

УДК 004.72; 621.391

- А. А. Дворников**, аспирант, ассистент департамента Компьютерной инженерии  
МИЭМ НИУ ВШЭ, e-mail: advornikov@hse.ru,  
**Л. С. Восков**, канд. техн. наук, проф. департамента Компьютерной инженерии  
МИЭМ НИУ ВШЭ, e-mail: lvoskov@hse.ru,  
**Е. А. Саксонов**, д-р техн. наук, проф.,  
МГУТУ им. К. Г. Разумовского, saksmiem@mail.ru,  
**С. Г. Ефремов**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, e-mail: sefremov@hse.ru,  
НИУ ВШЭ

## Метод построения оптимального наложенного канала для беспроводной сенсорной сети

*Предложен метод поиска оптимального маршрута наложенного канала связи поверх беспроводной сенсорной сети, позволяющий повысить эффективность использования свободных телекоммуникационных и энергетических ресурсов беспроводных сенсорных сетей без нарушения их первичной функции.*

**Ключевые слова:** телекоммуникационные сети, беспроводные сенсорные сети, поиск маршрута, свободный телекоммуникационный ресурс, свободный энергетический ресурс, недогруженные сети, свободные ресурсы, поиск маршрута минимальной длины с максимальным весом, балансировка нагрузки, наложенные сети, наложенный канал связи

### Введение

В статье представлен разработанный метод поиска оптимального маршрута наложенного канала беспроводной сенсорной сети, исключающего выбор технически нереализуемых случаев.

Беспроводные сенсорные сети — это сети датчиков и актуаторов, отличительной особенностью которых является большое число автономных узлов с малым энергопотреблением, малой дальностью связи и небольшой пропускной способностью. Одно из главных преимуществ подобных сетей — захват больших территорий за счет применения механизмов ретрансляции сообщений от узла к узлу. В отличие от классических сетей в беспроводных сенсорных сетях энергия на узлах — важная характеристика при планировании дальнейшей работы.

Беспроводные сети по своей природе широковещательны и могут устанавливать связь со всеми узлами в радиусе действия, что затрудняет анализ подобных сетей. В беспроводных сенсорных сетях радиус действия приемопередатчика для большинства узлов невелик, поэтому узел может взаимодействовать с ограниченным числом узлов в сети. Для изображения таких сетей можно использовать граф, где ребро — потенциально возможная связь с другим узлом.

Не все телекоммуникационные ресурсы сетей телесвязи, в том числе и беспроводные сенсорные, используются полностью [1—4]. Событийная активность сетей, направленность на энергосбережение, неэффективная инфраструктура, инженерная избыточность, мобильность, неравномерное распределение ресурсов в узлах приводят к образованию свободных телекоммуникационных и энергетических остатков в современных беспроводных сенсорных сетях, переводя их в класс недогруженных сетей телесвязи.

Имеется ряд задач, связанных с передачей данных, организацией временных или постоянных каналов телесвязи и телекоммуникационных сетей в ситуациях, когда применение существующих на сегодняшний день технических средств невозможно либо затруднено. Предлагается решить данные задачи за счет использования свободных телекоммуникационных ресурсов беспроводных сенсорных сетей. Данный подход отличается тем, что решение задач не требует организации новых сетей и масштабирования существующих, позволяет выполнять балансировку существующей беспроводной сенсорной сети.

В данной работе рассматривается случай организации обособленного наложенного канала. Взаимовлияние нескольких каналов — задача от-

дельного исследования. Расчет маршрутов канала проводится на приграничных шлюзах в режиме реального времени.

### Постановка задачи

Узлы беспроводных сенсорных сетей обладают свободными энергетическим и телекоммуникационным ресурсами. Одним из способов использования свободных телекоммуникационных ресурсов являются наложенные каналы (*overlay channels*) и наложенные сети (*overlay networks*) [5, 6] — телекоммуникационной сети, состоящей из нескольких (возможно, пересекающихся) наложенных каналов.

При поиске оптимального маршрута для канала наложенной сети используются те же алгоритмы, что и в классических сетях, при условии применения графовой модели.

В статье [7], посвященной сбору данных в беспроводной сенсорной сети со множеством стоков, графовая модель дополнена емкостью и интерференцией в канале связи на ребре графа. В работе [8] рассмотрена задача формирования структуры базовой сети телекоммуникационной системы при наличии нескольких провайдеров. Для решения поставленной задачи предложена модификация графовой модели, где веса присваиваются не только ребрам графа, но и узлам. В статье [9] представлена графовая модель, где на узлы и ребра мультиграфа накладываются несколько характеристик для решения задачи адаптивной маршрутизации в корпоративных сетях нескольких провайдеров связи.

В результате анализа литературы обнаружена практика модификации графовой модели для решения более частных задач, в том числе за счет добавления одного или нескольких весов на узел, добавления нескольких весов на ребро.

Имеется связный граф сети, предлагается модель беспроводной сенсорной сети и метод поиска оптимального маршрута для наложенного канала, характеризующиеся тем, что в модели на узлы и ребра накладываются следующие параметры: свободный телекоммуникационный ресурс на узле, свободная энергия на узле, качество связи соединения на ребре и профиль соединения на ребре, — позволяющие более точно отобразить предметную область и исключить выбор нереализуемых маршрутов при применении предложенного метода за счет соблюдения минимумов свободной пропускной способности и энергии на узле, а также минимума качества связи и максимума потерь сообщений при наложении профилей на ребре графа.

### Математическая модель наложенного канала

Пусть беспроводная сенсорная сеть представлена в виде графа сети  $G_w = (V_w, E_w)$ , где  $V_w = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ :  $m \in \mathbb{N}$ ,  $m > 0$  — множество вер-

шин,  $E_w = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$ :  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n > 0$  — множество ребер графа сети,  $s \in V_w$  — исток маршрута,  $t \in V_w$  — сток маршрута. Вершинам  $v = (b, e)$  присвоены два параметра: первый параметр  $b \in \mathbb{Z}^+$  — телекоммуникационный остаток (неиспользуемая в настоящее время часть пропускной способности приемопередатчика узла), второй параметр  $e \in \mathbb{Z}^+$  — энергетический остаток узла (энергия, которую узел может выделить для наложенного канала без риска выйти из строя в текущий момент). Для каждого ребра графа сети  $\varepsilon = (q, p_w)$  определены два параметра: первый —  $q \in \mathbb{R}$ ,  $q \in \{0, \dots, 1\}$  — определяет качество связи между двумя узлами так, что значение  $q = 1$  соответствует максимальному качеству связи, а  $q = 0$  — полному ее отсутствию; второй —  $p_w \subseteq P_w$  задает профиль канала беспроводной сенсорной сети между двумя узлами (характеристика трафика в канале беспроводной сенсорной сети). Профиль накладываемого на беспроводную сенсорную сеть канала является важной его характеристикой [10]: он определяет процент потерь, возникающих при наложении потоков сообщений наложенного канала и канала беспроводной сенсорной сети. Состав множества профилей  $P_w$  зависит от решаемой задачи.

Если узел получает энергоснабжение извне и энергия потенциально бесконечна, то  $e = e_{\max}$ ,  $e_{\max} \in \mathbb{N}$ ,  $e_{\max} > 0$ , где  $e_{\max}$  — максимально возможное количество энергии на узле.

Матрица совместимости профилей беспроводной сенсорной сети и наложенной сети  $\Sigma_c = P_w \times P_n$ , где элементы матрицы  $\sigma_{c_{ij}} \in \mathbb{R}$ ,  $\sigma_{c_{ij}} \in \{0, \dots, 1\}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, n$ , обозначают процент потерянных пакетов из-за наложения потоков сообщений канала наложенной сети и беспроводной сенсорной сети, а  $P_n$  — множество профилей наложенного канала. Пусть  $r = \zeta(a, b)$ :  $r \in \Sigma_c$ ,  $a \in P_w$ ,  $b \in P_n$  возвращает из матрицы совместимости  $\Sigma_c$  процент потерь сообщений, возникших из-за наложения потока сообщений беспроводной сенсорной сети, соответствующему профилю из множества  $P_w$ , и потока сообщений канала наложенной сети, соответствующему профилю из множества  $P_n$ .

Пусть  $y = w(u, v)$ :  $u \in V_s$ ,  $v \in V_s$ ,  $y \in \mathbb{R}^+$ , — весовая функция ребра графа. Определим весовую функцию  $w(u, v)$  следующим образом:

$$w(u, v) = k_b \min\left(\frac{b_u}{k_s}, \frac{b_v}{k_t}\right) + k_e \min(e_u, e_v) + k_a q_{uv} - k_a \zeta(p_{w_{uv}}, p_n) + C_n. \quad (1)$$

Константа  $C_n \in \mathbb{R}^+$ :  $C_n = \max(k_a \zeta(p_{w_{uv}}, p_n))$  компенсирует отрицательную составляющую совместимости каналов связи и смещает функцию на

множество  $\mathbb{R}^+$ . Коэффициенты  $k_s = \begin{cases} 1, u = s \\ 2, u \neq s \end{cases}$  и

$k_t = \begin{cases} 1, v = t \\ 2, v \neq t \end{cases}$  позволяют выбирать большую про-

пускную способность в том случае, если узел является истоком либо стоком маршрута.  $k_b \in \mathbb{R}^+$ ,  $k_e \in \mathbb{R}^+$ ,  $k_q \in \mathbb{R}^+$ ,  $k_a \in \mathbb{R}^+$  — весовые коэффициенты для предложенного метода, которые задаются исходя из необходимых приоритетов для решения конкретной задачи для свободной пропускной способности на узле, свободного энергетического остатка, качества канала связи, совместимости профилей беспроводной сенсорной сети и наложенной сети, соответственно.

Задача поиска оптимального маршрута для канала наложенной сети сформирована следующим образом. Пусть  $R_{st} \subseteq E_w$  — выбранный маршрут от  $s$  до  $t$ ,  $p_n \in P_n$  — профиль наложенного канала):

$$\begin{cases} \sum_{\substack{v, u \in V_w; \\ vu \in R_{st}}} w(u, v) \rightarrow \max; \\ b \geq b_{\min} \quad \forall v \in V_w: vu \in R_{st}; \\ e \geq e_{\min} \quad \forall v \in V_w: vu \in R_{st}; \\ q \geq q_{\min} \quad \forall uv \in R_{st}; \\ \zeta(p_{w_{uv}}, p_n) \geq \sigma_{\max} \quad \forall uv \in R_{st}. \end{cases} \quad (2)$$

### Метод поиска оптимального маршрута для канала наложенной сети

Предложенный метод состоит из следующих этапов:

**Этап 1.** Преобразование предложенного выше графа беспроводной сенсорной сети  $G_w$  к графу сети  $G_s$  сети с помощью Алгоритма 1.

**Этап 2.** Выбор алгоритма поиска кратчайшего пути максимальной стоимости исходя из минимальной асимптотической вычислительной сложности.

**Этап 3.** Поиск кратчайшего пути максимальной стоимости с помощью выбранного алгоритма.

Оптимальный набор алгоритмов поиска кратчайшего пути максимальной стоимости зависит от решаемой задачи.

#### Алгоритм 1: Преобразование графа беспроводной сенсорной сети $G_w$ в граф сети $G_s$

Алгоритм 1 служит для преобразования беспроводной сенсорной сети в граф сети, опираясь на информацию о стоке и истоке сети, а также на профиль запланированного для организации наложенного канала. Полученный на выходе сетевой граф может быть обработан любым алгоритмом, работающим на взвешенных неориентированных сетевых графах.

В Алгоритме 1 используются следующие входные и выходные переменные:

- $G_w = (V_w, E_w)$  — беспроводная сенсорная сеть, которую необходимо преобразовать в граф сети;
- $s \in V_w$  — узел-исток наложенного канала (инициатор соединения);
- $t \in V_w$  — узел-сток наложенного канала (удаленная сторона);
- $p_n \in P_w$  — профиль канала наложенной сети (характеристика трафика в создаваемом наложенном канале);
- $N: \forall n_c \in n: n \in V_w$  — вектор характеристик узлов ( $b$  и  $e$ , применительно к исходной задаче, где  $b$  — телекоммуникационный остаток, а  $e$  — энергетический остаток на узле);
- $L: \forall l_c \in e: e \in E_w$  — вектор характеристик соединений между узлами ( $q$  и  $p_w$ , применительно к текущей задаче, где  $q$  — качество связи, а  $p_w$  — профиль трафика между двумя узлами);
- $N_{\min} = \{r_1, \dots, r_{|M|}\}$  — вектор ограничений снизу на характеристики узла. Значение входит в ограничение включительно ( $b_{\min}$  и  $e_{\min}$ , применительно для текущей задачи, где  $b_{\min}$  — ограничение снизу на свободный телекоммуникационный ресурс, а  $e_{\min}$  — ограничение снизу на свободный энергетический остаток на узле);
- $L_{\min} = \{w_1, \dots, w_{|L|}\}$  — вектор ограничений снизу на характеристики соединения между узлами ( $q_{\min}$  и 0, применительно к текущей задаче, где  $q_{\min}$  — ограничение снизу на качество связи между узлами). Значение входит в ограничение включительно;
- $N_{\max} = \{z_1, \dots, z_{|M|}\}$  — вектор ограничений сверху на характеристики узла (0 и 0, применительно к текущей задаче);
- $L_{\max} = \{x_1, \dots, x_{|L|}\}$  — вектор ограничений сверху на характеристики соединения между узлами (0 и  $\sigma_{\max}$ , применительно к текущей задаче, где  $\sigma_{\max}$  — максимальные потери пакетов при наложении потоков сообщений беспроводной сенсорной сети и наложенного канала).

**Алгоритм 1** состоит из следующих шагов:

**Шаг 1.** Создать копию исходного графа  $W_s$  с новым именем  $G_s$ .

**Шаг 2.** Проверить все узлы  $v$  графа  $G_s$ .

**Шаг 3.** Проверить все характеристики  $p$  узла  $v$ . Проверить, удовлетворяет ли значение характеристики  $p$  узла  $v$  нижнему и верхнему пределу:

1) если нет — удалить узел  $v$  из графа  $G_s$  и все связанные с ним каналы.

**Шаг 4.** Проверить все дуги  $l$  от узла  $v$ .

**Шаг 5.** Проверить все характеристики  $p$  дуги  $l$ , которая еще не была проверена.

Проверить, удовлетворяет ли значение характеристики  $p$  дуги  $l$  нижнему и верхнему пределу:

1) если нет — удалить дугу  $l$  из графа  $G_s$ .

**Шаг 6.** Рассчитать вес дуги  $l$ , используя формулу (1).

**Шаг 7.** Проверить достижимость узла  $s$  и  $t$  в графе  $G_s$  любым алгоритмом, работающим на неориентированных графах.

На основе описания алгоритма проведена аналитическая оценка сложности Алгоритма 1:

$$O(|V|*|E|*|N|*|L|), \quad (3)$$

где  $V$  — множество узлов графа беспроводной сенсорной сети;  $E$  — множество ребер графа беспроводной сенсорной сети;  $N$  — множество ограничений на узел графа беспроводной сенсорной сети;  $L$  — множество ограничений на ребро беспроводной сенсорной сети.

Ниже представлен пример преобразования исходного графа беспроводной сенсорной сети (рис. 1) в граф сети (рис. 2) с помощью Алгоритма 1.

Преобразование выполнено для профиля канала наложенной сети 1 (см. рис. 1). В процессе выполнения Алгоритма 1 из исходного графа (см. рис. 1) были удалены следующие элементы:

1. Узел  $A$  из-за малого свободного телекоммуникационного ресурса.
2. Узел  $F$  из-за малого свободного энергетического ресурса.
3. Канал связи  $c$  из-за низкого качества связи.
4. Канал связи  $i$  из-за низкой совместимости профиля наложенного канала и профиля беспроводной сенсорной сети.
5. Канал связи  $n$  из-за низкой совместимости профиля наложенного канала и профиля беспроводной сенсорной сети.

При выполнении алгоритма использовались следующие ограничения при весовых коэффициентах по умолчанию ( $k_b = 1, k_e = 1, k_q = 100, k_\sigma = 100$ ) (формула 1):

1. Свободный телекоммуникационный ресурс не может быть меньше 200.
2. Свободный энергетический ресурс не может быть меньше 100.
3. Качество связи между узлами должно быть больше 0,3 (30 %).
4. Потери пакетов при совмещении каналов беспроводной сенсорной сети и каналов наложенной сети не должны превышать 0,45 (45 %).

Полученный граф  $G_s$  используется в алгоритме поиска кратчайшего пути максимальной стоимости, который завершает процедуру поиска маршрута для канала наложенной сети поверх беспроводной сенсорной сети.

Ниже показана ситуация, когда полученный граф  $G_s$  оказывается несвязным (рис. 3).

Граф  $G_s$  на рис. 3 получен при тех же условиях, но для профиля канала наложенной сети 2 (см. рис. 1).

В процессе выполнения Алгоритма 1 из исходного графа (см. рис. 1) были удалены следующие элементы:

1. Узел  $A$  из-за малого свободного телекоммуникационного ресурса.
2. Узел  $F$  из-за малого свободного энергетического ресурса.
3. Канал связи  $c$  из-за низкого качества связи.

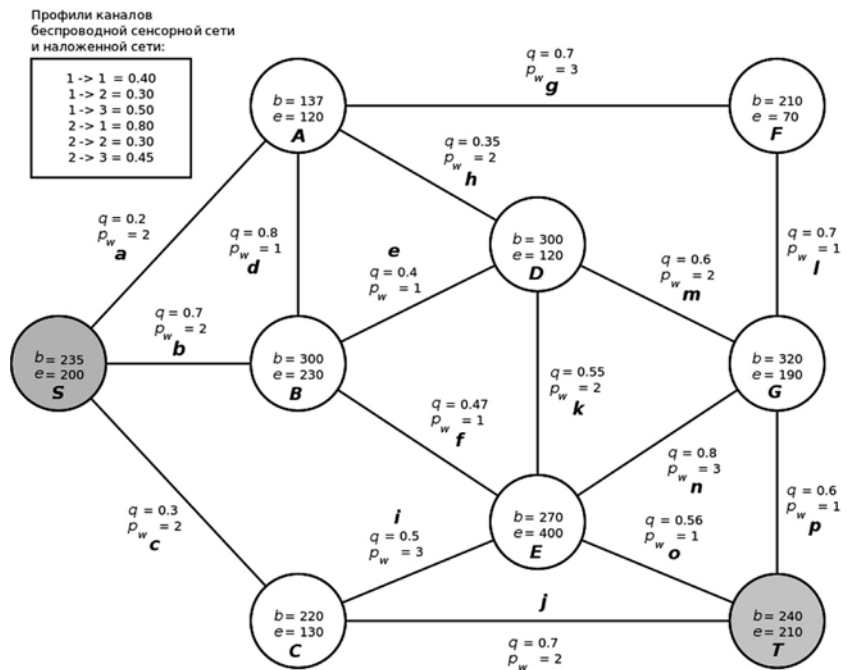


Рис. 1. Граф беспроводной сенсорной сети, соответствующий предложенной модели

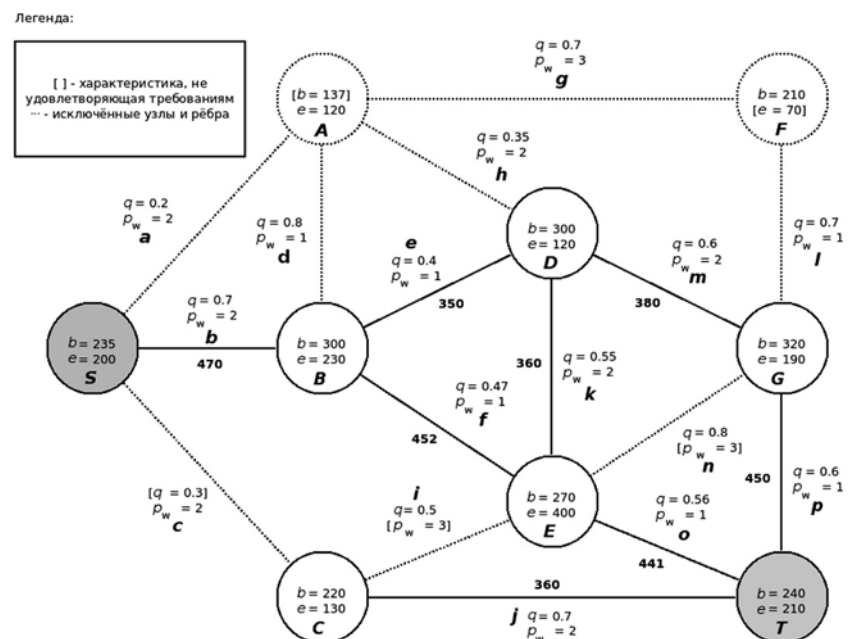


Рис. 2. Граф сети поверх графа беспроводной сенсорной сети, соответствующего предложенной модели

4. Канал связи  $e$  из-за низкой совместимости профиля наложенного канала и профиля беспроводной сенсорной сети.

5. Канал связи  $f$  из-за низкой совместимости профиля наложенного канала и профиля беспроводной сенсорной сети.

6. Канал связи  $o$  из-за низкой совместимости профиля наложенного канала и профиля беспроводной сенсорной сети.

7. Канал связи  $p$  из-за низкой совместимости профиля наложенного канала и профиля беспроводной сенсорной сети.

В этом случае наложенный канал между двумя узлами проложить невозможно.

### Экспериментальная часть

Сложность метода (формула (4)) зависит от сложности алгоритма преобразования графа беспроводной сенсорной сети в граф сети (Алгоритм 1) и от выбранного алгоритма поиска кратчайшего пути максимального веса:

$$\zeta(V, E, N, L) = \zeta_{alg_1}(V, E, N, L) + \zeta_{sp}(V, E, N, L), (4)$$

где  $\zeta$  — общая сложность метода;  $\zeta_{alg_1}$  — сложность Алгоритма 1;  $\zeta_{sp}$  — сложность алгоритма выбора кратчайшего пути с максимальной сложностью;  $V$  — число узлов в графе беспроводной сенсорной сети;  $E$  — число ребер в графе беспроводной сенсорной сети;  $N$  — число ограничений на узел графа беспроводной сенсорной сети;  $L$  — число ограничений на ребро графа беспроводной сенсорной сети.

К формуле (4) есть ряд ограничений:

1. В рассматриваемом варианте метода используются два ограничения на узел беспроводной сен-

сорной сети, поэтому аргументом  $N$  можно пренебречь, а его влияние перейдет в мультипликативную константу каждого из слагаемых.

2. В рассматриваемом варианте метода используются два ограничения на ребро беспроводной сенсорной сети, поэтому аргументом  $L$  можно пренебречь, а его влияние перейдет в мультипликативную константу каждого из слагаемых.

3. Для определения экспериментальной оценки сложности метода необходимо построить беспроводную сенсорную сеть, выполнив процедуру расположения точек на плоскости и образования ребер между ними. Большинство существующих методов не позволяет указать число ребер графа и узлов одновременно. На чаще других на практике применяется метод построения сети с помощью метода триангуляции, где число ребер зависит линейно от числа узлов. Использование данного метода позволяет избавиться от зависимости сложности метода от числа ребер в графе беспроводной сенсорной сети, переведя данный фактор в мультипликативную константу.

При учете данных факторов формула (4) принимает вид:

$$\zeta(V, E) = \zeta_{alg_1}(V) + \zeta_{sp}(V, E). (5)$$

В связи с адаптивным выбором алгоритма поиска кратчайшего маршрута максимальной стоимости его выбор неизвестен заранее. С точки зрения оценки сложности метода достаточно установить сложность Алгоритма 1.

Ранее аналитически установлено (формула (3)), что Алгоритм 1 линейно зависит от числа узлов. В таком случае, формула сложности Алгоритма 1 (формула (5)) выглядит следующем образом:

$$\zeta_{alg_1}(V) = A_{alg_1} * V + b_{alg_1}, (6)$$

где  $A_{alg_1}$  — мультипликативная константа Алгоритма 1,  $b_{alg_1}$  — константа смещения Алгоритма 1.

Для восстановления формулы сложности алгоритма достаточно определить  $A_{alg_1}$  и  $b_{alg_1}$ . Математические расчеты проведены в математической среде Scilab с использованием набора инструментов для проведения расчетов на графах metanet (см. рис. 3). В качестве оценки сложности алгоритма принимается время его выполнения.

На рис. 4 зависимость времени исполнения алгоритма имеет линейный характер. Шум на графиках обусловлен случайным фактором при создании исследуемых беспроводных сенсорных сетей.

Легенда:

[ ] - характеристика, не удовлетворяющая требованиям  
 --- - исключённые узлы и рёбра

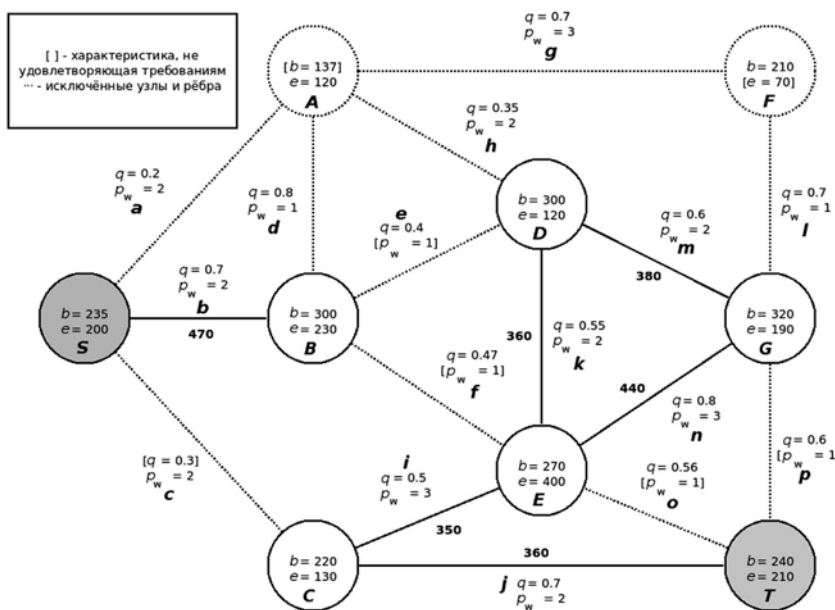


Рис. 3. Граф сети поверх графа беспроводной сенсорной сети, соответствующего предложенной модели (несвязный случай)

По результатам эксперимента получены следующие константы:

- $A_{alg_1} \approx 498,4 \cdot 10^{-5}$  с.
- $b_{alg_1} \approx -836,8 \cdot 10^{-5}$  с.
- $x_{0_{alg_1}} = 2$  — точка, до которой сложность алгоритма принято считать бесконечно малой (значение указывается включительно).
- $\Delta_{alg_1} \approx 8 \cdot 10^{-6}$  с — средняя абсолютная погрешность между восстановленной зависимостью  $f_r$  и экспериментальной  $f_s$ .
- $\delta_{alg_1} \approx 1,8\%$  — средняя относительная погрешность между восстановленной зависимостью  $f_r$  и экспериментальной  $f_s$ .

Линейная зависимость Алгоритма 1 от числа узлов сети подтвердилась экспериментально (см. рис. 3). По результатам эксперимента видно, что в беспроводных сенсорных сетях до 20 узлов включительно временные затраты на Алгоритм 1 незначительны (до 100 мс), в сетях от 20 до 100 включительно узлов работа Алгоритма 1 вызывает приемлемые для поставленной задачи задержки (до 500 мс), в сетях с числом узлов более 200 узлов использовать Алгоритм 1 не рекомендуется ввиду большого времени выполнения (более 1 с). Все оценки приведены с учетом ожидаемого увеличения времени выполнения за счет выбранного алгоритма поиска кратчайшего маршрута.

### Практическое применение

Полученные ресурсы могут быть направлены на оказание телекоммуникационных услуг внешним клиентам беспроводной сенсорной сети.

Существует ряд ситуаций, когда предложенный метод может быть эффективно применен на практике при организации:

- связи при чрезвычайных ситуациях;
- связи в условиях телекоммуникационной блокады;
- связи в труднодоступных местах;
- высоконадежных каналов связи.

Предложенный метод позволяет найти маршрут и организовать связь при чрезвычайных ситуациях [12], в том числе при катастрофах, для служб спасения тогда, когда иные средства телесвязи вышли из строя, за счет способности беспроводных сенсорных сетей к самовосстановлению.

Большое число узлов в беспроводных сенсорных сетях, в том числе и телекоммуникационных стоков, позволяет организовывать связь в ситуациях информационной войны, когда связь с клиен-

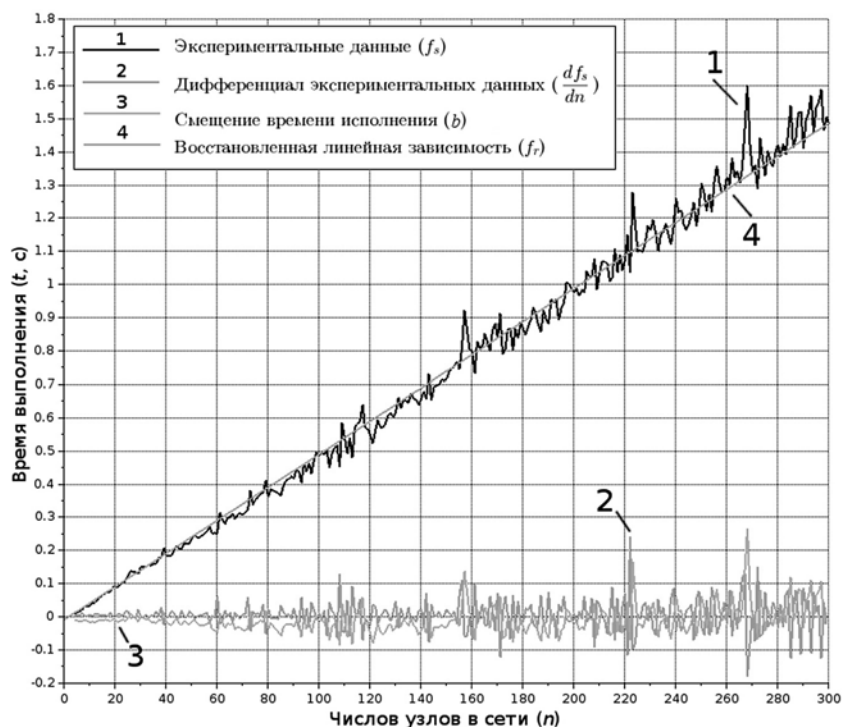


Рис. 4. Результат экспериментального определения сложности Алгоритма 1

том на другой стороне заблокирована по основным телекоммуникационным каналам связи [13]. Возможна организация высоконадежных каналов связи, которые могут быть устойчивы как к естественным, так и искусственным помехам.

Использование предложенного метода в беспроводных сенсорных сетях мониторинга окружающей среды [14] позволяет организовывать связь в тех местах, где иные средства телекоммуникации слишком дороги либо недоступны. Допустимо использование приложения как средства экстренной связи в лесах и иных территориях, где может оказаться человек либо группа людей, вдали от населенных пунктов.

### Заключение

Сформирована постановка задачи, разработан метод выбора оптимального маршрута для наложенного канала в беспроводной сенсорной сети. Проведена экспериментальная оценка сложности ключевого алгоритма предложенного метода, которая подтвердила его линейность, восстановлена функция сложности. Установлена область применимости предложенного метода.

По результатам работы остаются нерешенными следующие задачи:

- взаимовлияние и взаимokoординация нескольких наложенных каналов.
- определение достижимости узлов в наложенной сети на раннем этапе (до выполнения преобразования графа и поиска маршрута).

## Список литературы

1. **Титов И. М.** Исследование модели трафика сервера данных по результатам измерений трафика мультимедийного ресурса // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. 2011. № 6. С. 46—49.
2. **Кириченко Л. О., Радивилова Т. А., Стороженко А. В.** Алгоритм предупреждения перегрузки компьютерной сети путем прогнозирования средней длины очереди // *Збірник Наукових Праць Харківського Університету Повітряних Сил*. 2007. № 3. С. 94—97.
3. **Маликова Е. Е.** Метод повышения пропускной способности систем телеметрии и мониторинга на базе беспроводных сетей // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. 2010. № 7. С. 36—38.
4. **Прокопьев А. В.** Разработка и исследование моделей нагрузки в беспроводных сенсорных сетях: Дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.12.13). СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 2012.
5. **Дорт-Гольц А. А.** Разработка и исследование метода балансировки трафика в пакетных сетях связи: Дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.12.13). СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 2014. 168 с.
6. **Агеев Д. В.** Синтез наложенных телекоммуникационных сетей с учетом единиц данных и применении многослойного графа // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. Т. 4. № 9 (64). С. 49—51.
7. **Chen S., Colbeth M., Dinh H., Kim Y., Wang B.** Data collection with multiple sinks in wireless sensor networks // *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Springer, 2009. P. 284—294.
8. **Горшков Г. С., Никитин Е. В., Саксонов Е. А.** Задача формирования структуры базовой сети // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2010. № 2 (17). С. 59—66.
9. **Корячко В. П., Перепелкин Д. А., Иванчикова М. А.** Алгоритм адаптивной маршрутизации в корпоративных сетях нескольких провайдеров связи // *Вестник РГРТУ*. 2013. № 44. С. 52—56.
10. **Дворников А. А.** Агентно-ориентированное моделирование совместимости каналов беспроводной сенсорной и наложенной сетей // *Качество, инновации, образование*. 2015. № 9 (124). С. 34—40.
11. **Корячко В. П., Перепелкин Д. А.** Разработка и исследование математической модели многопутевой адаптивной маршрутизации в сетях связи с балансировки нагрузки // *Электро-связь*. 2014. № 12. С. 27—31.
12. **Fujiwara T., Nakayama S., Iida N., Watanabe T.** A wireless network scheme enhanced with ad-hoc networking for emergency communications // *Power*. 2003. Vol. 10.
13. **Leberknight C. S., Chiang M., Poor H. V., Wong F.** A taxonomy of Internet censorship and anti-censorship. *Princeton Tech Report*, 2012. 28 p.
14. **Oliveira L. M., Rodrigues J. J.** Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring // *J. Commun.* 2011. Vol. 6, N 2. P. 143—151.

**A. A. Dvornikov**, Teaching Assistant MIEM NRU HSE, Post-Graduate Student, e-mail: advornikov@hse.ru  
**L. S. Voskov**, Professor MIEM NRU HSE, PhD, e-mail: lvoskov@hse.ru  
**E. A. Saksonov**, Professor MSUTM named after K. G. Razumovskiy, PhD, e-mail: saksmiem@mail.ru  
**S. G. Efremov**, Senior Lecturer NRU HSE, PhD, e-mail: sefremov@hse.ru

## A Method for Organization of an Optimal Overlay Channel in Wireless Sensor Networks

*A new method of optimal route search for an overlay channel built on top of a wireless sensor network is proposed. It allows to increase utilization of unused telecommunication and energy resources in wireless sensor networks without loss of their primary functions.*

**Keywords:** telecommunication networks, wireless sensor networks, route search, unused telecommunication resources, unused energy resources, underloaded network, shortest path with a maximum weight problem, load balancing, overlay networks, overlay channels.

### References

1. **Titov I. M.** Issledovanie modeli trafika servera dannyh po rezul'tatam izmerenij trafika mul'timedijnogo resursa, *T-Comm — Telekommunikacii i Transport*, 2011, no. 6, pp. 46—49 (in Russian).
2. **Kirichenko L. O., Radivilova T. A., Storozhenko A. V.** Algoritm preduprezhdenija peregruzki komp'yuternoj seti putem prognozirovaniya srednej dliny ocheredi, *Zbirnyk Naukovykh Prac' Harkivs'kogo Universytetu Povitrijnyh Syl*, 2007, no. 3, pp. 94—97.
3. **Malikova E. E.** Metod povyshenija propusknoj sposobnosti sistem telemetrii i monitoringa na baze besprovodnyh setej, *T-Comm — Telekommunikacii i Transport*, 2010, no. 7, pp. 36—38 (in Russian).
4. **Prokop'ev A. V.** *Razrabotka i issledovanie modelej nagruzki v besprovodnyh sensornyh setjah* (Published PhD thesis). The Bonch-Bruевич Saint — Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg (in Russian).
5. **Dort-Gol'c A. A.** (2014). *Razrabotka i issledovanie metoda balansirovki trafika v paketnyh setjah svyazi* (Published PhD thesis). The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg, 2012, 168 p. (in Russian).
6. **Ageev D. V.** Cintez nalozhennyh tele-kommunikacionnyh setej s uchedom edinic dannyh i primeneniem mnogoslajnogogo grafa, *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2013, vol. 4, no. 9 (64), pp. 49—51 (in Russian).
7. **Chen S., Colbeth M., Dinh H., Kim Y., Wang B.** Data collection with multiple sinks in wireless sensor networks, *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Springer, 2009, pp. 284—294.
8. **Gorshkov G. S., Nikitin E. V., Saksonov E. A.** Zadacha formirovaniya struktury bazovoj seti, *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 2 (17), 2010, pp. 59—66 (in Russian).
9. **Korjachko V. P., Perepelkin D. A., Ivanchikova M. A.** Algoritm adaptivnoj marshrutizacii v korporativnyh setjah neskol'kih provajдеров svyazi, *Vestnik RGRU*, 2013, no. 44, pp. 52—56 (in Russian).
10. **Dvornikov A. A.** Agentno-orientirovanoe modelirovanie sovmestimosti kanalov besprovodnoj sensornoj i nalozhennoj setej (An agent-oriented wireless sensor network and a superimposed network channels compatibility modeling), *Kachestvo, innovacii, obrazovanie*, 2015, no. 9 (124), pp. 34—40 (in Russian).
11. **Korjachko V. P., Perepelkin D. A.** Razrabotka i issledovanie matematicheskoj modeli mnogoputevoj adaptivnoj marshrutizacii v setjah svyazi s balansirovki nagruzki, *Jelektrosvjaz'*, 2014, no. 12, pp. 27—31 (in Russian).
12. **Fujiwara T., Nakayama S., Iida N., Watanabe T. A.** A wireless network scheme enhanced with ad-hoc networking for emergency communications. *Power*, 2003, vol. 10.
13. **Leberknight C. S., Chiang M., Poor H. V., Wong F.** A taxonomy of Internet censorship and anti-censorship, *Princeton Tech Report*, 2012, 28 p.
14. **Oliveira L. M., Rodrigues J. J.** Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring, *J. Commun.*, 2011, vol. 6, no. 2. pp. 143—151.