



УДК 621.396.9

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В БЕСПРОВОДНОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СЕТИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ****MATHEMATICAL MODELING OF INFORMATION FLOWS TRANSMISSION IN MOBILE AD-HOC NETWORK FOR SPECIAL PURPOSE****И.С. Константинов, С.А. Лазарев, К.А. Польщикова  
I.S. Konstantinov, S.A. Lazarev, K.A. Polshchikova***Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85  
Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia**e-mail: polshchikova@bsu.edu.ru*

*Аннотация.* В статье предложена математическая модель передачи информационных потоков в беспроводной самоорганизующейся сети специального назначения. Подобная сеть может быть применена для обеспечения информационного обмена при решении специфических задач, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Детально представлена модель формирования пакетов данных. В модели учтено влияние мобильности узлов и внешних деструктивных воздействий. Текущие состояния моделируемого процесса представлены с помощью идентификаторов пакетов и квитанций, связанных с передачей информационных потоков по каналам заданного контура. На основе применения разработанной модели можно получить количественные данные о значениях величин, характеризующих эффективность доставки данных в исследуемой сети.

*Resume.* In the article a mathematical model of the information transmission flow in a mobile ad-hoc network for special purpose is presented. This network can be used for exchange of information in solving specific problems related to the liquidation of natural or man-made emergencies. Detail a model form of data packets. The models take into account the impact of mobile units and external destructive influences. The current state of the simulated process are represented by a packets and receipts identifiers associated with the transfer of information flows through the channels given circuit. On the basis of application of the developed model can obtain quantitative data on the values of the quantities characterizing the efficiency of data delivery in the test network.

*Ключевые слова:* беспроводная самоорганизующаяся сеть специального назначения, математическая модель, передача информационных потоков, пакеты данных.

*Keywords:* mobile ad-hoc network for special purpose, mathematical model, information flows transmission, data packets.

**Введение**

Для обеспечения связи в условиях интенсивных деструктивных внешних воздействий, характерных, например, для чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера или военных действий, востребованы телекоммуникационные сети, обладающие быстрым развертыванием, высокой живучестью, способностью доставлять информацию при динамически изменяющейся топологии (случайных процессах перемещения, уничтожения, добавления, включения и выключения узлов) [1–3]. Указанными возможностями обладают беспроводные самоорганизующиеся сети (Mobile Ad-Hoc Networks, MANET) [4, 5]. Главная отличительная особенность таких сетей состоит в их децентрализованной изменяемой структуре. Поэтому их именуют «спонтанными», «эпизодическими» сетями, узлы которых соединяются произвольно, хаотично, «на лету» [6]. Основными особенностями построения MANET являются:

- 1) реализация децентрализованного управления компонентами сети;
- 2) отсутствие базовых станций (фиксированных узлов);
- 3) способность каждого узла выполнять функции маршрутизатора.

Благодаря указанным преимуществам технология MANET имеет хорошие перспективы применения для построения беспроводной самоорганизующейся сети специального назначения (БСССН) – телекоммуникационной сети, функционирующей с целью обеспечения информационного обмена при выполнении специфических задач, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, военными действиями и т.п. [2, 7].

Передаваемые в исследуемой сети информационные потоки можно условно разделить на два основных вида: трафик реального времени (речь, видео) и потоки данных (управляющие команды и сигналы, сведения об измерениях и наблюдениях, текстовые сообщения, топографические изображения, другая графическая и табличная информация) [2]. Влияние мобильности узлов делает трафик более нестационарным, непредсказуемым, приводит к тому, что в каждом отдельно взятом канале сети наблюдается быстрое изменение интенсивности передаваемых потоков и, соответственно, пропускной способности, доступной для передачи данных. Вследствие воздействия деструктивных фак-



торов БСССН в большей степени, чем другие сети, подвержена канальным перегрузкам, потерям пакетов, разрывам соединений. В таких условиях существенно снижается эффективность доставки информации в сети [8–10]. Необходимость получения технологических решений, обеспечивающих приемлемые характеристики передачи данных в БСССН, требует выполнения соответствующих научных исследований. Для проведения корректных исследований в области функционирования различных автоматизированных информационных систем успешно применяется моделирование [11–14]. В связи с этим разработка математической модели циркулирующих в БСССН информационных потоков представляется актуальной научно-технической задачей, результаты решения которой будут востребованы в процессе создания новых технологий, ориентированных на повышение эффективности доставки данных в исследуемой сети.

### Постановка задачи

Пусть узлом-отправителем осуществляется передача потока данных, адресованного узлу-получателю. Этот поток данных в [2] именуется управляемым потоком (controlled flow, CF). Для передачи пакетов указанного потока (CF-пакетов) заранее выбран маршрут – последовательность каналов, ведущая от узла-отправителя к узлу-получателю. Будем считать, что в этот маршрут входят каналы с номерами от 1 до  $(N-1)$ . Для передачи подтверждений успешной доставки CF-пакетов, т. е. CF-квитанций, определен маршрут, являющийся последовательностью каналов, проходящих от узла-получателя к узлу-отправителю. Данный маршрут включает каналы с номерами от  $N$  до  $(N+M)$ . Совокупность двух указанных выше маршрутов, используемых для передачи CF-пакетов и CF-квитанций, является CF-контуром [2].

Кроме передачи управляемого потока, каналы CF-контура могут быть использованы для передачи других (конкурирующих) потоков реального времени и потоков данных. Потоки данных и реального времени, которые передавались бы по тем или иным каналам CF-контура, если бы сеть имела фиксированную топологию, назовем основными потоками. Каждый основной поток реального времени имеет порядковый номер  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ), а каждый основной поток данных имеет порядковый номер  $g$  ( $g = 1, 2, \dots, G$ ). Задана величина  $\bar{r}_{base}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов основных потоков реального времени для передачи по каналу CF-контура, а также известна величина  $\bar{d}_{base}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов основных потоков данных для передачи по каналу CF-контура. Кроме того, заданы матрицы  $[a_{ki}^{real}]$  и  $[a_{ki}^{data}]$ , предписывающие передачу основных потоков реального времени и данных по каналам CF-контура. Элементы этих матриц могут принимать следующие значения:  $a_{ki}^{real} = 1$ , если канал номер  $k$  требуется для передачи основного потока реального времени номер  $l$ ;  $a_{ki}^{real} = 0$ , если канал номер  $k$  не требуется для передачи основного потока реального времени номер  $l$ ;  $a_{kg}^{data} = 1$ , если канал номер  $k$  требуется для передачи основного потока реального времени номер  $g$ ;  $a_{kg}^{data} = 0$ , если канал номер  $k$  не требуется для передачи основного потока реального времени номер  $g$ . Из-за динамичной топологии тот или иной основной поток в БСССН может не передаваться по каналам CF-контура, даже если соответствующие элементы матриц  $[a_{ki}^{real}]$  и  $[a_{ki}^{data}]$  равны 1. Известны следующие величины:  $P_{base}^{real}$  – вероятность передачи основного потока реального времени по каналам CF-контура в условиях динамичной топологии,  $P_{base}^{data}$  – вероятность передачи основного потока данных по каналам CF-контура в условиях динамичной топологии.

Вследствие динамичности топологии БСССН по каналам CF-контура, кроме основных потоков, могут передаваться дополнительные потоки данных и реального времени. Возможность передачи дополнительных потоков по каналам CF-контура в условиях фиксированной топологии была бы исключена. Каждый дополнительный поток реального времени имеет порядковый номер  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ), каждому дополнительному потоку данных присвоен порядковый номер  $h$  ( $h = 1, 2, \dots, H$ ). Задана величина  $\bar{r}_{add}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов дополнительных потоков реального времени для передачи по каналу CF-контура, а также известна величина  $\bar{d}_{add}^{start}$  – среднее время между моментами начала поступления пакетов дополнительных потоков данных для передачи по каналу CF-контура. Заданы матрицы  $[b_{kj}^{real}]$  и  $[b_{kh}^{data}]$ , предписывающие поступление дополнительных потоков реального времени и данных для передачи по каналу CF-контура. Элементы этих матриц могут принимать следующие значения:  $b_{kj}^{real} = 1$ , если канал номер  $k$  востребован для передачи дополнительного потока реального времени номер  $j$ ;  $b_{kj}^{real} = 0$ , если канал номер  $k$  не востребован



для передачи дополнительного потока реального времени номер  $j$ ;  $b_{jh}^{data} = 1$ , если канал номер  $k$  востребован для передачи дополнительного потока реального времени номер  $h$ ;  $b_{jh}^{data} = 0$ , если канал номер  $k$  не востребован для передачи дополнительного потока реального времени номер  $h$ .

По причине возможных перемещений, уничтожений, добавлений, включений и выключений узлов передача тех или иных основных и дополнительных потоков по каналу CF-контура может быть преждевременно прекращена. Известны следующие величины:  $\bar{r}^{p.cont}$  – среднее время между началом и преждевременным прекращением поступления пакетов потока реального времени для передачи по каналу CF-контура, и  $\bar{d}^{p.cont}$  – среднее время между началом и преждевременным прекращением поступления пакетов потока данных для передачи по каналу CF-контура.

Кроме того, заданы следующие величины:  $\bar{r}^{cont}$  – средняя длительность поступления пакетов потока реального времени для передачи по каналу CF-контура;  $\bar{d}^{cont}$  – средняя длительность поступления пакетов потока данных для передачи по каналу CF-контура;  $\tau^{CF}(t)$  – текущий интервал времени между моментами формирования CF-пакетов для отправки по каналу 1;  $\xi_i(t)$  – текущий тайм-аут повторной передачи, установленный при отправке по каналу 1 CF-пакета номер  $i$ ;  $L_i$  – битовая длина CF-пакета номер  $i$ ;  $L^p$  – средняя битовая длина пакета данных (пакета реального времени);  $c_k$  – пропускная способность канала  $k$ ;  $p_k$  – вероятность возникновения битовой ошибки в канале  $k$ ;  $Q$  – максимальное количество пакетов, которые могут быть буферизованы для ожидания передачи по каналу сети;  $\lambda_l^{r.base}$  – интенсивность поступления пакетов основного потока реального времени номер  $l$  для передачи по каналу сети;  $\lambda_j^{r.add}$  – интенсивность поступления пакетов дополнительного потока реального времени номер  $j$  для передачи по каналу сети;  $\lambda_g^{d.base}$  – интенсивность поступления пакетов основного потока данных номер  $g$  для передачи по каналу сети;  $\lambda_h^{d.add}$  – интенсивность поступления пакетов дополнительного потока данных номер  $h$  для передачи по каналу сети.

Известно, что пакеты реального времени требуется передавать с минимальными задержками, поэтому эти пакеты по каналам CF-контура должны отправляться в первую очередь.

Используя представленные выше исходные данные, требуется разработать математическую модель передачи потоков информации по каналам CF-контура, на основе применения которой можно было бы определить значения следующих величин:  $W(t)$  – текущей длительности ожидания CF-квитанции узлом-отправителем;  $Z$  – количества избыточных повторных передач CF-пакетов;  $I_k^v(t)$  – количества CF-пакетов и других пакетов данных, поступивших для передачи по каналу  $k$  в течение последних  $v$  тактов;  $\rho_k^v(t)$  – количества CF-пакетов, претендовавших на передачу по каналу  $k$  и отброшенных в течение последних  $v$  тактов;  $\gamma_k(t)$  – текущей задержки CF-пакетов в очереди канала  $k$ ;  $q_k(t)$  – текущего количества CF-пакетов и других пакетов данных в очереди канала  $k$ ;  $E(t)$  – текущей пропускной способности CF-контура, доступной для передачи CF-потока;  $T^{CF}$  – длительности передачи CF-потока.

### Декомпозиция задачи

Сложность сформулированной выше задачи обуславливает необходимость ее декомпозиции. Передача информационных потоков по каналам CF-контура включает следующие процессы:

- 1) формирование CF-пакетов в узле-отправителе;
- 2) формирование CF-квитанций в узле-получателе;
- 3) поступление пакетов реального времени для передачи по каналам CF-контура;
- 4) поступление пакетов данных для передачи по каналам CF-контура;
- 5) поступление CF-пакетов (CF-квитанций) для передачи по каналам CF-контура;
- 6) передачу пакетов реального времени, пакетов данных и CF-пакетов (CF-квитанций) по каналам CF-контура;
- 7) буферизацию пакетов реального времени, поступивших для передачи по каналам CF-контура;
- 8) буферизацию пакетов данных и CF-пакетов (CF-квитанций), поступивших для передачи по каналам CF-контура;
- 9) отбрасывание пакетов реального времени, пакетов данных и CF-пакетов (CF-квитанций), претендовавших на передачу по каналам CF-контура;
- 10) прием CF-пакетов узлом-получателем и CF-квитанций узлом-отправителем.



Текущие состояния указанных процессов можно представить с помощью идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей информационных потоков по каналам CF-контура. Идентификаторы пакетов могут принимать значения  $i$ ,  $\beta$  или 0. В качестве идентификаторов CF-пакетов будем использовать числа  $i = 1, 2, \dots, I$  – порядковые номера этих пакетов в рамках моделируемого CF-потока. Идентификаторы CF-квитанций должны при этом совпадать с номерами соответствующих CF-пакетов. Кроме того, будем считать, что идентификаторы других пакетов данных и реального времени равны числу  $0 < \beta < 1$ . В таком случае есть возможность моделировать перемещение каждого CF-пакета или каждой CF-квитанций и отличать их от других пакетов, конкурирующих с ними за передачу по каналам CF-контура. Значение идентификатора пакета, равное 0, указывает на то, что в текущем такте отсутствует пакет, связанный с моделируемым состоянием соответствующего процесса.

Схемы идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей информационных потоков по каналам 1,  $k$  и  $N$ , изображены соответственно на рис. 1–3.

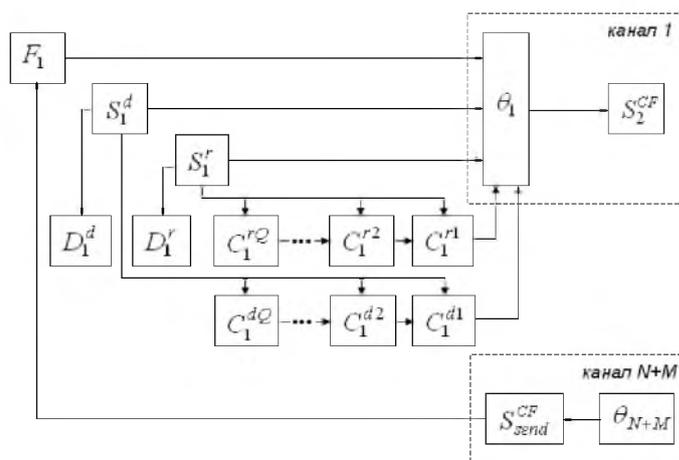


Рис. 1. Схема идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей по каналу 1  
Fig. 1. Scheme PIDs (receipts) associated with the transmission channel 1

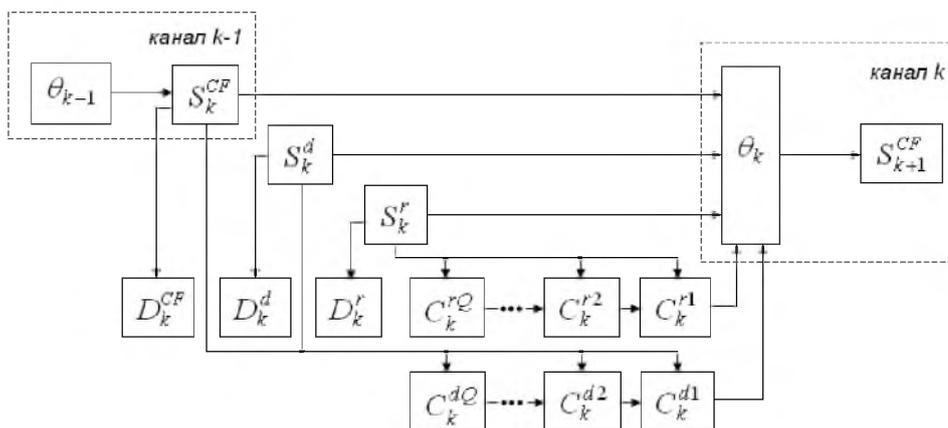


Рис. 2. Схема идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей по каналу  $k$   
Fig. 2. Scheme PIDs (receipts) associated with the transmission channel  $k$

На представленных выше схемах использованы следующие обозначения:  $F_1$  – номера CF-пакетов, сформированных в узле-отправителе для передачи по каналу 1;  $F_N$  – номера CF-квитанций, сформированных в узле-получателе для передачи по каналу  $N$ ;  $S_k^{CF}$  – номера CF-пакетов (CF-квитанций), поступивших для передачи по каналу  $k$ ;  $S_k^d$  – идентификаторы пакетов данных, поступивших для передачи по каналу  $k$ ;  $S_k^r$  – идентификаторы пакетов реального времени, поступивших для передачи по каналу  $k$ ;  $\theta_k$  – идентификаторы пакетов (квитанций), передаваемых по каналу  $k$ ;  $C_k^{rQ}$  – идентификаторы пакетов реального времени, буферизованных в ячейках  $q$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ ) для

передачи по каналу  $k$ ;  $C_k^{dq}$  – идентификаторы пакетов данных, буферизованных в ячейках  $q$  для передачи по каналу  $k$ ;  $D_k^{CF}$  – номера отброшенных CF-пакетов (CF-квитанций) из числа претендовавших на передачу по каналу  $k$ ;  $D_k^d$  – идентификаторы отброшенных пакетов данных из числа претендовавших на передачу по каналу  $k$ ;  $D_k^r$  – идентификаторы отброшенных пакетов реального времени, из числа претендовавших на передачу по каналу  $k$ ;  $S_{rec}^{CF}$  – номера CF-пакетов, принятых узлом-получателем;  $S_{send}^{CF}$  – номера CF-квитанций, принятых узлом-отправителем.

Стрелками на рис. 1–3 указаны непосредственные связи между значениями идентификаторов тех или иных пакетов (квитанций). Например, стрелки на рис. 3, исходящие из элемента  $S_N^d$ , указывают на то, что пакет данных, поступивший для передачи по каналу  $N$ , в следующем такте моделирования в зависимости от сложившейся ситуации может, во-первых, передаваться по этому каналу, во-вторых, занять свободную ячейку в буфере ожидания, и, в-третьих, может быть отброшен.

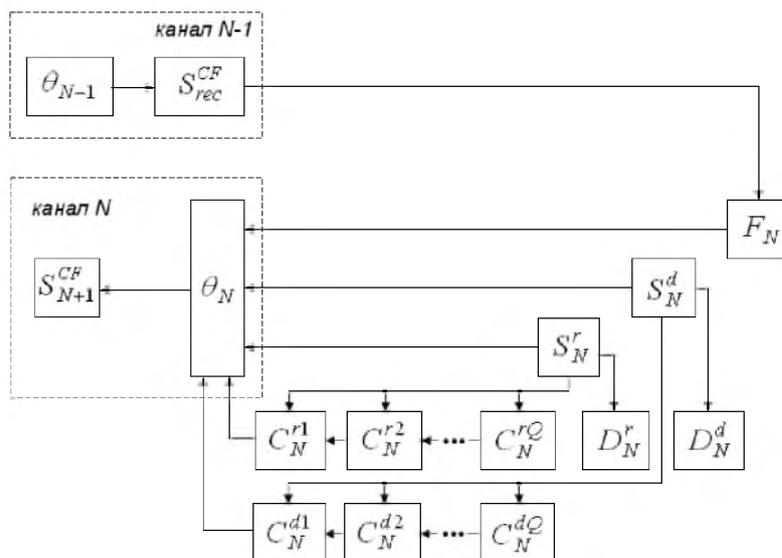


Рис. 3. Схема идентификаторов пакетов (квитанций), связанных с передачей по каналу  $N$   
Fig. 3. Scheme PIDs (receipts) associated with the transmission channel  $N$

Таким образом, задача, состоящая в разработке математической модели передачи информационных потоков по каналам CF-контура, сводится к созданию следующих частных моделей:

- 1) модели формирования CF-пакетов;
- 2) модели поступления пакетов реального времени для передачи по каналам CF-контура;
- 3) модели поступления пакетов данных для передачи по каналам CF-контура;
- 4) модели поступления CF-пакетов и CF-квитанций для передачи по каналам CF-контура;
- 5) моделей приема CF-квитанций узлом-отправителем и CF-пакетов узлом-получателем;
- 6) модели формирования CF-квитанций;
- 7) моделей передачи пакетов и квитанций по каналам CF-контура;
- 8) моделей буферизации пакетов и квитанций;
- 9) моделей отбрасывания пакетов и квитанций.

В качестве примера решения одной из частных задач ниже представлена модель формирования CF-пакетов.

### Модель формирования CF-пакетов

При определении номера CF-пакета, сформированного в текущем такте для отправки по каналу 1, требуется учитывать выполнение следующих условий:

- 1) если в текущем такте наступило время формирования CF-пакета для отправки по каналу 1, то его номер должен быть на единицу больше номера предыдущего сформированного CF-пакета;
- 2) если сформированный в предыдущем такте CF-пакет не мог быть отправлен по причине занятости канала, то это же CF-пакет должен быть готов к отправке и в текущем такте;

В случае невыполнения указанных выше условий в текущем такте не требуется наличие готового к отправке CF-пакета.



В соответствии с изложенными выше рассуждениями номер CF-пакета, сформированного в текущем такте для передачи по каналу 1, вычисляется по формуле:

$$F_1(t) = \begin{cases} F^{last}(t-1) + 1, & \mathcal{G}^{CF}(t-1) + \tau^{CF}(t-1) = t; \\ F_1(t-1), & \mathcal{G}^{CF}(t-1) + \tau^{CF}(t-1) \neq t \text{ и } \theta_1(t-1) > 0; \\ 0, & \mathcal{G}^{CF}(t-1) + \tau^{CF}(t-1) \neq t \text{ и } \theta_1(t-1) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $F^{last}(t)$  – номер предыдущего CF-пакета, сформированного для отправки по каналу 1;

$\mathcal{G}^{CF}(t)$  – момент формирования предыдущего CF-пакета для передачи по каналу 1;

Величина  $F^{last}(t)$  должна быть на единицу меньше номера CF-пакета, который требуется передать повторно. Если в текущем такте не требуется повторная передача CF-пакета, то значение  $F^{last}(t)$  будет зависеть от того, был ли сформирован CF-пакет в предыдущем такте. При выполнении указанного условия значение  $F^{last}(t)$  становится равным номеру CF-пакета, сформированного в предыдущем такте. В противном случае значение величины  $F^{last}(t)$  сохраняется таким же, как и в предыдущем такте.

С учетом приведенных выше рассуждений выражение для определения величины  $F^{last}(t)$  имеет следующий вид:

$$F^{last}(t) = \begin{cases} i-1, & \exists i: \omega_i(t-1) + \xi_i(t-1) = t; \\ F_1(t-1), & \forall i: \omega_i(t-1) + \xi_i(t-1) \neq t \text{ и } F_1(t-1) > 0; \\ F^{last}(t-1), & \forall i: \omega_i(t-1) + \xi_i(t-1) \neq t \text{ и } F_1(t-1) = 0; \end{cases} \quad (2)$$

где  $\omega_i(t)$  – момент формирования CF-пакета номер  $i$  для отправки по каналу 1.

Величина  $\mathcal{G}^{CF}(t)$  находится по формуле:

$$\mathcal{G}^{CF}(t) = \begin{cases} t-1, & F_1(t-1) > 0; \\ \mathcal{G}^{CF}(t-1), & F_1(t-1) = 0; \end{cases} \quad (3)$$

При определении величины  $\omega_i(t)$  следует учитывать выполнение приведенных ниже условий. Если в предыдущем такте отправитель получил квитанцию на CF-пакет номер  $i$ , то величина  $\omega_i(t)$  принимает такое большое значение, при котором в течение времени моделирования  $0 < t < T_{\max}$  становится невозможным выполнение равенства  $\omega_i(t-1) + \xi_i(t-1) = t$ , т.е. в дальнейшем исключается срабатывание таймера повторной передачи на CF-пакет номер  $i$ . Таким же большим должны быть значения  $\omega_i(t)$  для каждого  $i$  в начальный момент времени  $t = 0$ , чтобы исключить срабатывание таймера повторной передачи на те CF-пакеты, которые не были отправлены. Если CF-пакет был сформирован для отправки по каналу 1 в предыдущем такте, то  $\omega_i(t) = t-1$ . В противном случае значение величины  $\omega_i(t)$  остается таким же, как и в предыдущем такте.

На основе изложенных выше рассуждений для получения значения момента формирования CF-пакета номер  $i$  для отправки по каналу 1 можно использовать следующее выражение:

$$\omega_i(t) = \begin{cases} T_{\max}, & S_1^{CF}(t-1) = i; \\ t-1, & S_1^{CF}(t-1) \neq i \text{ и } F_1(t-1) = i; \\ \omega_i(t-1), & S_1^{CF}(t-1) \neq i \text{ и } F_1(t-1) \neq i. \end{cases} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что формулы (1)–(4) корректны на интервале моделирования  $0 < t < T_{\max}$  при следующих начальных условиях:  $F_1(0) = 1$ ,  $F^{last}(0) = 1$ ,  $\theta_1(0) = 0$ ,  $\mathcal{G}^{CF}(0) = 0$ ,  $S_1^{CF}(0) = 0$ ,  $\omega_i(0) = 0$  и  $\forall i > 1: \omega_i(0) = T_{\max}$ .

Разработанная модель формирования CF-пакетов и другие вышеуказанные частные модели могут быть использованы для расчета характеристик передачи информационных потоков в БСССН, осуществляемого с помощью представленных ниже выражений.

### Расчет характеристик передачи информационных потоков

Значение текущей длительности ожидания CF-квитанции узлом-отправителем можно определить с помощью выражения:

$$W(t) = \begin{cases} t - \varepsilon_1^i(t-1), & S_1^{CF}(t-1) = i \text{ и } r_i(t-1) = 0; \\ W(t-1), & S_1^{CF}(t-1) = 0 \text{ или } [S_1^{CF}(t-1) = i \text{ и } r_i(t-1) = 1], \end{cases}$$



где  $r_i(t-1)$  – величина, которая показывает, осуществлялась ли повторная передача CF-пакета номер  $i$  до такта  $(t-1)$ . Выполнение равенства  $r_i(t) = 0$  свидетельствует о том, что до текущего такта повторной передачи CF-пакета номер  $i$  не было.

Значение  $r_i(t)$  можно вычислить по формуле:

$$r_i(t) = \begin{cases} 1, & \varepsilon_i^i(t-1) + \xi_i(t-1) = t; \\ r_i(t-1), & \varepsilon_i^i(t-1) + \xi_i(t-1) \neq t. \end{cases}$$

В начальный момент времени  $r_i(0) = 0$ .

Для определения количества избыточных повторных передач, выполненных в процессе доставки CF-сообщения, можно применить следующее выражение:

$$Z = \sum_{i=1}^k Z_i(T_{\max}) - i_{\max},$$

где  $Z_i(T_{\max})$  – количество пакетов номер  $i$ , отправленных источником в течение всего времени моделирования  $T_{\max}$ .

Величину  $Z_i(T_{\max})$  можно вычислить по формуле:

$$Z_i(T_{\max}) = \sum_{t=0}^{T_{\max}} Z_i(t),$$

где  $Z_i(t)$  – количество пакетов номер  $i$ , отправленных источником на момент такта  $t$ .

Для определения величины  $Z_i(t)$  следует использовать выражение:

$$Z_i(t) = \begin{cases} Z_i(t-1) + 1, & S_1^{CF}(t-1) = i; \\ Z_i(t-1), & S_1^{CF}(t-1) \neq i. \end{cases}$$

В начальный момент  $Z_i(0) = 0$ .

Вычислить количество CF-пакетов и пакетов данных, поступивших в течение последних  $\nu$  тактов для передачи по каналу  $k$ , можно с помощью выражения:

$$I_k^\nu(t) = \sum_{x=1}^{\nu} I_k(t-x),$$

где  $I_k(t-x)$  – количество пакетов данных, поступивших в такте  $(t-x)$  для передачи по каналу  $k$ .

Для определения величины  $I_k(t-x)$  следует использовать выражение:

$$I_k(t-x) = \begin{cases} 2, & S_k^{CF}(t-x) > 0 \text{ и } S_k^d(t-x) > 0; \\ 1, & [S_k^{CF}(t-x) > 0 \text{ и } S_k^d(t-x) = 0] \text{ или } [S_k^{CF}(t-x) = 0 \text{ и } S_k^d(t-x) > 0]; \\ 0, & S_k^{CF}(t-x) = 0 \text{ и } S_k^d(t-x) = 0. \end{cases}$$

Текущее значение количества CF-пакетов, претендовавших на передачу по каналу  $k$  и отброшенных в течение последних  $\nu$  тактов, можно вычислить с помощью выражения:

$$\rho_k^\nu(t) = \sum_{x=1}^{\nu} \rho_k(t-x),$$

где  $\rho_k(t-x)$  – количество CF-пакетов, поступивших для передачи по каналу  $k$  и отброшенных в такте  $(t-x)$ .

Для определения величины  $\rho_k(t-x)$  следует использовать выражение:

$$\rho_k(t-x) = \begin{cases} 1, & D_k^{CF}(t-x) > 0; \\ 0, & D_k^{CF}(t-x) = 0. \end{cases}$$

Значение текущей задержки CF-пакетов в очереди канала  $k$  можно вычислить по формуле:

$$\gamma_k(t) = \begin{cases} A, & S_k^{CF}(t-2-A) = \theta_k(t-1) > \beta; \\ \gamma_k(t-1), & \theta_k(t-1) \leq \beta, \end{cases}$$

где  $A = 0, 1, \dots, A_{\max}$ . Значение  $A_{\max}$  соответствует максимальной задержке CF-пакетов в очереди канала  $k$ .

В начальный момент времени  $\gamma_k(0) = 0$ .

Текущее количество CF-пакетов и пакетов данных в очереди канала  $k$  может быть вычислено с помощью выражения:



$$q_k(t) = \begin{cases} 0, & C_k^{d1}(t-1) = 0; \\ B, & \exists B \in [1, Q-1]: C_k^{dB}(t-1) > 0 \text{ и } C_k^{d(B+1)}(t-1) = 0; \\ Q, & C_k^{dQ}(t-1) > 0. \end{cases}$$

Текущее значение пропускной способности CF-контура, доступной для передачи CF-потока можно определить по формуле:

$$E(t) = \min\{E_k(t)\},$$

где  $E_k(t)$  – текущее значение пропускной способности канала  $k$ , доступной для передачи CF-потока.

Для определения величины  $E_k(t)$  следует использовать выражение:

$$E_k(t) = \begin{cases} 0, & U_k(t) \geq c_k; \\ c_k - U_k(t), & U_k(t) < c_k. \end{cases}$$

Текущую длительность передачи CF-потока можно определить по формуле:

$$T^{CF}(t) = \begin{cases} t-1, & S_{send}^{CF}(t-1) > 0; \\ T^{CF}(t-1), & S_{send}^{CF}(t-1) = 0. \end{cases}$$

Величина  $T^{CF}$ , т.е. время передачи CF-потока, может быть найдена как значение длительности передачи этого потока в момент окончания моделирования (при  $t = T_{max}$ ).

### Заключение

Таким образом, разработана математическая модель передачи информационных потоков по каналам БСССН, в которой учтена специфика функционирования этой сети: мобильность узлов и влияние внешних деструктивных воздействий. Текущие состояния моделируемого процесса представлены с помощью идентификаторов пакетов и квитанций, связанных с передачей информационных потоков по каналам заданного контура. На основе применения разработанной модели можно получить количественные данные о значениях величин, характеризующих эффективность доставки данных в БСССН. Дальнейшие исследования следует посвятить созданию программных средств, позволяющих использовать полученные аналитические выражения для проведения соответствующих вычислительных экспериментов.

### Список литературы References

1. Романюк В. А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2001. – № 12. – С. 62–68.  
Romanjuk V.A. Mobil'nye radioseti – perspektivy besprovodnyh tehnologij // Seti i telekommunikacii. – 2001. – № 12. – С. 62–68.
2. Константинов И. С., Польщикова К. А., Лазарев С. А. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. – 2015. – № 13 (210). – Вып. 35(1). – С. 156–163.  
Konstantinov I. S., Pol'shnikov K. A., Lazarev S. A. Imitacionnaja model' peredachi informacionnyh potokov v mobil'noj radioseti special'nogo naznachenija // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Jekonomika. Informatika. – 2015. – № 13 (210). – Вып. 35(1). – С. 156–163.
3. Польщикова К. А. Проблемные вопросы доставки данных в мобильной радиосети специального назначения // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 26–29.  
Pol'shnikov K. A. Problemnye voprosy dostavki dannyh v mobil'noj radioseti special'nogo naznachenija // Jelektrosvjaz'. – 2015. – № 7. – С. 26–29.
4. Basagni S., Conti M., Giordano S., Stojmenovic I. Mobile Ad Hoc Networking. – IEEE Press, 2004. – 461 p.  
Basagni S., Conti M., Giordano S., Stojmenovic I. Mobile Ad Hoc Networking. – IEEE Press, 2004. – 461 p.
5. Осипов Е. А. Проблема реализации надежной передачи данных в самоорганизующихся и сенсорных сетях // Электросвязь. – 2006. – № 6. – С. 29–33.  
Osipov E. A. Problema realizacii nadezhnoj peredachi dannyh v samoorganizujushhishja i sensornyh setjah // Jelektrosvjaz'. – 2006. – № 6. – С. 29–33.
6. Нейман В. И. Развитие теории беспроводного доступа // Электросвязь. – 2011. – № 7. – С. 12–15.  
Nejman V. I. Razvitie teorii besprovodnogo dostupa // Jelektrosvjaz'. – 2011. – № 7. – С. 12–15.
7. Penders J., Alboul L, Witcowski U. et al. A robot swarm assisting a human fire-fighter // Advanced Robotics, vol. 25, issue 1-2, 2011, pp. 93-117.  
Penders J., Alboul L, Witcowski U. et al. A robot swarm assisting a human fire-fighter // Advanced Robotics, vol. 25, issue 1-2, 2011, pp. 93-117.
8. Польщикова К. А. Анализ применимости методов обеспечения QoS для повышения производительности мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. – 2015. – № 1 (198). – Вып. 33(1). – С. 148–157.



Pol'shnikov K. A. Analiz primenimosti metodov obespechenija QoS dlja povysheniya proizvoditel'nosti mobil'noj radioseti special'nogo naznachenija // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Jekonomika. Informatika. – 2015. – № 1 (198). – Вып. 33(1). – С. 148–157.

9. Polshchykov K. O. Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 23rd International Crimean Conference. – Sevastopol, 2013. – Pages 517–518.

Polshchykov K. O. Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 23rd International Crimean Conference. – Sevastopol, 2013. – Pages 517–518.

10. Польщикова К. А. Об управлении интенсивностью потоков данных в мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2014. – № 21 (192). – Вып. 32(1). – С. 196–201.

Pol'shnikov K. A. Ob upravlenii intensivnost'ju potokov dannyh v mobil'noj radioseti special'nogo naznachenija // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. – 2014. – № 21 (192). – Вып. 32(1). – С. 196–201.

11. Konstantinov I.S., Lazarev S.A., Chashchin Y.G. Simulation of the Software-Defined Network for a High-Performance Computing Cluster // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9. – Pages 704–706.

Konstantinov I.S., Lazarev S.A., Chashchin Y.G. Simulation of the Software-Defined Network for a High-Performance Computing Cluster // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9. – Pages 704–706.

12. Konstantinov I.S., Lazarev S.A., Ivashchuk O.A., Fedorov V.I. Research in the Field of Automated Environmental Safety Control for Industrial and Regional Clusters // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9. – Pages 16813–16820.

Konstantinov I.S., Lazarev S.A., Ivashchuk O.A., Fedorov V.I. Research in the Field of Automated Environmental Safety Control for Industrial and Regional Clusters // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9. – Pages 16813–16820.

13. Konstantinov I.S., Lazarev S.A., Ivashchuk O.A., Rubtsov K.A. Multifactor Model of Technological Hazards Prediction // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 4. – Pages 16795–16801.

Konstantinov I.S., Lazarev S.A., Ivashchuk O.A., Rubtsov K.A. Multifactor Model of Technological Hazards Prediction // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 4. – Pages 16795–16801.

14. Польщикова К. А. Оценка вероятностно-временных характеристик доставки данных в беспроводной самоорганизующейся сети // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2014. – № 7 (204). – Вып. 34(1). – С. 183–187.

Pol'shnikov K. A. Ocenka verojatnostno-vremennyh harakteristik dostavki dannyh v besprovodnoj samoorganizujushhejsja seti // Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. – 2014. – № 7 (204). – Вып. 34(1). – С. 183–187.

15. Польщикова К. А. Система прогнозирования загрузки маршрутизатора на основе нечеткой нейронной сети // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 9. – С. 55–60.

Pol'shnikov K. A. Sistema prognozirovanija zagruzki marshrutizatora na osnove nechetkoj nejronnoj seti // Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tehnologij. – 2015. – № 9. – С. 55–60.