

СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-34-44
УДК 004.738.5: 621.391

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ МЕЖУЗЛОВЫХ ПОМЕХ

В. В. Федоренко, В. В. Самойленко, Д. В. Алдущенко, И. В. Емельяненко

*Северо-Кавказский федеральный университет,
Ставрополь, Российская Федерация*

Проведен анализ методов формирования сетевых топологий беспроводных сенсорных сетей (БСС) на основе графовой структуры, который свидетельствует о преобладании допусковых критериев для описания связей между узлами, например предельного расстояния радиосвязи, достаточного отношения энергий сигнал/(помехи + шум). Для учета воздействия межузловых помех на топологию сети предложено в качестве критерия наличия устойчивой связи использовать допустимые значения вероятностей битовой ошибки либо стирания информационного пакета в случае искажения хотя бы одного из его элементов. Представлен алгоритм расчета аналитической модели межузлового канала связи для оценки влияния внутрисетевых аддитивных и мультипликативных помех на показатель достоверности некогерентного приема сообщений в виде вероятности битовой ошибки. Получено выражение для коэффициента структурного взаимодействия принимаемого сигнала и комплекса помех, позволяющего учесть зависимость вероятности битовой ошибки от энергетических составляющих отдельных помех на входе приемника, значений частотного разнеса сигнала и каждой из помех, их фазовых сдвигов, а также длительности информационного бита. На примере использования модемов CC2500 в составе узлов БСС рассмотрено практическое приложение методики моделирования топологии БСС для случая межузловых каналов связи с райсовскими замираниями полезного сигнала и релеевскими замираниями комплекса внутрисетевых помех. В результате расчетов определены связи между узлами, для которых вероятности битовых ошибок не превышают допустимого значения, установленного с учетом требований к пропускной способности каналов и длины информационных пакетов. Представленная методика моделирования свидетельствует о возможности улучшения топологии сети за счет формирования межузловых связей путем перераспределения частотного ресурса между узлами либо корректировки режимов работы модемов.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, графовая модель сети, вероятность битовой ошибки, внутрисетевые помехи.

Для цитирования: Федоренко В. В., Самойленко В. В., Алдущенко Д. В., Емельяненко И. В. Методика моделирования топологии беспроводных сенсорных сетей с учетом межузловых помех // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 34–44. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-34-44.

Введение

Материальной основой реализации технологии Интернета вещей в различные области человеческой деятельности являются беспроводные сенсорные сети (БСС), состоящие из большого числа маломощных, многофункциональных узлов с приемо-передающими устройствами [1]. К числу основных проблем исследований БСС относятся моделирование и управление топологией сети с целью повышения ее связности, а также оптимальная маршрутизация с минимальными временными и энергетическими затратами [2, 3]. Однако решение данных проблем

невозможно без учета состояний связи между узлами, которые могут быть образованы как при кооперативном взаимодействии узлов – в случае формирования каналов передачи данных, – так и при деструктивном взаимодействии, приводящем к образованию взаимных помех. Отсутствие дифференцированного подхода к оценке различного взаимодействия узлов приводит к тому, что теоретические расчеты по упрощенным моделям топологии БСС не совпадают с результатами экспериментальных исследований сетей.

Под топологией БСС обычно понимают модель, описывающую структуру связей между элементами внутри данной сети [4]. Основой для построения топологических моделей БСС является теория графов [5], согласно которой сеть представлена в виде графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов сети, являющихся вершинами графа, а E – множество связей между узлами (ребер графа). Координаты узлов и наличие связей между некоторыми узлами фактически составляют конфигурацию графа, т. е. сетевую топологию.

В данной работе предполагаем заданными места расположения узлов, а решаемая задача моделирования сети сводится к описанию связей между узлами с учетом некоторого критерия Θ , при котором ребро $e(j, i)$ между узлами $j \in V$ и $i \in V$ принадлежит E , если $e(j, i) \leq \Theta$.

Состояние проблемы моделирования топологии БСС

Чаще всего весовым показателем ребер является расстояние между узлами $l(j, i)$, а критерием Θ выступает предельное расстояние r , при котором приемный узел i способен принять сигнал передатчика j . Для беспроводных линий связи при известных технических характеристиках узловых устройств связи расстояние r рассчитывается с помощью формулы Фрииса [6]

$$r = (v_c / 4\pi f_s) \sqrt{P_T G_R G_T / P_{R_{s_{\min}}}}, \quad (1)$$

где P_T – мощность радиосигнала на выходе передатчика (трансивера); $P_{R_{s_{\min}}}$ – мощность радиосигнала на уровне чувствительности приемника (ресивера); G_R и G_T – коэффициенты усиления приемной и передающей антенн соответственно; v_c – скорость света, м/с; f_s – частота радиосигнала.

Определение модели БСС посредством формулы (1) может относиться как к физической топологии (относительное расположение узлов и связей между ними, непосредственно вытекающих из свойств применяемой среды передачи), так и к логической топологии (основанной на оперативной конфигурации способа передачи данных по сети из начальной точки в конечную, между элементами инфраструктуры сети) [4].

Когда узлы оснащены всенаправленными антеннами, а узловые передатчики формируют сигналы равной мощности, рассчитанное значение r соответствует радиусу круга (диска) радиозахвата $D(j, r(j))$ с центром в координате передающего узла j . В этом случае модель топологии сети представлена неориентированным графом связности $G = (V, E)$, где ребро $e(j, i)$ принадлежит E , если $i \in D(j, r(j))$ и $j \in D(i, r(i))$, т. е. связь происходит в обоих направлениях (рис. 1).

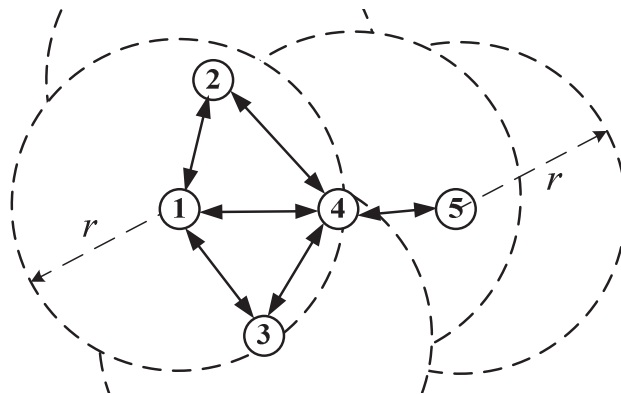


Рис. 1. Пример графовой модели топологии БСС, построенной на дисках радиозахвата

Фактически граф связности моделирует наличие или отсутствие каналов связи с точки зрения чувствительности приемника и теплового шума. Однако представленная на рис. 1 графовая модель сети не учитывает особенности физического канала связи между узлами, в частности наличие различного рода помех. Таким образом, успешная связь по каналу, присутствующему в графе связности, гарантируется только в том случае, если никакой другой канал не активен. Однако в практическом сценарии несколько каналов связи активны одновременно, так что успешная связь между двумя терминалами зависит от помех, вызванных параллельными передачами.

В [7] приводится модель учета помех в топологическом управлении БСС, которая оценивает воздействие помех на каналы связи путем подсчета количества узлов, оказывающих влияние на помехоустойчивость приема в данном канале [8].

В [9] используют более реалистические энергетические модели, учитывающие эффекты замираний и затуханий сигналов для определения диапазона интерференции канала связи.

Следующим уровнем развития моделей БСС является переход от логической к физической топологии, при которой в качестве критерия наличия межузловой связи выступает достаточное значение отношения сигнал/(помехи + шум) ($SINR$) на входе i -го приемного узла, равное или превышающее заданный порог β [10]:

$$SINR = \frac{P_{Rji}/l_{ji}^2}{\sigma^2 + \sum_{k \in N, k \neq j} P_{Rki}/l_{ki}^2} \geq \beta, \quad (2)$$

где σ^2 – аддитивная мощность шума; P_{Rji} и P_{Rki} – мощности сигнала от j -го источника и помехи от k -го источника на входе i -го приемника; N – количество источников помех; l_{ki} – расстояние между узлами k и i .

Использование критерия (2) с показателем $SINR$ позволяет более дифференцированно подходить к формированию топологии сети, граф которой может иметь несимметричные связи между узлами. Однако данная модель учитывает только энергетическое взаимодействие узлов, оставляя открытыми вопросы структурного взаимодействия сигнала и помех с учетом траекторий их распространения.

Использование предложенного в [11] коэффициента ортогональности сигналов $0 \leq \gamma_0 \leq 1$ в критерии $SINR = \left(P_{Rji}/l_{ji}^2 \right) / \left(\sigma^2 + \gamma_0 \sum_{k \in N, k \neq j} P_{Rki}/l_{ki}^2 \right) \geq \beta$ не позволяет оценить влияние данного критерия на показатели достоверности приема информации и пропускной способности сети, вследствие чего не решает проблему установления взаимосвязи характеристик качества обслуживания в БСС с различными факторами реализации сетевой модели [12].

Следствием воздействия помех на межузловые линии связи является не только снижение показателя $SINR$, но и ошибочная регистрация информационного бита в приемном устройстве. Учет влияния различного рода помех на качество радиосвязи в БСС осуществляется с помощью показателей: вероятности битовой ошибки (BER) p_{ber} – на уровне физического канала; вероятности правильного приема пакета сообщений (PSR) q_{psr} – на уровне канала передачи данных [13]. Обнаружение хотя бы одной неисправимой ошибки в M -элементном информационном пакете приводит к его стиранию с вероятностью [14] $p_{del} = 1 - (1 - p_{ber})^M$. Требования к пропускной способности сети трансформируются к допустимому уровню снижения вероятности правильного приема пакета сообщений (PSR) $q_{psr.lim} = 1 - p_{del.lim}$ и устанавливают предельное значение вероятности битовой ошибки $p_{ber.lim} = 1 - (p_{psr.lim})^{1/M}$.

Цель исследования состоит в разработке методики моделирования топологии БСС по критериям, которые учитывают требования к показателям достоверности приема сообщений и их пропускной способности по линиям связи с учетом внутренних помех.

Модель влияния внутрисетевых помех на достоверность поэлементного приема

Одним из факторов, влияющих на формирование связей между узлами БСС, является воздействие различных помех, которые можно разделить на две группы: *аддитивные помехи* от посторонних излучателей радиосигналов и *мультипликативные помехи*, которые проявляются в замираниях уровня сигналов и обусловлены многолучевостью распространения радиоволн и изменениями затухания (поглощения) радиоволн на трассе.

Аддитивные помехи могут быть как внешними (по отношению к исследуемой БСС), так и внутренними, т. е. генерируемыми передатчиками соседних узлов при условии отсутствия дисциплины временного графика на сеансы связи. Модель смеси сигнала и помех на входе i -го приемника представим в виде суммы

$$y_i(t) = \mu_s S_{ji}(t) + \mu_z \sum_{k=1}^{N_i} Z_{ki}(t) + \xi(t), \quad (3)$$

где $S_{ji}(t)$ и $Z_{ki}(t)$ – функции времени, которые определяют соответственно сигнал от j -го источника связи и аддитивной помехи от k -го источника ($k = \overline{1, N_i}, k \neq j$); N_i – количество источников помех, в зоны радиозахвата которых попадает i -й приемник; μ_s и μ_z – амплитудные коэффициенты передачи сигнала и комплекса помех; $\xi(t)$ – функция времени для гауссовского шума.

Многолучевость приводит к интерференции лучей в точке приема и проявляется в виде быстрых интерференционных замираний. Поглощение радиоволн в радиоканале носит случайный характер и проявляется в виде быстрых и медленных замираний сигнала. По линии связи от j -го источника к i -му приемнику существует хотя бы одна траектория распространения сигнала по прямой видимости, с линейно уменьшающейся мощностью в масштабе времени замираний, вызванных многолучевым распространением. Поэтому сигнал на выходе линии связи складывается из регулярной и случайной компонент, а одномерная плотность вероятности $W(\mu_s)$ амплитудного коэффициента передачи μ_s полезного сигнала на интервале локальной стационарности подчиняется обобщенному закону Райса [15]:

$$W(\mu_s) = (2\mu_s / \mu_F^2) \exp[-(\mu_s^2 + \mu_R^2) / \mu_F^2] I_0(2\mu_s \mu_R / \mu_F^2), \mu_s \geq 0, \quad (4)$$

где μ_R – регулярная составляющая коэффициента передачи канала; μ_F^2 – среднестатистическое значение флуктуирующей составляющей коэффициента передачи; $I_0(\alpha)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Если же регулярная составляющая μ_R отсутствует, что характерно для суммы помеховых сигналов от большого числа N_i источников, то огибающая оказывается распределенной по Релевскому закону с плотностью вероятности [16]

$$W(\mu_z) = (2\mu_z / \mu_0^2) \exp(-\mu_z^2 / \mu_0^2), \mu_z \geq 0. \quad (5)$$

Наибольшее распространение получили решающие схемы некогерентной обработки сигнала на базе согласованных фильтров или квадратичных корреляторов, которые реализуют оператор вида [17]

$$V_r = 4\mu_s^2 \mu_z^2 \left| \int_0^T y(t) S_r^*(t) dt \right|^2 / T_S^2, t \in [0, T_S]; r = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где $S_r^*(t)$ – функция времени, комплексно сопряженная, по Гильберту, с r -м вариантом опорного сигнала $S_r(t)$, который формируется в демодуляторе приемника; T_S – длительность информационного бита (период опорного сигнала).

Значение вероятности битовой ошибки p_{ber} в канале связи определяется видом сигнала, превышением уровня сигнала над уровнем помех в точке приема, способом обработки сигнала в приемном устройстве и характеристиками среды распространения радиоволн. При использовании оператора (6) вероятность битовой ошибки оптимального в гауссовском шуме приема бинарных ($m = 2$) сигналов определяется выражением [17]

$$p_{ber} = \frac{1}{2} \iint_{O(\mu)} W(\mu_s, \mu_z) \{P[V_1 < V_2 | S_1(t)] + P[V_1 > V_2 | S_2(t)]\} d\mu_s d\mu_z, \quad (7)$$

где $O(\mu)$ и $W(\mu_s, \mu_z)$ – область интегрирования и совместная плотность вероятности параметров μ_s и μ_z ; $P[V_r < V_l | S_r(t)]$ – условная вероятность ошибочного решения о варианте принятого сигнала ($r, l = \overline{1, 2}$; $r \neq l$).

Полагаем, что квадратурные составляющие сигнала и помех являются некоррелированными, плотности вероятностей параметров μ_s и μ_z независимы, а варианты сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$ удовлетворяют условию ортогональности в усиленном смысле (что соответствует частотно-модулированному режиму работы модема). С целью расчета вероятности битовой ошибки в обобщенное выражение (7) подставим оператор (6) с учетом комплекса информационного сигнала и помех (3) на входе приемника. На основании выражений (4), (5) и (7), а также обозначения $\gamma_s = \mu_R^2 / \mu_F^2$ для коэффициентов передачи сигнала получаем модель межузлового канала связи (j, i) для случая замираний сигнала по Райсу и замираний комплекса помех по Релею [18]:

$$p_{ber}^{(ji)} = \left\{ 1 + \frac{h_{Sji}}{2 + h_{Zji} \lambda_{ji} (\gamma_s + 1)} \right\}^{-1} \exp \left\{ -1 / \left[\left(\frac{2 + h_{Zji} \lambda_{ji}}{h_{Sji}} \right) \left(1 + \frac{1}{\gamma_s} \right) + \frac{1}{\gamma_s} \right] \right\}, \quad (8)$$

где $h_{Sji} = P_{Rji} T_S / \varepsilon_n$ и $h_{Zji} = \sum_{k=1}^{N_i} P_{Rki} T_S / \varepsilon_n$ – отношения энергий соответственно сигнала и комплекса помех на входе i -го приемника к энергии флуктуационного шума ε_n , измеренные на длительности опорного сигнала T_S ;

$$P_{Rji} = \frac{2\mu_s^2}{T_S} \int_0^{T_S} S_{ji}^2(t) dt; \quad P_{Rki} = \frac{2\mu_z^2}{T_S} \int_0^{T_S} Z_{ki}^2(t) dt;$$

$$\lambda_{ji} = \mu_s^2 \mu_z^2 \left| \int_0^{T_S} S_{ji}^*(t) \sum_{k=1}^{N_i} Z_{ki}(t) dt \right|^2 / 4T_S^2 P_{Rji} \sum_{k=1}^{N_i} P_{Rki}. \quad (9)$$

Показатель λ_{ji} , определяемый в дальнейшем как коэффициент структурного взаимодействия сигнала и комплекса помех, имеет простой физический смысл: он представляет собой нормированную величину, пропорциональную мощности процесса на выходе фильтра или квадратурного устройства в составе решающей схемы i -го приемника, согласованных с вариантом опорного сигнала, при прохождении через них комплекса помех. Коэффициент структурного взаимодействия оценивает относительную величину перекрытия в частотно-временной области энергетических спектров полезного сигнала $S_{ji}(t)$ и помех $\sum_{k=1}^{N_i} Z_{ki}(t)$.

Функции времени для узкополосных сигнала и помех, входящие в выражение (9), представим в комплексном виде [19]:

$$S_{ji}^*(t) = U_{ji} \exp \left(-\sqrt{-1} \{ 2\pi [f_0 + F_j] t + \Psi_{ji} \} \right), \quad t \in [0, T_S]; \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{N_i} Z_{ki}(t) = \sum_{i=1}^{N_i} U_{ki} \exp \left(\sqrt{-1} \{ 2\pi [f_0 + F_k] t + \Psi_{ki} \} \right), \quad t \in [0, T_S], \quad (11)$$

где $U_{ji} = \sqrt{2P_{Rji}}$ и $U_{ki} = \sqrt{2P_{Rki}}$ – среднеквадратические значения амплитуд соответственно j -го сигнала и k -й помехи на входе i -го приемника; Ψ_{ji} (Ψ_{ki}) и $[f_0 + F_j]$ ($[f_0 + F_k]$) – начальная фаза и несущая частота j -го полезного сигнала (k -й помехи) на входе приемника i -го узла.

При подстановке моделей сигнала (10) и помех (11) в формулу (9) получим выражение

$$\lambda_{ji} = \left| \sum_{k=1}^{N_i} \sqrt{P_{Rki}} / \sum_{k=1}^{N_i} P_{Rki} \frac{\sin(\pi \Delta_{Fkj} T_s)}{\pi \Delta_{Fkj} T_s} \exp(j \Delta_{\Psi kj}) \right|^2, \quad (12)$$

где $\Delta_{Fkj} = F_k - F_j$; $\Delta_{\Psi kj} = \Psi_{ki} - \Psi_{ji}$.

Таким образом, коэффициент λ_{ji} чувствителен к частотному разному сигнала и помехи Δ_{Fkj} и фазовому сдвигу $\Delta_{\Psi kj}$ с учетом доли энергетического участия отдельных помех $P_{Rki} / \sum_{k=1}^{N_i} P_{Rki}$ и битовой скорости передачи полезной информации $v_s = 1/T_s$. Следовательно, он является более информативным показателем взаимодействия сигнала и помехи, чем коэффициент ортогональности γ_0 , предложенный в [20].

Пример исходных данных для моделирования топологии сети

Для примера рассмотрим сеть, состоящую из пяти узлов с координатами $(x_i^{(1)}, x_i^{(2)})$ расположения на местности по аналогии с рис. 1.

В качестве телекоммуникационной составляющей узла БСС (модема) выбран универсальный интегральный трансивер CC2500, обеспечивающий радиосвязь в диапазоне $f_0 = 2,4$ ГГц [21]. Максимальная выходная мощность трансивера 0 дБм, что соответствует мощности выходного сигнала передачи $P_T = 1$ мВт. Чувствительность приемника (ресивера) 101 дБм, или 1,99 мкВт, что при входном сопротивлении 50 Ом соответствует мощности принятого сигнала на уровне чувствительности приемника (*receiver sensitivity*) $P_{sens} = 8 \cdot 10^{-14}$ мкВт. Максимальная скорость передачи данных с помощью трансивера CC2500 составляет $v_s = 1/T_s = 512$ кбит/с в режиме частотной модуляции сигнала (FSK) [13].

Алгоритм моделирования топологии сети

1. Расчет расстояний между узлами по координатам: $l_{ji} = \sqrt{(x_j^{(1)} - x_i^{(1)})^2 + (x_j^{(2)} - x_i^{(2)})^2}$.

В данном примере матрица расстояний между узлами (в метрах) имеет вид

$$|l_{ji}| = \begin{vmatrix} 0 & 220 & 260 & 250 & 478 \\ 220 & 0 & 400 & 289 & 423 \\ 260 & 400 & 0 & 244 & 388 \\ 250 & 289 & 244 & 0 & 228 \\ 478 & 423 & 388 & 228 & 0 \end{vmatrix}.$$

2. Определение радиуса зоны радиозахвата (*radio capture zone*) передатчика как возможного источника помех по формуле Фрииса (1): $r_{cz} = v_c \sqrt{P_T G_R G_T / P_{Rs_{min}}} / 4\pi f_0$. Ограничимся случаем идентичности узловых модемов с равными значениями P_T и $P_{Rs_{min}}$, а также круговыми диаграммами направленности антенн с коэффициентами усиления $G_R = G_T = 1$. Тогда $r_{cz} = 559$ м, следовательно, $\max_{j,i} \{l_{ji}\} \leq r_{cz}$, поэтому в зону влияния j -го передатчика попадают все приемники (в отличие от рис. 1).

3. Расчет мощности сигнала $P_{R_{ji}} = P_{T_j} G_{R_i} G_{T_j} v_c^2 / 16\pi^2 l_{ji}^2 f_0^2$ с передатчика j -го узла, оцениваемого на входе приемника i -го узла. Результаты расчетов нормированных значений мощностей принимаемых сигналов $P_{R_{ji}} / 10^{-12}$ Вт для различных связей между узлами $j = \overline{1, 5}$ и $i = \overline{1, 5}$ с учетом расстояний l_{ji} представлены матрицей

$$\left| \frac{P_{R_{ji}}}{10^{-12}} \right| = \begin{vmatrix} - & 2 & 1,465 & 1,6 & 0,433 \\ 2 & - & 0,618 & 1,18 & 0,55 \\ 1,465 & 0,618 & - & 1,68 & 0,65 \\ 1,6 & 1,18 & 1,68 & - & 1,92 \\ 0,433 & 0,55 & 0,65 & 1,92 & - \end{vmatrix}.$$

4. В предположении о наличии канального шума на уровне чувствительности приемника P_{sens} определяются значения энергетических превышений сигнала и суммарных помех над шумами в точках приема по линиям связи l_{ji} или $\{l_{ki}\}$: $h_{Sji} = P_{R_{ji}} / P_{sens}$; $h_{Zji} = \sum_{k=1}^{N_i} P_{R_{ki}} / P_{sens}$;

$$\left| h_{Sji} / h_{Zji} \right| = \begin{vmatrix} - & 25/44 & 18/50 & 20/49 & 5,4/63 \\ 25/29 & - & 7,7/47 & 15/40 & 6,9/47 \\ 18/37 & 7,7/47 & - & 21/34 & 8,1/47 \\ 20/60 & 15/65 & 21/59 & - & 24/56 \\ 5,4/39 & 6,9/38 & 8,1/36 & 24/20 & - \end{vmatrix}.$$

5. Расчет значений коэффициента структурного взаимодействия сигнала (на линии связи l_{ji}) и совокупности N_i помех (на линиях помех от k -го передатчика до i -го приемника) по формуле (12) при последовательном назначении узловым передатчикам следующих частот $\{f_j\}_{j=\overline{1,5}} = \{f_0 + F_k\} = (2410 \text{ МГц}; 2400 \text{ МГц}; 2420 \text{ МГц}; 2425 \text{ МГц}; 2415 \text{ МГц})$:

$$\left| \frac{\lambda_{ji}}{10^{-3}} \right| = \begin{vmatrix} - & 0,003 & 0,48 & 0,27 & 0,70 \\ 0,63 & - & 1,06 & 0,55 & 1,14 \\ 0,58 & 0,13 & - & 0,16 & 0,79 \\ 0,99 & 0,23 & 0,59 & - & 0,97 \\ 0,45 & 0,017 & 0,61 & 0,27 & - \end{vmatrix}.$$

6. Расчет вероятности битовой ошибки с учетом статистических характеристик линий связи между узлами. В данном примере использована модель канала (8) для случая замираний сигнала по Райсу с коэффициентом передачи $\gamma_s = 20$ и замираний помех по закону Релея:

$$\left| \frac{p_{ber}^{(ji)}}{10^{-3}} \right| = \begin{vmatrix} - & 0,37 & 1,28 & 0,84 & 45 \\ 0,41 & - & 19 & 2,3 & 26 \\ 1,26 & 16 & - & 0,68 & 16 \\ 1,08 & 2,2 & 0,81 & - & 0,57 \\ 41 & 21 & 15 & 0,81 & - \end{vmatrix}.$$

7. Формирование модели топологии сети состоит в установлении связей между узлами, для которых выполняется условие допускового критерия:

$$(j, i) \in E, \text{ если } p_{ber}^{(ji)} \leq p_{ber. \text{lim}}. \quad (13)$$

Если допустимое время передачи по линии связи информационного пакета длиной $M = 256$ бит со скоростью $v_s = 512$ кбит/с составляет 615 мкс, то требуемая вероятность правильно-

го приема пакета сообщений $q_{psr.req} = 0,77$. Тогда, в соответствии с критерием (13), устойчивые связи между узлами будут присутствовать только в случае неперевышения вероятностью битовой ошибкой некоторого допустимого значения $p_{ber.lim} = 10^{-3}$. Для этого случая на рис. 2, а представлена графовая модель топологии БСС, содержащая как симметричные связи (1, 2), (3, 4), (4, 5), так и несимметричную связь (4, 1).

Если провести взаимный обмен частот передатчиков 2-го и 4-го узлов, т. е. обеспечить настройку: $\{f_j\}_{j=1,5} = (2410 \text{ МГц}; 2425 \text{ МГц}; 2420 \text{ МГц}; 2400 \text{ МГц}; 2415 \text{ МГц})$, то вероятности битовой ошибки в линиях связи получат другие значения:

$$\left| \frac{p_{ber}^{(ji)}}{10^{-3}} \right| = \begin{vmatrix} - & 0,39 & 1,24 & 0,78 & 46 \\ 0,43 & - & 16 & 2,2 & 25 \\ 1,29 & 16 & - & 0,69 & 16 \\ 1,01 & 0,84 & 0,83 & - & 0,61 \\ 42 & 21 & 14 & 0,42 & - \end{vmatrix}.$$

Корректировка в распределении частот приведет к снижению битовой ошибки на линии между узлами 2 и 4 ($p_{ber}^{(24)} = 0,84 \cdot 10^{-3} \leq p_{ber.lim}$), а следовательно, к появлению дополнительной связи, т. е. улучшению топологии сенсорной сети (см. рис. 2, б).

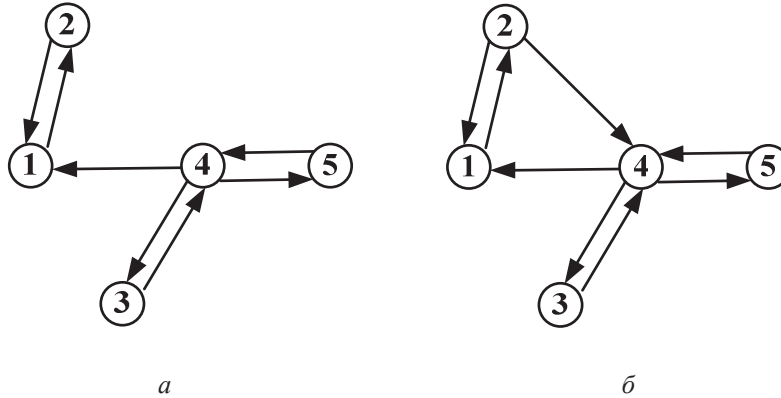


Рис. 2. Примеры модели топологии БСС с учетом внутрисетевых помех при различных вариантах распределения частот между узлами:

$$a - \{f_j\}_{j=1,5} = (2410 \text{ МГц}; 2400 \text{ МГц}; 2420 \text{ МГц}; 2425 \text{ МГц}; 2415 \text{ МГц});$$

$$б - \{f_j\}_{j=1,5} = (2410 \text{ МГц}; 2425 \text{ МГц}; 2420 \text{ МГц}; 2400 \text{ МГц}; 2415 \text{ МГц})$$

Заключение

Традиционно описание топологий БСС осуществляется с помощью графовых моделей, представляющих собой множество узлов V и связей E . При этом межузловые связи, фактически составляющие структуру БСС, формируются по допусковому критерию: $(j, i) \in E$, если $e(j, i) \leq \Theta$. В большинстве случаев показателями связности узлов выступают расстояния между ними либо энергетические отношения сигнал/(помехи + шум) на входе узлового приемника.

В данной работе предложено в качестве показателя связности узлов использовать вероятность битовой ошибки некогерентного приема сообщений в условиях мультипликативных и аддитивных помех. Разработанная модель оценки достоверности приема сообщений учитывает не только энергетическое соотношение полезного сигнала и комплекса внутрисетевых помех на входе приемника, но и их спектрально-временные характеристики, в частности глубину раисовских замираний сигнала, частотные и фазовые сдвиги помех относительно сигнала, скорость передачи данных. Этим предложенная методика моделирования топологии БСС с обоснованно выбранным показателем межузловых связей в виде BER выгодно отличается от известных подходов построения топологий беспроводных сетей с SINR в качестве показателя связей. Еще одним

достоинством показателя BER является его четкая аналитическая связь с характеристиками качества обслуживания сети, в частности пропускной способностью линий связи и вероятностью правильного приема информационного пакета.

Приведенный алгоритм моделирования сети на примере использования модема CC2500 в составе узлов БСС для условий райсовских замираний сигнала и релейских замираний комплекса помех свидетельствует о возможности управления сетевой топологией за счет корректировки режимов работы узлов (например, выбора частотного канала или изменения скорости передачи данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков А. В., Ваняшин С. В., Гребешков А. Ю. Интернет вещей: учеб. пособие. Самара: Изд-во ПГУТИ, 2015. 200 с.
2. Chiasserini C. F., Griboaldo M., Manini D. Analytical Modeling of Wireless Communication Systems. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2016. 152 p.
3. Kamal Z.-E.-H., Salahuddin M. A. Introduction to Wireless Sensor Networks // Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks. 2015. P. 3–32.
4. Musznick B. Empirical Approach in Topology Control of Sensor Networks for Urban Environment // Journal of Telecommunications and Information Technology. 2019. March. N. 1. P. 47–57.
5. Соколова О. Д. Графовые модели для задач функционирования современных сетей передачи данных // Проблемы информатики. 2014. № 4 (25). С. 61–68.
6. Friis H. T. A note on a simple transmission formula // Proceedings of I.R.E. 1946. V. 34. P. 254–256.
7. Sun G., Zhao L., Chen Z., Qiao G. Effective link interference model in topology control of wireless Ad hoc and sensor networks // Journal of Network and Computer Applications. 2015. V. 52. P. 69–78.
8. Ababneh N. Performance Evaluation of a Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2010. V. 6 (1), 671385.
9. Blough D. M., Leoncini M., Resta G., Santi P. Topology control with better radio models: Implications for energy and multi-hop interference // Performance Evaluation. 2007. V. 64 (5). P. 379–398.
10. Cardieri P. Modeling Interference in Wireless Ad Hoc Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2010. V. 12 (4). P. 551–572.
11. Dousse O., Baccelli F., Thiran P. Impact of interferences on connectivity in ad hoc networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2005. V. 13 (2). P. 425–436.
12. Мулярчик К. С., Полочанский А. С. Качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях // Журнал БГУ. Математика. Информатика. 2017. № 2. С. 65–70.
13. Vaccour N., Koubâa A., Mottola L., Zúñiga M. A., Youssef H., Boano C. A., Alves M. Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: a Survey // ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN). 2012. V. 8. Iss. 4. P. 1–33.
14. Зюко А. Г., Кловский Д. Д. и др. Теория передачи сигналов. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
15. Abdi A., Tepedelenlioglu C., Kaveh M., Giannakis G. On the estimation of the K parameter for the Rice fading distribution // IEEE Communications Letters. 2001. V. 5 (3). P. 92–94.
16. Dams J., Hofer M., Kesselheim T. Scheduling in wireless networks with Rayleigh-fading interference // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2015. V. 14 (7). P. 1503–1514.
17. Proakis J., Saleni M. Digital Communications. Boston: McGraw-Hill, 2001. 936 p.
18. Listova N. V., Fedorenko V. V., Samoilenko I. V., Emelyanenko I. V., Samoilenko V. V. The communications channels models in wireless sensor networks, based on the structural-energetic interaction between signals and interference // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 2018. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337298.
19. Tri T. H. Theory and Design of Digital Communication Systems. Cambridge University Press, 2011. 668 p.
20. Dousse O., Baccelli F., Thiran P. Impact of interferences on connectivity in ad hoc networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2005. V. 13 (2). P. 425–436.
21. Штрапенин Г., Мишан М. CC2500 – универсальное решение Texas Instruments для локальной беспроводной связи // Компоненты и технологии. 2008. № 2. С. 113–118.

Статья поступила в редакцию 06.03.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоренко Владимир Васильевич – Россия, 355017, Ставрополь; Северо-Кавказский федеральный университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования; fovin_25@mail.ru.

Самойленко Владимир Валерьевич – Россия, 355017, Ставрополь; Северо-Кавказский федеральный университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры строительства нефтяных и газовых скважин; vvsamoilenko@ncfu.ru.

Алдущенко Дарья Владимировна – Россия, 355017, Ставрополь; Северо-Кавказский федеральный университет; аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования; darya.aldushchenko@mail.ru.

Емельяненко Игорь Владимирович – Россия, 355017, Ставрополь; Северо-Кавказский федеральный университет; аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования; igor_ncfu@mail.ru.



METHODS OF MODELING WIRELESS SENSOR NETWORKS TOPOLOGY CONSIDERING INTERNODAL INTERFERENCE

V. V. Fedorenko, V. V. Samoylenko, D. V. Alduschenko, I. V. Emelyanenko

*North-Caucasus Federal University,
Stavropol, Russian Federation*

Abstract. The article presents the analysis of developing methods of wireless sensor networks (WSNs) topologies based on a graph structure. It indicates the prevalence of tolerance criteria for de-scribing the links between nodes, for example, the limiting distance of radio communication, a sufficient ratio of signal/energy (interference + noise). To consider the impact of inter-node interference on the network topology it is proposed to use the permissible values of bit error probabilities or erasing an information packet in case of distortion of at least one its elements as a criterion for stable communication. The algorithm for calculating an analytical model of internode communication channel is presented to evaluate the effect of intra-network additive and multiplicative noise on the reliability indicator of incoherent message reception in the form of a bit error rate. Expression for the coefficient of structural interaction of the received signal and the interference complex is obtained, which allows considering the dependence of bit error rate on the energy components of individual interference at the receiver input, frequency separation value of a signal and values of each disturbance, their phase shifts and the duration of the information bit. There has been considered practical application of the WSNs topology modeling technique for the internode communication channels with Rice fading of a useful signal and Rayleigh fading of an intra-network interference complex (a case study of using CC2500 modems as part of WSNs nodes). As a result of analysis, there have been determined the relations between nodes, for which the bit error rates do not exceed the allowable value established by requirements for channel capacity and the length of information packets. The presented modeling approach proves the possibility of improving the network topology due to developing the internode links by redistributing the frequency resource between the nodes or adjusting the operation modes of the modems.

Key words: wireless sensor network, graph network model, bit error probability, intranet interference.

For citation: Fedorenko V. V., Samoylenko V. V., Alduschenko D. V., Emelyanenko I. V. Methods of modelling wireless sensor networks topology considering internodal interference. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2020;3:34-44. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-34-44.

REFERENCES

1. Rosliakov A. V., Vaniashin S. V., Grebeshkov A. Iu. *Internet veshchei: uchebnoe posobie* [Internet of things: teaching aids]. Samara, Izd-vo PGUTI, 2015. 200 p.
2. Chiasserini C. F., Gribaudo M., Manini D. *Analytical Modeling of Wireless Communication Systems*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2016. 152 p.
3. Kamal Z.-E.-H., Salahuddin M. A. Introduction to Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks*, 2015, pp. 3-2.
4. Musznick B. Empirical Approach in Topology Control of Sensor Networks for Urban Environment. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2019, March, no. 1, pp. 47-57.

5. Sokolova O. D. Grafovyye modeli dlia zadach funktsionirovaniia sovremennykh setei peredachi dannykh [Graph models for functioning of modern data transmission networks]. *Problemy informatiki*, 2014, no. 4 (25), pp. 61-68.
6. Friis H. T. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of I.R.E.*, 1946, vol. 34, pp. 254-256.
7. Sun G., Zhao L., Chen Z., Qiao G. Effective link interference model in topology control of wireless Ad hoc and sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, vol. 52, pp. 69-78.
8. Ababneh N. Performance Evaluation of a Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2010, vol. 6 (1), 671385.
9. Blough D. M., Leoncini M., Resta G., Santi P. Topology control with better radio models: Implications for energy and multi-hop interference. *Performance Evaluation*, 2007, vol. 64 (5), pp. 379-398.
10. Cardieri P. Modeling Interference in Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, vol. 12 (4), pp. 551-572.
11. Dousse O., Baccelli F., Thiran P. Impact of interferences on connectivity in ad hoc networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, vol. 13 (2), pp. 425-436.
12. Muliarchik K. S., Polochanskii A. S. Kachestvo obsluzhivaniia v besprovodnykh sensorykh setiakh [Quality of service in wireless sensor networks]. *Zhurnal BGU. Matematika. Informatika*, 2017, no. 2, pp. 65-70.
13. Baccour N., Koubâa A., Mottola L., Zúñiga M. A., Youssef H., Boano C. A., Alves M. Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: a Survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2012, vol. 8, iss. 4, pp. 1-33.
14. Ziuko A. G., Klovskii D. D. i dr. *Teoriia peredachi signalov* [Signal transmission theory]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1986. 304 p.
15. Abdi A., Tepedelenlioglu C., Kaveh M., Giannakis G. On the estimation of the K parameter for the Rice fading distribution. *IEEE Communications Letters*, 2001, vol. 5 (3), pp. 92-94.
16. Dams J., Hofer M., Kesselheim T. Scheduling in wireless networks with Rayleigh-fading interference. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, vol. 14 (7), pp. 1503-1514.
17. Proakis J., Saleni M. *Digital Communications*. Boston, McGraw-Hill, 2001. 936 p.
18. Listova N. V., Fedorenko V. V., Samoylenko I. V., Emelyanenko I. V., Samoylenko V. V. The communications channels models in wireless sensor networks, based on the structural-energetic interaction between signals and interference. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Moscow, 2018. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337298.
19. Tri T. H. Theory and Design of Digital Communication Systems. *Cambridge University Press*, 2011. 668 p.
20. Dousse O., Baccelli F., Thiran P. Impact of interferences on connectivity in ad hoc networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, vol. 13 (2), pp. 425-436.
21. Shtrapenin G., Mishan M. CC2500 – universal'noe reshenie Texas Instruments dlia lokal'noi besprovodnoi svyazi [CC2500 – Texas Instruments Universal Wireless LAN Solution]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no. 2, pp. 113-118.

The article submitted to the editors 06.03.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorenko Vladimir Vasilevich – Russia, 355017, Stavropol; North-Caucasus Federal University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling; fovin_25@mail.ru.

Samoylenko Vladimir Valerevich – Russia, 355017, Stavropol; North-Caucasus Federal University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Oil and Gas Wells Construction; vvsamoilenko@ncfu.ru.

Alduschenko Daria Vladimirovna – Russia, 355017, Stavropol; North-Caucasus Federal University; Postgraduated Student of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling; darya.aldushchenko@mail.ru.

Emelyanenko Igor Vladimirovich – Russia, 355017, Stavropol; North-Caucasus Federal University; Postgraduated Student of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling; igor_ncfu@mail.ru.

