

5. Государственный комитет Республики Башкортостан по чрезвычайным ситуациям, данные по паводкам за 2017 год. URL: <https://gkchs.bashkortostan.ru/activity/1788/> (дата обращения 12.03.2020).

N. I. Kurakina, V. S. Kovchik  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## GEOINFORMATIONAL MODELING SYSTEM OF THE TERRITORY FLOORING HYDROLOGICAL PROCESSES

*The issues of landscape modeling of hydrological processes are studied in this paper. A generalized geoinformation model of runoff formation has been developed. The flow is schematized on the basis of the allocation within the basin of homogeneous landscape-hydrological areas and altitudes. This problem is solved by means of GIS technologies based on digital elevation models, soil and landscape maps of various scales, satellite imagery data and processing products. The allocation of zones of flooding given security is carried out using specialized tools "Hydrology" ArcGIS Spatial Analyst. For analysis, only the catchment area should be considered. This is the most significantly reducing time costs. The object of the study is the Belaya River in the Republic of Bashkortostan, the main water and drinking source of the region – a typical example of a water body subjected to intense annual spills. The analysis of the results is carried out in accordance with real statistics of flooding in the studied region.*

**Landscape modeling, hydrological processes, flooding of the territory, geographic information systems, analysis, ArcGIS for Desktop**

УДК 681.3, 621.937:004.942

Ю. Т. Лячек, М. С. А. Мутанна  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Распределение трафика в сети LoRaWAN

*Интернет вещей (IoT) позволяет подключать, измерять, контролировать миллионы устройств для автоматизации процессов и поддержки более эффективного принятия решений при их управлении. С другой стороны, эти устройства IoT требуют экономичных, дальнodayствующих и энергетически эффективных датчиков и исполнительных механизмов. Рассмотрена технология LoRaWAN – одна из технологий маломощных глобальных сетей (LPWAN), которой в последние годы уделяется значительное внимание исследовательского сообщества. LoRaWAN обеспечивает низкое энергопотребление и скорость передачи данных в широком диапазоне покрываемых областей. Использование протокола LoRaWAN в системах IoT позволяет оптимизировать энергопотребление, емкость, стоимость и охват системы. Исследуется проблема распределения трафика по радиочастотным каналам и предлагается подход к моделированию сети LoRaWAN, основанный на наличии нескольких независимых радиочастотных каналов. В рамках этого подхода предлагается модель и метод расчета сети LoRaWAN. В частности, описан метод решения с использованием подхода динамического программирования. Предложен метод решения задачи оптимального распределения трафика. Численные результаты показывают эффективность предложенного подхода, при котором максимально используется пропускная способность технологии LoRa. В ряде случаев предлагается передавать по сети только те участки изображения, которые изменяются во времени.*

**LoRaWAN, радиочастотные каналы, вероятность потери пакетов, вероятность столкновений, модель передачи, метод расчета трафика**

Технология LoRaWAN позволяет реализовать дешевый и достаточно качественный способ доставки данных с использованием беспроводного канала от конечных устройств (точек) получения

данных до шлюза (входного устройства) сервера сети провайдера. При этом могут быть использованы различные режимы работы конечных устройств и шлюза [1], [2], которые позволяют

выбрать различные скорости передачи и режимы источников питания этих устройств в зависимости от требований конкретных приложений. Существующие спецификации LoRaWAN [3] для различных стран регламентируют использование различных диапазонов частот и различных наборов радиочастотных каналов в рамках этих диапазонов. Все спецификации предусматривают некоторое количество непересекающихся радиочастотных каналов, которые могут быть использованы для восходящих и нисходящих соединений (uplink and downlink channels) передачи информации. Наличие независимых каналов позволяет реализовать различные механизмы обслуживания трафика данных. Например, может быть реализована передача данных с использованием скачков по частоте (frequency hopping) или одновременную работу соседних станций на различных каналах, что позволяет повысить качество связи и пропускную способность системы управления распределенными по большой площади объектами.

Можно сказать, что доступные радиочастотные каналы представляют собой ресурс, который может быть использован таким способом, который наиболее предпочтителен при решении конкретной прикладной задачи обслуживания конечных устройств.

Предлагается подход к моделированию сети LoRaWAN с учетом наличия некоторого количества независимых радиочастотных каналов. В рамках рассматриваемого подхода предлагается модель сети и методы расчета ее параметров, обеспечивающие минимизацию потерь кадров при передаче информации по такой сети.

**Модель и постановка задачи.** Для большей общности не станем привязываться к конкретной спецификации LoRaWAN, а будем полагать, что имеется определенное количество радиочастотных каналов  $1, 2, \dots, N$ , обеспечивающих  $n$  соединений с соответствующим трафиком  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$  (от каждого оконечного узла из имеющихся  $N$  узлов к шлюзу). В этом случае структура сети (рис. 1) может быть представлена в виде звезды, в центре которой находится шлюз (Ш). При этом зона связи шлюза соответствует диску радиусом  $R$ . Узел сети  $1, 2, \dots, i, \dots, N$ , находящийся в любой точке такого диска, может передавать данные  $a_i$  в шлюз Ш или принимать их от шлюза.

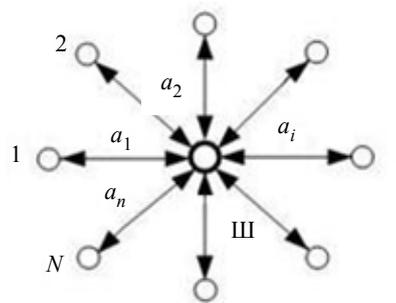


Рис. 1

Полагаем, что все узлы сети, количество которых равно  $N$ , находятся в зоне связи одного шлюза. Также полагаем, что каждый из узлов сети  $i = 1, 2, \dots, N$  имеет в своем составе один трансивер, т. е. может одновременно либо передавать, либо принимать данные только на одном радиочастотном канале. Считаем, что шлюз в своем составе имеет несколько трансиверов, что позволяет ему вести одновременную передачу или прием на любом из доступных радиочастотных каналов. Будем полагать, что при этом возможны одновременный прием или одновременная передача на различных частотных каналах, но не одновременные прием и передача в одном канале. Иначе говоря, шлюз может либо только принимать одновременно по всем каналам, либо одновременно по всем каналам передавать данные.

Каждый из узлов сети производит трафик с интенсивностью  $a_i$  сообщений в единицу времени, а все узлы сети суммарно производят поток трафика интенсивностью  $A$  сообщений в единицу времени. Одновременная передача сообщений двумя и более узлами в одном радиочастотном канале приводит к коллизии, в результате которой может произойти потеря кадра. Отметим, что вероятность потери кадра в случае коллизии меньше единицы как из-за различных условий приема сигналов от различных узлов, так и из-за возможностей методов передачи и приема, используемых технологией LoRa. Вычисление этой вероятности выходит за рамки данного материала. Здесь же будем рассматривать оценку вероятности потери кадра сверху, т. е. будем считать, что кадр теряется в любом случае при возникновении коллизии.

Наряду с вероятностью коллизий на вероятность доставки сообщения также влияет вероятность ошибок в кадре  $p_E$ . Эта вероятность зависит от метода передачи и условий распространения сигнала и в общем случае может быть различна для различных частотных каналов.

Отметим также, что если используется режим передачи с квитированием, то все кадры, передача которых началась во время передачи шлюзом подтверждающего сообщения, будут потеряны.

В этих случаях общая вероятность потери сообщения  $p_m$  может быть определена как

$$p_m = 1 - (1 - p_C)(1 - p_R)(1 - p_E), \quad (1)$$

где  $p_C, p_R$  – вероятности коллизии и потери сообщения соответственно.

Вероятность коллизий в канале будет определяться как

$$p_C = p_{\geq 1}(2\tau) = 1 - p_0(2\tau),$$

где  $p_0(2\tau)$  – вероятность того, что на интервале  $(2\tau)$  не начнется передача ни одного кадра.

При допущении о модели простейшего потока вероятность коллизии будет описываться выражением

$$p_C = 1 - e^{-a2\tau}, \quad (2)$$

где  $a$  – интенсивность потока (кадр/с).

Полагаем, что сообщение подтверждения передается шлюзом сразу после окончания приема и его длительность равна  $t_R$ . Вероятность потери  $p_R$  сообщения в таком случае будет равна

$$p_R = 1 - e^{-at_R}. \quad (3)$$

Тогда общая вероятность потери сообщения (1) с учетом (2) и (3) будет определяться как

$$p_m = 1 - (1 - p_C)(1 - p_R)(1 - p_E) = 1 - (1 - p_E)e^{-a(2\tau + t_R)}. \quad (4)$$

В данном случае  $a$  – интенсивность сообщений в одном рассматриваемом канале.

Различные частотные каналы могут обеспечивать не одинаковые условия передачи в каждом конкретном случае. Например, из-за помех от посторонних радиопередатчиков, промышленных помех, преград распространению сигнала, взаимного влияния между различными сетями, построенными с использованием одной технологии, и иных факторов. Фактически это означает, что

$$p_E^{(i)} \neq p_E^{(j)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j.$$

Зависимость вероятности потери пакета, определяемая согласно (4) приведена на рис. 2 для различных значений  $p_E$  и  $t_R$  ( $p_m$  – вероятность потери пакета,  $k$  – доля трафика).

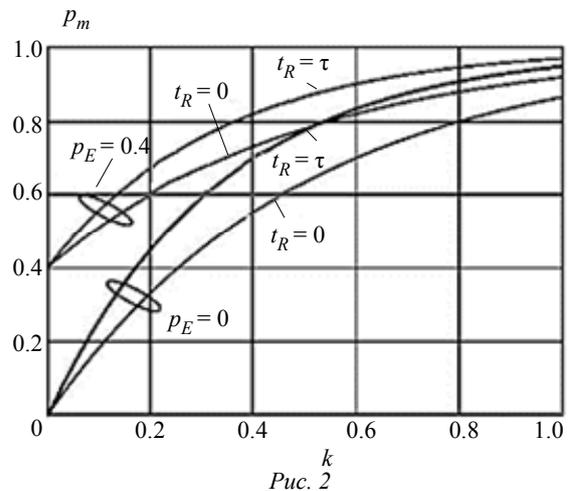
Из рис. 2 видно, что оба параметра существенно влияют на вероятность передачи кадра. В связи с этим  $p_m$  также будет различна для различных каналов:

$$p_m^{(i)} \neq p_m^{(j)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j.$$

Для обеспечения наиболее эффективного использования радиочастотного спектра (каналов) требуется определенное управление радиочастотным ресурсом, которое обеспечит наибольшее качество обслуживания трафика всех узлов сети. Это позволяет достичь максимальной эффективности при перераспределении трафика, проводимого узлами сети по доступным каналам связи с учетом их качества.

**Методы распределения радиочастотных каналов.** Задачу распределения каналов в условиях, описанных ранее, можно сформулировать следующим образом. Требуется найти такое отображение множества узлов сети  $N$  на множество каналов  $C$ , при котором выполняется некоторый критерий  $O$ :

$$f : N \rightarrow C, \quad O = \text{true}.$$



В данном случае  $f$  – некоторый способ (функция), позволяющий выбрать радиочастотные каналы для обслуживания трафика узлов сети. Критерий  $O$  – условие, которое определяет желаемое состояние сети.

Будем полагать, что цель задачи – минимизация потерь кадров, которые могут происходить, в общем случае, по трем причинам: из-за коллизий, из-за передачи данных узлом сети в момент, когда шлюз находится в состоянии передачи подтверждения, и по причине ошибок в канале. Тогда с учетом

(5) можно сформулировать задачу оптимизации как задачу минимизации количества потерянных кадров при постоянной интенсивности трафика и постоянном количестве каналов:

$$\{k_i\} = \arg \min_{k_i} \left\{ \sum_{i=1}^N k_i A p_m^{(i)}(k_i) \right\},$$

$$i = 1 \dots N, \quad 0 \leq k_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^N k_i = 1.$$

$$A = \sum_{i=1}^n a_i,$$

где  $N$  – количество радиочастотных каналов;  $k_i = a_i/A$  – доля трафика, обслуживаемого  $i$ -м каналом;  $A$  – общий объем трафика, проводимого узлами сети.

Нужно найти такие значения  $k_i, i = 1, \dots, N$ , при которых достигается минимальное значение количества потерянных (в единицу времени) кадров.

Целевая функция с учетом сказанного может быть записана как

$$\{k_i\} = \arg \min_{k_i} \sum_{i=1}^N k_i A \left[ 1 - \left( 1 - p_E^{(i)} \right) e^{-k_i A (2\tau + t_R)} \right],$$

$$i = 1 \dots N, \quad 0 \leq k_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^N k_i = 1. \quad (5)$$

Выражение (5) не имеет аналитического решения, но может быть получено численными методами.

В качестве примера зададим следующие параметры:  $a_i = a = 1, i = 1, \dots, n, n = 100, N = 1, p_E^{(1)} = 0.1, p_E^{(2)} = 0.5$ , а также будем полагать, что  $t_R = \tau$ .

В этом случае решение можно получить методом сопряженных градиентов с использованием пакета MathCad. Точка, соответствующая решению задачи, находится в минимуме кривой, образуемой пересечением двух поверхностей. Для приведенных заданных значений это соответствует  $k_1 = 0.597, k_2 = 0.403$ .

Для практической реализации решения этой задачи, по нашему мнению, удобнее сделать ряд допущений и применять метод динамического программирования. Будем полагать, что все узлы сети производят трафик одинаковой интенсивности и что распределять по частотным каналам

можно только целое число потоков трафика. Тогда можно несколько модифицировать целевую функцию (5):

$$L = \sum_{i=1}^N \eta_i \left[ 1 - \left( 1 - p_E^{(i)} \right) e^{-\eta_i a (2\tau + t_R)} \right],$$

$$i = 1 \dots N, \quad \eta_i \in [0 \dots n], \quad \sum_{i=1}^N \eta_i = n,$$

где  $\eta_i$  – количество узлов сети (потоков трафика), обслуживаемых  $i$ -м каналом.

Параметры моделирования представлены в таблице.

Параметр	Описание
$N$	Максимальное количество каналов
$n$	Общее количество узлов
$L$	Значения целевой функции
$\eta$	Количество узлов сети, обслуживаемых одним каналом
Cnt	Счетчик количества узлов

В этом случае для решения поставленной задачи предлагается следующий алгоритм:

1. Ввод исходных данных, инициализация.

– количество каналов  $N = 2$ , общее количество узлов  $n = 100$ ;

– вероятность ошибок в каналах:  $p_E^{(1)} = 0.1$ ,

$p_E^{(2)} = 0.5$ ;

– время передачи и время подтверждения кадра устанавливается одинаковым;

–  $Cnt = n$  – счетчик количества узлов;

–  $c_1, c_2, \dots, c_N$  – узлы, обслуживаемые соответствующим каналом;

–  $L_1, L_2, \dots, L_N$  – значения целевой функции;

– начальное количество обслуживаемых узлов в  $i$ -м канале  $\eta_i = 0, i = 1 \dots N$ .

2. Увеличиваем количество узлов в каждом из каналов и для каждого из этих вариантов вычисляем значение целевой функции:

$$c_i = \eta_i + 1, \quad L_i = L(c_i), \quad i = 1 \dots N.$$

Находим  $i_{\min}$ , для которого значение целевой функции минимально:

$$i_{\min} = \min_i \{L_i\}, \quad i = 1 \dots N.$$

Увеличиваем на единицу количество обслуживаемых узлов для данного канала

$$\eta_{i_{\min}} = \eta_{i_{\min}} + 1.$$

Уменьшаем счетчик узлов:

$$\text{Cnt} = \text{Cnt} - 1.$$

3. Если  $\text{Cnt} = 0$ , то найденные значения  $\eta_i$ ,  $i = 1 \dots N$  являются решением задачи. Конец.

Иначе, если  $\text{Cnt} > 0$ , то перейти к п. 2.

При решении приведенного примера, получаем значения  $\eta_1 = 60$ ,  $\eta_2 = 40$ .

Приведенная задача решалась для известных значений  $p_E^{(1)}$ ,  $i = 1 \dots N = 2$ . На практике эти значения могут быть неизвестны или могут изменяться во время эксплуатации сети, поэтому целесообразно организовать оценку данных значений в шлюзе.

Одним из методов такой оценки может быть сбор статистики о принятых и переданных кадрах и вычисление на ее основе соответствующих значений. Если за некоторый интервал времени  $T$  в канале  $i$  было передано  $K_i$  кадров, а принято только  $r_i$  кадров, то оценка вероятности потерь кадров  $p_E^{(1)}$  может быть оценена следующим образом:

$$\hat{p}_E^{(i)} = \frac{r_i}{K_i}.$$

Тогда с учетом (4) можно записать, что

$$p_E^{(i)} = 1 - \frac{1 - \hat{p}_m}{e^{-A_i(2\tau + t_R)}}, a_i = \frac{K_i}{T}.$$

Описанная процедура измерений может быть организована в шлюзе.

Разные условия распространения сигнала в разных радиочастотных каналах приводят к различной вероятности потерь сообщений в этих каналах. На потери также влияет вероятность коллизий, которая зависит от интенсивности трафика в канале. При неодинаковых свойствах каналов существует такое распределение трафика по ним, которое обеспечивает минимум потерянных кадров, т. е. оптимальное распределение.

Показано, что при неодинаковых свойствах каналов на этапе проектирования сетей и в процессе их эксплуатации можно обеспечить такое распределение трафика по каналам, которое обеспечит минимум потерянных кадров, т. е. оптимальное распределение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. On the coverage of lpwans: Range evaluation and channel attenuation model for lora technology / J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, M. Pettissalo // Proc. of the 2015 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on ITS Telecommunications (ITST). Copenhagen, Denmark, 2015. P. 55-59.

2. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. On the limits of LoRaWAN channel access // Engineering and Telecommunication, Intern. Conf. IEEE, 2016. P. 10-14.

3. Alliance L. LoRaWAN Specification v1.1. Fremont, CA, USA, 2017. URL: <https://loro-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11> (дата обращения 12.03.2020).

Yu. T. Lyachek, M. C. A. Muthanna  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## TRAFFIC DISTRIBUTION IN LORAWAN

*The Internet of Things (IoT) allows you to connect, measure, control millions of devices. IoTs require cost-effective, long-range and energy-efficient sensors and performance images. The paper considers LoRaWAN technology, one of the low-power wide area network (LPWAN) technologies, which in recent years has received close attention of the research community. LoRaWAN provides low power consumption and low data transfer rates. Using the LoRaWAN protocol in IoT systems allows you to optimize power consumption, capacity, cost and coverage of the system. The article investigates the problem of traffic distribution over radio frequency channels and offers an approach to modeling the LoRaWAN network based on the presence of several independent radio frequency channels. Within the framework of this approach, a model and method for calculating the LoRaWAN network are proposed. In particular, the solution method is described using the dynamic programming approach. A method for solving the problem of optimal traffic distribution is proposed. Numerical results show the effectiveness of the proposed approach, in which the throughput of LoRa technology is used to the maximum. In some cases, it is proposed to transmit over the network only those portions of the image that change in time.*

**LoRaWAN, radio-frequency channels, packet loss probability, probability of collisions, transmission model, traffic calculation method**