12. Ерохин С. Д., Махров С. С. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях: основанные на местоположении узлов и направленные на агрегацию данных. *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*, 2013, № 3, с. 44–47.
13. Махров С. С. Исследование связности узлов в иерархических протоколах беспроводных сенсорных сетей. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, 2013, т. 13, № 4, с. 186–189.
14. Батенков К. А., Батенков А. А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости. *Труды СПИИРАН*, 2018, т. 3, № 58, с. 128–159.
15. Lee H., Nguyen L. T. H., Fujisaki Y. Algebraic connectivity of network-of-networks having a graph product structure. *Systems & Control Letters*, 2017, vol. 104, pp. 15–20.
16. Chen C., Peng R., Ying L., Tong H. Network connectivity optimization: Fundamental limits and effective algorithms. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2018, pp. 1167–1176.
17. Mishra S., Raj A., Kayal A., Choudhary V., Verma P., Biswal L. Study of cluster based routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2012, vol. 3, no. 7, pp. 1–7.
18. Awasthi K. K., Singh A. K., Tahilyani S. Study of cluster based routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 2017, vol. 163, no. 1, pp. 39–42.
19. Окунева Д. В. *Разработка и исследование моделей беспроводных сенсорных сетей при неравномерном распределении узлов*: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 159 с.
20. Кучерявый А. Е., Салим А. Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети. *Электросвязь*, 2009, № 8, с. 32–36.
21. Handy M. J., Haase M., Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. *4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, 2002, pp. 368–372.
22. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, vol. 1, no. 4, pp. 660–670.
23. Karl H., Willig A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007. 526 p.
24. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Голубев И. Ю., Богатырев С. В. Оптимизация распределения за-

- просов между кластерами отказоустойчивой вычислительной системы. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2013, № 3(85), с. 77–82.
25. **Богатырев В. А., Богатырев С. В.** Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2017, т. 60, № 2, с. 171–177.
 26. **Уоллес Р.** Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? *Новости электроники*, 2015, № 11, с. 3–13.
 27. **Глушков В. М., Амосов Н. М., Артеменко И. А.** *Энциклопедия кибернетики*. Киев, Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. 608 с.
 28. **Koucherjavuj Y., Pyattaev A., Johnsson K., Galinina O.** Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections. *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 20–31.
 29. **Мутханна А. С., Кучерявый А. Е.** D2D-коммуникации в сетях мобильной связи пятого поколения 5G. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2014, вып. 4 (8), с. 51–63.
 30. **Osseiran A., et al.** Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 26–35.
 31. **Бородин А. С.** *Разработка и исследование методов построения сетей связи пятого поколения: дис. ... канд. техн. наук.* СПб., 2019. 124 с.
 32. **Суздаев А. В.** *Сети передачи информации АСУ*. М., Радио и связь, 1983. 152 с.
 33. **ГОСТ Р 53111–2008.** *Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки*. М., Стандартинформ, 2009. 16 с.
 34. **Бузюков Л. Б., Парамонов А. И., Окунева Д. В.** Анализ связности БСС при различных распределениях узлов. *71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио: труды конференции*, СПб., 2016, с. 179–180.
 35. **Бузюков Л. Б., Парамонов А. И., Окунева Д. В.** Анализ связности самоорганизующейся беспроводной сети при различном распределении узлов по территории. *Электросвязь*, 2016, № 9, с. 58–62.
 36. **Кучерявый А. Е., Нуриллов И. Н., Парамонов А. И., Прокопьев А. В.** Обеспечение связности беспроводных сенсорных узлов гетерогенной сети. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2015, № 1 (9), с. 115–122.
 37. **Liu M., Cao J., Chen G., Wang X.** An energy-aware routing protocol in wireless sensor networks. *Sensors*, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 445–462.
 38. **Adeel A., Abid A., Sohail J.** Energy aware intra cluster routing for wireless sensor networks. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.
 39. **Amgoth T., Jana P. K.** Energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, vol. 41, pp. 357–367.
 40. **Ayoub N., Asad M., Aslam M., Gao Z., Munir E. U., Tobji R.** MAHEE: Multi-hop advance heterogeneity-aware energy efficient path planning algorithm for wireless sensor networks. *2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM)*, 2017, pp. 1–6.
 41. **Shah S. B., Chen Z., Yin F., Khan I. U., Ahmad N.** Energy and interoperable aware routing for throughput optimization in clustered IoT-wireless sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 2018, vol. 81, pp. 372–381.
 42. **Восков Л. С., Комаров М. М.** Метод энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания. *Бизнес-информатика*, 2012, № 1 (19), с. 70–75.
 43. **Шостко И. С., Куля Ю. Э.** Разработка модели маршрутизации беспроводной сенсорной сети с учетом устранения дисбаланса энергопотребления. *Технологический аудит и резервы производства*, 2015, № 3/2(23), с. 94–98.

UDC 004.051, 621.391, 621.396
 doi:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50
 Sensor network connectivity models

T. N. Astakhova^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-7032-0697, ctn_af@mail.ru

N. A. Verzun^{b,c}, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0126-2358

V. V. Kasatkin^d, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-7523-4926

M. O. Kolbanev^{b,c}, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-4825-6972

A. A. Shamin^a, PhD, Econom., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-7690-8718

^aNizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, 22a, Oktyabrskaya St., 606340, Knyaginino, Russian Federation

^bSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

^cSaint Petersburg State University of Economics, 21, Sadovaya St., 191023, Saint-Petersburg, Russian Federation

^dSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: One of the key areas in the research of wireless sensor networks is studying the ways to increase the battery life by saving energy in individual devices. The article introduces and discusses a new energy-efficient stochastic measure of the quality parameter for a wireless sensor network – connectivity, which reflects the ability of a network to establish connections between its elements within the boundaries of the sensor field in real time, at a certain level of the sensor device battery charge. **Purpose:** Identifying the interdependence between the probability-time and probability-energy characteristics, as well as the influence, on these characteristics, of such parameters as geometric dimensions, distribution model of sensor devices within the sensor field, network topology and message routing algorithms. **Results:** A new stochastic characteristic of wireless sensor network functioning quality is proposed, called connectivity. It encompasses the spatial, temporal and energy characteristics of the network, making it possible to describe, from a general point of view, a wide range of problems which arise when you study the functioning of wireless networks at the stages of data collecting, distributing and processing by the sensors. Stochastic connectivity indicators are introduced for wireless sensor networks, describing a network as a whole and allowing you to investigate the delay and blocking of the information exchange, taking into account the size of the sensor field and the power consumed by individual devices. Models are built for assessing the probability of wireless sensor network connectivity, message delivery time and delivery time quantile, improving the accuracy of network quality assessments. **Practical relevance:** The obtained models and methods are supposed to be used in digitalization of agricultural organizations and in the educational process at Knyagininsky University.

Keywords — wireless sensor network, probability-time characteristics, probability-energy characteristics, connectivity probability, message delivery time, cluster, signal power at the transmitting antenna, network connectivity, μ -quantile of delivery time.

For citation: Astakhova T. N., Verzun N. A., Kasatkin V. V., Kolbanev M. O., Shamin A. A. Sensor network connectivity models. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 38–50 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50

References

- Verzun N. A., Kolbanev M. O., Tatarnikova T. M. The technological platform of the fourth industrial revolution. *Geopolitika i bezopasnost*, 2016, no. 2 (34), pp. 73–78 (In Russian).
- Shostko I. S., Kulya Yu. E. The method of increasing the life time of an autonomous wireless sensor network due to the application of energy efficient operating modes of the transmitter. *Problemy telekommunikatsiy*, 2015, no. 1 (16), c. 3–15. Available at: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_shostko_ttl.pdf. (accessed 29 May 2019) (In Russian).
- Bakin E. A., Evseev G. S., Smirnov K. N. Algorithms of convergencast schedule calculation for a sensor network model with regular grid topology. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 6, pp. 107–112 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.107
- Vorobev A. I., Kolbanev A. M., Kolbanev M. O. Model energy optimization clever things. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2015, no. 7, pp. 46–49 (In Russian).
- Astakhova T., Kolbanev M., Shamin A. *Obespechenie energoeffektivnosti interneta veshchej* In: *Regional'naya informatika i informacionnaya bezopasnost'* [Energy efficiency support of the internet of things. In: Scientific collection "Regional informatics and information security"]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noj tekhniki, sistem svyazi i upravleniya Publ., 2018. Pp. 203–204 (In Russian).
- Verzun N., Kolbanev M., Shamin A. The energy efficiency of cooperation in wireless sensor networks. *Telecom IT*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 88–96. Available at: <https://www.sut.ru/> (accessed 29 May 2019) (In Russian).
- Galinina O. S., Andreev S. D., Tyurlikov A. M. On multiple access of a large number of machine-type devices in cellular networks. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 105–114 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114
- Vorobyov A. I., Kolbanyov A. M., Kolbanyov M. O. Green IT. *Uchenyye zapiski Mezhdunarodnogo bankovskogo instituta*. Saint-Petersburg, MBI Publ., 2015, iss. 12, pp. 153–165 (In Russian).
- Vorobyov A. I., Kolbanyov A. M., Kolbanyov M. O. Ecological safety of information technology. *Geopolitika i bezopasnost*, 2015, no. 4 (32), pp. 90–99 (In Russian).
- Orlov S. A., Tsilker B. Ya. *Organizatsiya EVM i system* [Computer Organization and Systems]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2015. 688 p. (In Russian).
- Verzun N. A., Kolbanev M. O., Omelyan A. V. Controlled multiple access in wireless network of smart things. *Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 4 (14), pp. 147–151 (In Russian).
- Erohin S., Makhrov S. S. Routing protocols in wireless sensor networks: locationbased units and aimed at the aggregation of data. *T-Comm-Telekommunikatsii i Transport*, 2013, no. 3, pp. 44–47 (In Russian).
- Makhrov S. S. Investigation of the connectivity of nodes in hierarchical protocols of wireless sensor networks. *Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 186–189 (In Russian).
- Batenkov K. A., Batenkov A. A. Analysis and synthesis of communication network structures according to the determined stability. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 3, no. 58, pp. 128–159 (In Russian).
- Lee H., Nguyen L. T. H., Fujisaki Y. Algebraic connectivity of network-of-networks having a graph product structure. *Systems & Control Letters*, 2017, vol. 104, pp. 15–20.
- Chen C., Peng R., Ying L., Tong H. Network connectivity optimization: Fundamental limits and effective algorithms.

- Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2018, pp. 1167–1176.
17. Mishra S., Raj A., Kayal A., Choudhary V., Verma P., Biswal L. Study of cluster based routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2012, vol. 3, no. 7, pp. 1–7.
 18. Awasthi K. K., Singh A. K., Tahilyani S. Study of cluster based routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 2017, vol. 163, no. 1, pp. 39–42.
 19. Okuneva D. V. *Razrabotka i issledovaniye modeley besprovodnykh sensornykh setey pri neravnomernom raspredelenii uzlov*. Dis. cand. tech. nauk [Development and research of wireless sensor networks with uneven distribution of nodes. PhD tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2017. 159 p. (In Russian).
 20. Koucheryavy A. E., Salim A. Cluster headend selection for homogeneous wireless sensor networks. *Elektrosvyaz*, 2009, no. 8, pp. 32–36 (In Russian).
 21. Handy M. J., Haase M., Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. *4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, 2002, pp. 368–372.
 22. Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, vol. 1, no. 4, pp. 660–670.
 23. Karl H., Willig A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007. 526 p.
 24. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Golubev I. Y., Bogatyrev S. V. Queries distribution optimization between clusters of fault-tolerant computing system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 3(85), pp. 77–82 (In Russian).
 25. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V. Reliability of multi-cluster systems with redistribution of the flow of requests. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 171–177 (In Russian).
 26. Uolles R. Maximum radio communication range in the system: how to achieve this? *Novosti elektroniki*, 2015, no. 11, pp. 3–13 (In Russian).
 27. Glushkov V. M., Amosov N. M., Artemenko I. A. *Entsiklopediya kibernetiki* [Encyclopedia of Cybernetics]. Kiev, Glavnaya redaktsiya ukrainiskoy sovetskoy entsiklopedii, 1974. 608 p. (In Russian).
 28. Koucheryavy Y., Pyattaev A., Johnsson K., Galinina O. Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections. *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 20–31.
 29. Muthanna A. S., Koucheryavy A. Y. D2D-communication in the 5G mobile networks. *Telecom IT*, 2014, vol. 4 (8), pp. 51–63 (In Russian).
 30. Osseiran A., et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 26–35.
 31. Borodin A. S. *Razrabotka i issledovaniye metodov postroyeniya setey svyazi pyatogo pokoleniya*. Dis. cand. tech. nauk [Development and Research of Methods for Building Communication Networks of the Fifth Generation. PhD tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2019. 124 p. (In Russian).
 32. Suzdalev A. V. *Seti peredachi informatsii ASU* [Networks of information transfer of ACS]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1983. 152 p. (In Russian).
 33. State Standard 53111–2008. *The stability of the public communication network. Requirements and verification methods*. Moscow, Standardinform Publ., 2009. 16 p. (In Russian).
 34. Okuneva D. V., Buzyukov L. B., Paramonov A. I. Analysis of wireless sensor network's connectivity using a variety of nodes distribution. *Trudy 71-j Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencij, posvyashchennoj Dnyu radio* [Proc. 71st All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to the Day of Radio], Saint-Petersburg, 2016, pp. 179–180 (In Russian).
 35. Okuneva D. V., Buzyukov L. B., Paramonov A. I. Analysis of wireless self-organizing network's connectivity using a variety of nodes distribution on territory. *Elektrosvyaz*, 2016, no. 9, pp. 58–62 (In Russian).
 36. Koucheryavy A. E., Nurilloev I. N., Paramonov A. I., Prokopiev A. V. Provision of connectivity of wireless sensor nodes in heterogeneous network. *Telecom IT*, 2015, no. 1 (9), pp. 115–122 (In Russian).
 37. Liu M., Cao J., Chen G., Wang X. An energy-aware routing protocol in wireless sensor networks. *Sensors*, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 445–462.
 38. Adeel A., Abid A., Sohail J. Energy aware intra cluster routing for wireless sensor networks. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.
 39. Amgoth T., Jana P. K. Energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, vol. 41, pp. 357–367.
 40. Ayoub N., Asad M., Aslam M., Gao Z., Munir E. U., Tobji R. MAHEE: Multi-hop advance heterogeneity-aware energy efficient path planning algorithm for wireless sensor networks. *2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM)*, 2017, pp. 1–6.
 41. Shah S. B., Chen Z., Yin F., Khan I. U., Ahmad N. Energy and interoperable aware routing for throughput optimization in clustered IoT-wireless sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 2018, vol. 81, pp. 372–381.
 42. Voskov L., Komarov M. Method of energy balancing in a static wireless sensor networks with autonomous energy sources. *Biznes-informatika*, 2012, no. 1 (19), pp. 70–75 (In Russian).
 43. Shostko I. S., Kulya Yu. E. Development of a routing model for a wireless sensor network, taking into account the elimination of energy imbalance. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 2015, no. 3/2 (23), pp. 94–98 (In Russian).