

## Доставка оповещения о чрезвычайной ситуации в гетерогенной сети Wi-Fi HaLow<sup>1</sup>

А.И. Ляхов, И.А. Наседкин, Е.М. Хоров, Р.Р. Юсупов

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва*

Поступила в редколлегию 05.04.2019 г.

**Аннотация**—В последние годы происходит активное развитие концепции Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT). Наиболее простым и удобным способом обеспечения связью устройств Интернета вещей являются беспроводные сети. Одним из новых сценариев беспроводных сетей, появившимся в связи с развитием Интернета вещей, является гетерогенная сеть, в которой часть станций является пользовательскими устройствами и передаёт насыщенный трафик, а часть станций является сенсорами, осуществляющими мониторинг чрезвычайной ситуации и передающими разреженный трафик. В статье строится математическая модель, позволяющая найти распределение времени доставки оповещения о чрезвычайной ситуации при наличии конкуренции за доступ к каналу с пользовательскими устройствами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гетерогенные сети, Интернет вещей, Wi-Fi HaLow, оповещение о чрезвычайной ситуации.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается бурное развитие концепции Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT). Согласно данным Cisco [1], более 500 миллиардов устройств Интернета вещей будет работать по всей Земле к 2030 году. Концепция Интернета вещей подразумевает, что электронные устройства, используемые людьми в быту и на производстве, подключены к Интернету для обмена данными друг с другом и с внешними серверами. Это позволит предоставить людям доступ к новым сервисам, что приведёт к значительному улучшению качества повседневной жизни и увеличению производительности человеческого труда.

Беспроводные сети являются наиболее простым и удобным способом обеспечения связью устройств Интернета вещей. Сети, состоящие из устройств Интернета вещей, предъявляют к беспроводным технологиям иные требования, нежели сети, состоящие из таких устройств как смартфоны, планшеты и ноутбуки. К примеру, устройства Интернета вещей могут иметь ограниченную ёмкость источника питания и, соответственно, требовать применения технологий энергосбережения; трафик, генерируемый устройствами Интернета вещей, как правило, отличается от трафика, генерируемого ноутбуками, планшетами и смартфонами, а значит, для передачи такого трафика может потребоваться применение иных методов доступа к среде; сценарии Интернета вещей могут подразумевать размещение большого количества устройств Интернета вещей, а значит беспроводная сеть должна быть способна обслужить большое количество подключённых устройств. Для решения этих и других проблем создаются новые технологии беспроводной связи, такие как LoRaWAN или NB-IoT, а также адаптируются старые технологии, в частности, Wi-Fi, ZigBee.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01356 а.

Так, в 2017 году был выпущен стандарт IEEE 802.11ah [2], известный также как Wi-Fi HaLow. Этот стандарт был спроектирован как дополнение к основному стандарту IEEE 802.11 сетей Wi-Fi с целью решить проблемы и удовлетворить нужды сетей Интернета вещей. Сети Wi-Fi HaLow работают на частотах ниже 1 ГГц, что позволяет обеспечить невероятно огромный для сетей Wi-Fi радиус покрытия до 1 км. Одновременно к одной точке доступа может быть подключено до 8191 устройства. Большой радиус покрытия позволяет использовать сети Wi-Fi HaLow для разгрузки сотовых сетей с использованием технологии Wi-Fi Offloading [3, 4]. При использовании этой технологии оператор сотовой связи устанавливает точки доступа Wi-Fi, к которым могут подключаться пользовательские устройства для доступа к сети Интернет. Это позволяет снизить нагрузку на сеть сотовой связи.

Типичным сценарием Интернета вещей является сценарий мониторинга чрезвычайной ситуации посредством множества сенсоров [5]. В рамках данного сценария сенсоры осуществляют измерения целевого параметра окружающей среды. При возникновении чрезвычайной ситуации сенсор обнаруживает её, анализируя результаты очередного измерения. Примерами чрезвычайных ситуаций являются задымление, пожар, затопление, утечка химического реагента, повышение электромагнитного фона либо радиационной активности, землетрясение, отключение подачи электроэнергии, возникновение механических напряжений в несущих элементах архитектурных конструкций. Информацию о возникновении чрезвычайной ситуации достаточно успешно доставить хотя бы от одного сенсора.

Поскольку чрезвычайные ситуации случаются редко, большую часть времени радиointерфейс сенсоров выключен и сенсоры не передают никаких данных через беспроводную сеть, поэтому выделять сенсорам отдельный частотно-временной ресурс на постоянной основе может быть нецелесообразно. Объектом рассмотрения статьи является гетерогенная сеть Wi-Fi HaLow, в которой присутствуют одновременно пользовательские устройства, передающие насыщенный трафик, и сенсоры мониторинга чрезвычайной ситуации. При возникновении чрезвычайной ситуации сенсоры начинают передачу оповещений, конкурируя за доступ к каналу с пользовательскими устройствами.

Гетерогенные сети Wi-Fi, в которых пользовательские устройства осуществляют передачу насыщенного трафика, а устройства Интернета вещей осуществляют передачу разреженного трафика, уже являлись объектом рассмотрения академического сообщества, к примеру, в статье [6]. В статьях [6, 7] рассмотрена доставка одиночных кадров с использованием защитных интервалов времени, к примеру окна ограниченного доступа (англ. Restricted Access Window, RAW). Передача в беспроводных сетях трафика, порождаемого чрезвычайными ситуациями, также уже рассматривалась исследователями, к примеру в [5, 8]. Тем не менее, до сих пор никто не рассматривал доставку оповещений о чрезвычайных ситуациях в условиях конкуренции с генерирующими насыщенный трафик пользовательскими устройствами. Чтобы закрыть этот пробел, в статье строится математическая модель, позволяющая найти распределение времени от момента возникновения чрезвычайной ситуации до окончания первой успешной передачи оповещения о чрезвычайной ситуации на точку доступа при наличии конкуренции с насыщенным трафиком пользовательских устройств. Далее для краткости время от момента возникновения чрезвычайной ситуации до окончания первой успешной передачи оповещения о чрезвычайной ситуации называется просто временем оповещения.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описан объект исследования и поставлена задача. В центральном разделе 3 статьи представлена математическая модель, решающая поставленную в разделе 2 задачу. В разделе 4 приведены численные результаты.

## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается следующий сценарий: к точке доступа подключено  $N_s$  сенсоров для мониторинга чрезвычайной ситуации с выключенными радиоинтерфейсами и  $N_u$  пользовательских устройств, передающих насыщенный трафик. В случайный момент времени происходит чрезвычайная ситуация, сенсоры включают свои радиоинтерфейсы и начинают передачу оповещения. Все подключённые к точке доступа станции используют метод случайного доступа к каналу EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access).

Унаследованный метод случайного доступа к каналу EDCA основан на прослушивании канала с избеганием коллизий (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) и использует двоичное экспоненциальное окно отсрочки (англ. binary exponential backoff) для уменьшения вероятности коллизии при повторных попытках передачи. Перед передачей поступившего в пустую очередь кадра данных станция прослушивает среду. Если среда свободна, станция осуществляет попытку передачи кадра данных. Если среда занята станция выполняет процедуру отсрочки перед попыткой передачи кадра данных. В рамках этой процедуры станция генерирует случайное целое число с равномерным распределением на отрезке, называемом конкурентным окном (англ. Contention Window). Это число становится начальным значением счётчика отсрочки. Станция прослушивает канал на предмет его занятости передачами других станций. Если канал свободен на протяжении определённого в стандарте IEEE 802.11ah [2] интервала времени  $T_e$ , то станция уменьшают счётчик отсрочки на единицу. Если канал занят, то станция уменьшает счётчик отсрочки на единицу, когда обнаруживает что канал был свободен в течение некоторого интервала времени. Длительность этого интервала времени равна AIFS, если станция сумела принять передаваемый в период занятости канала кадр, либо EIFS в противном случае. Длительности AIFS и EIFS определены в стандарте [2]. Когда счётчик отсрочки достигает нуля, станция совершает попытку передачи кадра данных.

Если попытка передачи была успешной, то станция получает в ответ кадр подтверждения (англ. Acknowledgement) и устанавливает конкурентное окно в минимальное значение  $CW_0$ . В противном случае станция удваивает конкурентное окно, т.е. конкурентное окно зависит от числа совершённых попыток передачи  $r$  как  $CW_r = \min [CW_0 2^r, CW_{\max}]$ , где величины  $CW_0$  и  $CW_{\max}$  определены в стандарте [2]. После каждой попытки передачи станция выполняет процедуру отсрочки.

EDCA поддерживает разные категории трафика, которые могут использовать разные параметры метода доступа. В рамках рассматриваемого сценария сенсоры используют категорию доступа, которой соответствует максимальное число попыток передачи  $RL_s$  и массив конкурентных окон  $CW_{s,r}, 0 \leq r < RL_s$ . Пользовательские устройства используют категорию доступа, которой соответствует максимальное число попыток передачи  $RL_u$  и массив конкурентных окон  $CW_{u,r}, 0 \leq r < RL_u$ .

Целью работы является построение математической модели, позволяющей найти распределение времени оповещения.

## 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При построении математической модели используется введённое в [9] понятие виртуального слота. Под виртуальным слотом понимается интервал времени между последовательными изменениями счётчика отсрочки. Виртуальные слоты принадлежат к одному из трёх типов: пустой виртуальный слот, успешный и коллизионный. Пустой виртуальный слот не содержит попыток передач станций, успешный виртуальный слот содержит одну попытку передачи, коллизионный виртуальный слот содержит несколько попыток передачи.

Для построения математической модели используются следующие предположения. Предполагается, что размеры кадров данных фиксированны и зависят только от типа устройства (пользовательское устройство / сенсор), а механизм RTS/CTS (англ. Request To Send / Clear To Send) не используется. Тогда длительность виртуального слота, содержащего передачи только сенсоров, составляет  $T_s$  независимо от того, была ли передача успешной или она попала в коллизию. Соответственно, длительность виртуального слота, содержащего передачи только пользовательских устройств, составляет  $T_u$ . Если виртуальный слот содержит передачи станций обоих типов, то это коллизийный слот с длительностью  $T_b = \max [T_s, T_u]$ . Также предполагается, что влиянием шума и эффекта захвата можно пренебречь, а скрытые станции отсутствуют.

Для построения математической модели необходимо проанализировать поведение сенсоров с учётом передач пользовательских устройств. В разделе 3.1 показано как можно использовать модель Бьянки [10] для анализа поведения пользовательских устройств. В разделе 3.2 представлена модификация модели из статьи [7] для анализа поведения сенсоров. В разделе 3.3 найдено распределение вероятности для времени оповещения.

### 3.1. Пользовательские устройства

Для анализа насыщенного трафика пользовательских устройств использован подход, предложенный Бьянки [10]. Влияние передач сенсоров пренебрежимо мало, так как чрезвычайные ситуации случаются редко, а сенсоры совершают ограниченное количество попыток передач для доставки одного оповещения о чрезвычайной ситуации.

Пусть  $\tau_u$  — вероятность того, что пользовательское устройство совершит попытку передачи в виртуальном слоте. Эта вероятность может быть найдена как отношение среднего числа попыток передач одного кадра данных  $\mathbb{E} [TX]$  к среднему числу виртуальных слотов, прошедших с момента поступления кадра данных в голову очереди и по момент его доставки  $\mathbb{E} [BF]$ :

$$\tau_u = \frac{\mathbb{E} [TX]}{\mathbb{E} [BF]}.$$

Пусть  $\mathbb{P}(c, u|TX)$  — условная вероятность попасть в коллизию при совершении попытки передачи. Тогда:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [TX] &= \sum_{r=0}^{RL_u-1} \mathbb{P}(c, u|TX)^r, \\ \mathbb{E} [BF] &= \sum_{r=0}^{RL_u-1} \frac{CW_{u,r} + 1}{2} \mathbb{P}(c, u|TX)^r. \end{aligned}$$

Если известна вероятность совершения попытки передачи пользовательским устройством, то величина  $\mathbb{P}(c, u|TX)$  может быть найдена как:

$$\mathbb{P}(c, u|TX) = 1 - (1 - \tau_u)^{N_u-1}.$$

Решая численными методами следующую систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \tau_u = \tau_u (\mathbb{P}(c, u|TX)), \\ \mathbb{P}(c, u|TX) = \mathbb{P}(c, u|TX) (\tau_u), \end{cases}$$

можно найти значение  $\tau_u$ . Вероятность того, что в очередном виртуальном слоте не будет передач пользовательских станций, может быть выражена следующим образом:

$$\mathbb{P}_u(E) = (1 - \tau_u)^{N_u}.$$

### 3.2. Сенсоры для мониторинга чрезвычайной ситуации

Для анализа передачи оповещений о чрезвычайной ситуации используется модифицированная модель из статьи [7]. Предполагается, что отсчёт счётчиков отсрочки синхронизирован на всех станциях сети. В статье [7] было получено выражение для вероятности передачи сенсора в виртуальном слоте при условии, что с момента возникновения чрезвычайной ситуации сенсор отсчитал  $t$  виртуальных слотов и совершил  $r$  неудачных попыток передачи:

$$\mathbb{P}_s(TX|t, r) = \frac{a_{t,r}}{b_{t,r}},$$

где  $a_{t,r}$  и  $b_{t,r}$  есть, соответственно, вероятность совершить попытку передачи и вероятность иметь пакет в очереди по прошествии  $t$  виртуальных слотов с счётчиком числа повторных попыток передачи  $r$ , согласно [7]:

$$a_{t,r} = \begin{cases} \frac{1}{CW_{s,0}}, & r = 0, t < CW_{s,0}, \\ \sum_{i=\max(0, t-CW_{s,r-1})}^{t-1} a_{i,r-1}, & 0 < r < RL_s, 0 < t, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$b_{t,r} = \begin{cases} 1, & r = 0, t = 0, \\ 1 - \sum_{i=0}^{t-1} a_{i,0}, & r = 0, 0 < t, \\ \sum_{i=0}^{t-1} [a_{i,r-1} - a_{i,r}], & 0 < r < RL_s, 0 < t, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Следуя подходу, описанному в [7], рассматривается цепь Маркова с дискретным временем  $(e, c_s, c_u, c_b, r, a)_t$ , где  $e$  — число пустых виртуальных слотов, прошедших с момента начала отсчёта сенсорами счётчиков отсрочки;  $c_s$  — число успешных и коллизионных слотов, в которых совершали передачи только сенсоры;  $c_u$  — число успешных и коллизионных слотов, в которых совершали передачи только пользовательские устройства;  $c_b$  — число коллизионных слотов, в которых совершали передачи и сенсоры и пользовательские устройства;  $r$  — число попыток передачи, совершённых произвольно выбранным сенсором;  $a$  — индикаторная величина, равная 1, если состояние является поглощающим, и 0 в противном случае;  $t$  — число виртуальных слотов, отсчитанных сенсорами с момента возникновения чрезвычайной ситуации. Отсчёты времени соответствуют границам виртуальных слотов.

Согласно формуле полной вероятности вероятность передачи произвольным образом выбранного сенсора по прошествии  $t$  виртуальных слотов может быть найдена как:

$$\mathbb{P}_s(TX|e, c_s, c_u, c_b, t) = \frac{\sum_{r=0}^{RL_s-1} \mathbb{P}_s(TX|t, r) \mathbb{P}(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)}{\sum_{r=0}^{RL_s-1} \mathbb{P}(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)}.$$

Исключив из рассмотрения произвольным образом выбранный сенсор, можно найти вероятность того, что из остальных сенсоров ни один не передаёт, следующим образом:

$$\mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t) = (1 - \mathbb{P}_s(TX|e, c_s, c_u, c_b, t))^{N_s-1}.$$

Вероятность того, что из остальных сенсоров передаёт только один сенсор, может быть найдена как:

$$\mathbb{P}_s(S|e, c_s, c_u, c_b, t) = (N_s - 1) \mathbb{P}_s(TX|e, c_s, c_u, c_b, t) (1 - \mathbb{P}_s(TX|e, c_s, c_u, c_b, t))^{N_s-2}.$$

Вероятность того, что из остальных сенсоров передаёт более одного сенсора, может быть найдена как:

$$\mathbb{P}_s(C|e, c_s, c_u, c_b, t) = 1 - \mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t) - \mathbb{P}_s(S|e, c_s, c_u, c_b, t).$$

В начальный момент времени  $t = 0$  цепь находится в состоянии  $(0, 0, 0, 0, 0, 0)$ :

$$\mathbb{P}(e, c_s, c_u, c_b, r, a) = \begin{cases} 1 & (e, c_s, c_u, c_b, r, a) = (0, 0, 0, 0, 0, 0), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В момент времени  $t$  возможны следующие виды переходов:

- с вероятностью  $(1 - \mathbb{P}_s(TX|t, r)) \mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t) \mathbb{P}_u(E)$  ни одна станция не передаёт и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e + 1, c_s, c_u, c_b, r, 0)$ ;
- с вероятностью  $(1 - \mathbb{P}_s(TX|t, r)) \mathbb{P}_s(S|e, c_s, c_u, c_b, t) \mathbb{P}_u(E)$  один из сенсоров совершает успешную попытку передачи и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s + 1, c_u, c_b, r, 1)$ ;
- с вероятностью  $(1 - \mathbb{P}_s(TX|t, r)) \mathbb{P}_s(C|e, c_s, c_u, c_b, t) \mathbb{P}_u(E)$  происходит коллизия с участием сенсоров и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s + 1, c_u, c_b, r, 0)$ ;
- с вероятностью  $(1 - \mathbb{P}_s(TX|t, r)) (1 - \mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t)) (1 - \mathbb{P}_u(E))$  происходит коллизия с участием сенсоров и пользовательских устройств и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s, c_u, c_b + 1, r, 0)$ ;
- с вероятностью  $(1 - \mathbb{P}_s(TX|t, r)) \mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t) (1 - \mathbb{P}_u(E))$  происходит одна или несколько передач пользовательских устройств и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s, c_u + 1, c_b, r, 0)$ ;
- с вероятностью  $\mathbb{P}_s(TX|t, r) \mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t) \mathbb{P}_u(E)$  происходит успешная передача произвольно выбранного сенсора и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s + 1, c_u, c_b, r, 1)$ ;
- с вероятностью  $\mathbb{P}_s(TX|t, r) (1 - \mathbb{P}_s(E|e, c_s, c_u, c_b, t)) \mathbb{P}_u(E)$  передача произвольно выбранного сенсора попадает в коллизию с передачей одного или нескольких других сенсоров и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s + 1, c_u, c_b, r + 1, 0)$ ;
- с вероятностью  $\mathbb{P}_s(TX|t, r) (1 - \mathbb{P}_u(E))$  передача произвольно выбранного сенсора попадает в коллизию с передачей одного или нескольких пользовательских устройств и цепь переходит из состояния  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 0)$  в состояние  $(e, c_s, c_u, c_b + 1, r + 1, 0)$ ;

Переходы совершаются только из непоглощающих состояний с  $a = 0$ . Стохастический процесс останавливается при попадании в одно из поглощающих состояний с  $a = 1$ . Попадание в поглощающее состояние соответствует событию, состоящему в том, что один из сенсоров успешно завершил передачу кадра данных с информацией о чрезвычайной ситуации, при этом с момента инициации сенсорами процедуры отсрочки прошло  $e$  пустых виртуальных слотов,  $c_s$  слотов занятых передачами сенсоров,  $c_u$  слотов занятых передачами

пользовательских устройств,  $c_b$  слотов занятых передачами и сенсоров, и пользовательских устройств. Вероятностью того, что произвольно выбранный сенсор достигнет предела числа попыток передачи  $RL_s$ , здесь пренебрегается. Таким образом, можно найти распределение вероятности  $\mathbb{P}_{abs}(e, c_s, c_u, c_b, r)$  события, состоящего в том, что процесс завершился в состоянии  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 1)$ . Множество этих событий обозначается как  $\Omega_{abs}$ .

### 3.3. Распределение времени оповещения

Чрезвычайная ситуация возникает в произвольный случайный момент времени. Этот момент времени может соответствовать пустому виртуальному слоту либо занятому (успешной передачей или коллизией). Если чрезвычайная ситуация возникает в течение занятого слота, то сенсоры начинают процедуру отсрочки после окончания занятого слота, используя  $CW_{s,0}$  в качестве начального значения и совершая не более  $RL_s$  попыток передач. Если стохастический процесс завершился в состоянии  $(e, c_s, c_u, c_b, r, 1)$ , то время от начала процедуры отсрочки до первой успешной доставки оповещения для этого состояния может быть найдено как:

$$T(e, c_s, c_u, c_b) = T_e e + T_s c_s + T_u c_u + T_b c_b.$$

Тогда функция распределения для времени оповещения  $\theta_b$  может быть найдена как:

$$\mathbb{F}_{\theta_b}(x) = \sum_{\Omega_{abs}} \mathbb{P}_{abs}(e, c_s, c_u, c_b, r) \min \left[ 1; \max \left[ 0; \frac{x - T(e, c_s, c_u, c_b)}{T_u} \right] \right],$$

где  $\min \left[ 1; \max \left[ 0; \frac{x - T(e, c_s, c_u, c_b)}{T_u} \right] \right]$  — это вероятность того, что время от возникновения чрезвычайной ситуации до конца занятого слота не превысило  $x - T(e, c_s, c_u, c_b)$ .

Если чрезвычайная ситуация возникает в течение пустого виртуального слота, то после включения радиointерфейса сенсоры детектируют свободную среду передачи данных, одновременно совершают первую попытку передачи, попадают в коллизию и далее исполняют процедуру отсрочки, начиная с значения конкурентного окна  $CW_{s,1}$  и совершая не более  $RL_s - 1$  попыток передачи. Тогда функция распределения для времени оповещения  $\theta_e$  может быть найдена как:

$$\mathbb{F}_{\theta_e}(x) = \sum_{\Omega_{lim}(x)} \mathbb{P}_{abs}(e, c_s, c_u, c_b, r),$$

где  $\Omega_{lim}(x) = \{(e, c_s, c_u, c_b, r) : T(e, c_s, c_u, c_b) + T_s < x\} \subset \Omega_{abs}$  есть множество событий, в которых время от момента возникновения чрезвычайной ситуации до момента времени, соответствующему окончанию успешной доставки оповещения, не превышает  $x$ .

Вероятность того, что чрезвычайное событие произошло в течение занятого виртуального слота:

$$\frac{T_u (1 - \mathbb{P}_u(E))}{T_u (1 - \mathbb{P}_u(E)) + T_e \mathbb{P}_u(E)}.$$

Вероятность того, что чрезвычайное событие произошло в течение пустого виртуального слота:

$$\frac{T_e \mathbb{P}_u(E)}{T_u (1 - \mathbb{P}_u(E)) + T_e \mathbb{P}_u(E)}.$$

Функция распределения времени  $\theta$  оповещения может быть найдена с использованием формулы полной вероятности как:

$$\mathbb{F}_{\theta}(x) = \frac{\mathbb{F}_{\theta_b}(x)T_u(1 - \mathbb{P}_u(E)) + \mathbb{F}_{\theta_e}(x)T_e\mathbb{P}_u(E)}{T_u(1 - \mathbb{P}_u(E)) + T_e\mathbb{P}_u(E)}.$$

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

##### 4.1. Параметры моделируемого сценария

Рассматривается гетерогенная сеть состоящая из точки доступа, сенсоров и пользовательских устройств, передающих кадры данных размера 100 байт и использующих сигнально-кодировую конструкцию MCS 8 (англ. Modulation and Coding Scheme) в канале шириной 2 МГц с коротким защитным интервалом и номинальной на физическом уровне пропускной способностью  $\approx 8.7$  Мбит/с. В таком случае длительности виртуальных успешных и коллизионных слотов для сенсоров и пользовательских устройств совпадают:  $T_s = T_u = T_b = 1064$  мкс. Длительность пустого виртуального слота составляет  $T_e = 52$  мкс согласно стандарту [2].

##### 4.2. Численные результаты

На рис. 1 представлены функции распределения времени оповещения для разных  $CW_{s,0}$ . Рассмотрен случай с  $N_s = 100$  сенсорами и  $N_u = 10$  пользовательскими устройствами.

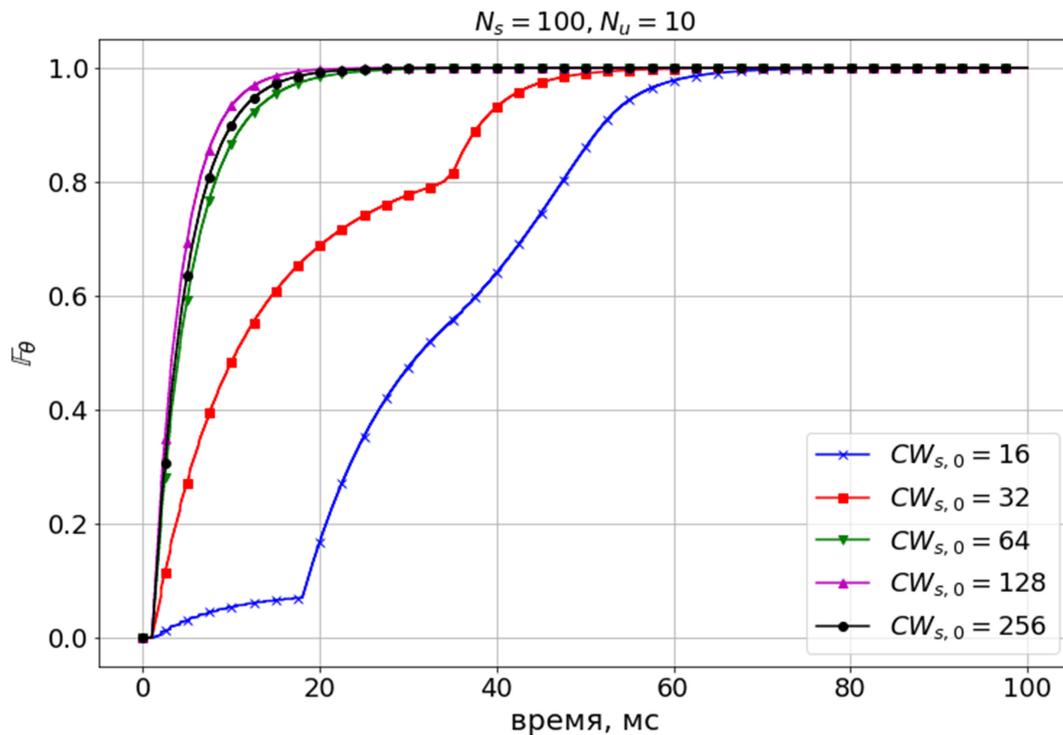


Рис. 1. Распределение времени оповещения для разных значений  $CW_{s,0}$

Результаты для случаев  $CW_{s,0} = 16$ ,  $CW_{s,0} = 32$  показывают, что чрезмерно малое значение конкурентного окна приводит к увеличению времени оповещения. Скачки функции распреде-

ления соответствуют моментам увеличения значения конкурентного окна ввиду попадания сенсоров в коллизии. В то же время, слишком большое значение конкурентного окна также увеличивает время оповещения: для случая  $CW_{s,0} = 256$  время оповещения больше, чем для случая  $CW_{s,0} = 128$ .

На рис. 2 представлены функции распределения времени оповещения для разного числа сенсоров  $N_s$ . Рассмотрен случай с  $N_u = 10$  пользовательскими устройствами и начальным значением  $CW_{s,0} = 128$  конкурентного окна для сенсоров, так как это конкурентное окно было наилучшим для  $N_s = 100$  сенсоров согласно рис. 1.

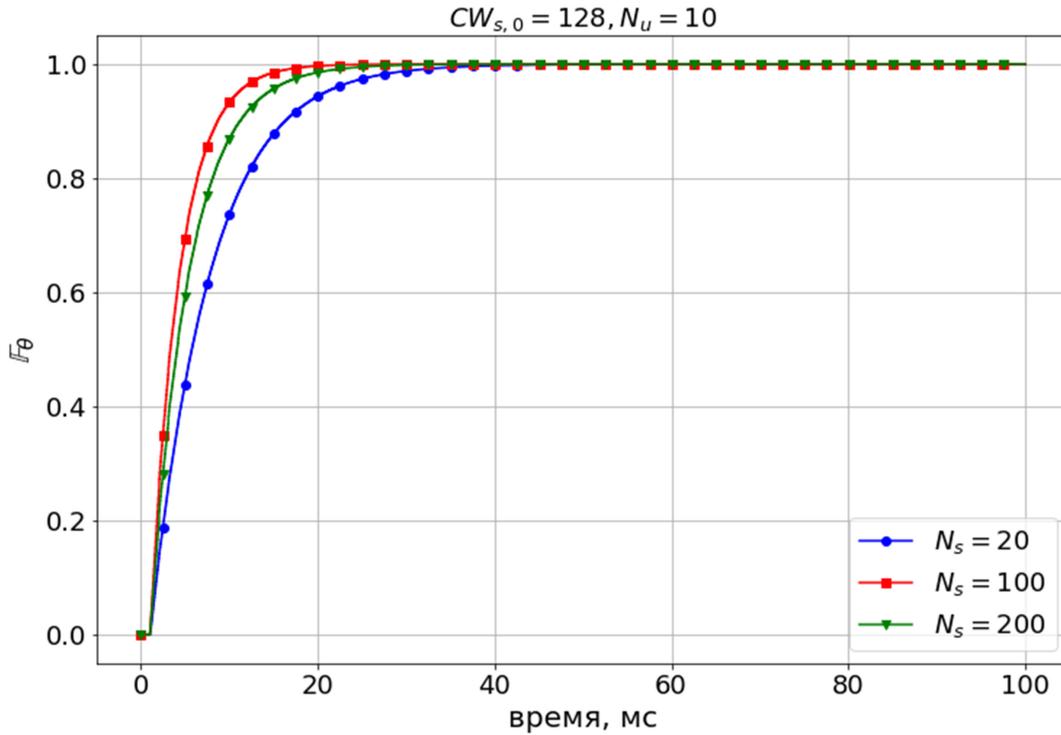


Рис. 2. Распределение времени оповещения для разного числа сенсоров  $N_s$

Как увеличение, так и уменьшение числа сенсоров относительно  $N_s = 100$  приводит к увеличению времени оповещения. Можно сделать вывод о том, что для каждого числа сенсоров есть своё оптимальное значение начального конкурентного окна, которое позволяет доставлять оповещение наиболее быстро и надёжно, и отклонение от этого значения увеличивает время оповещения.

На рис. 3 представлены функции распределения времени оповещения для разного числа пользовательских устройств  $N_u$ . Рассмотрен случай с  $N_s = 100$  сенсорами и начальным значением  $CW_{s,0} = 128$  конкурентного окна для сенсоров так как, опять же, это конкурентное окно было наилучшим для  $N_s = 100$  сенсоров согласно рис. 1.

Добавление пользовательских устройств увеличивает конкуренцию за доступ к каналу и время оповещения, уменьшает надёжность доставки оповещения, т.е. вероятность успешно доставить оповещения при наличии ограничений на время доставки; уменьшение числа пользовательских устройств имеет противоположный эффект. К примеру, для  $N_u \leq 20$  пользовательских устройств возможно доставить оповещение за время не более 20 мс с вероятностью

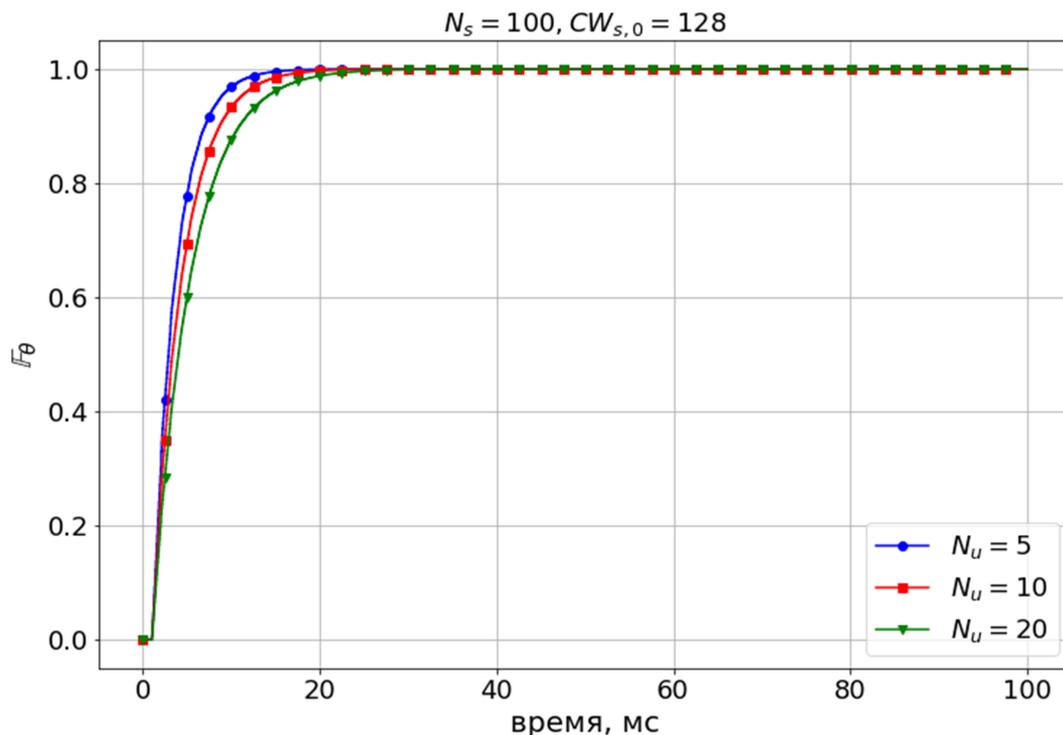


Рис. 3. Распределение времени оповещения для разного числа пользовательских устройств  $N_u$

не менее 95 %; однако если оповещение должно быть доставлено за время не более 10 мс, то доставить его с вероятностью не менее 95 % можно лишь для  $N_u \leq 5$  пользовательских устройств. При наличии большего числа пользовательских устройств необходимо использовать механизмы, позволяющие устанавливать защитные интервалы времени и ограничивать конкуренцию за доступ к каналу, к примеру, механизм RAW [11].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье впервые рассмотрен сценарий доставки оповещений о чрезвычайной ситуации сенсорами в гетерогенной сети Wi-Fi HaLow. Построена математическая модель, позволяющая найти распределение времени оповещения в зависимости от числа сенсоров и пользовательских устройств в гетерогенной сети и параметров используемого механизма EDCA. Полученные с использованием математической модели численные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- увеличение числа пользовательских устройств увеличивает конкуренцию за доступ к каналу и уменьшает скорость и надёжность доставки оповещений
- для фиксированного числа сенсоров и пользовательских устройств существует оптимальное значение начального конкурентного окна, которое обеспечит наиболее быструю и надёжную доставку оповещения, отклонение от оптимального значения приводит к уменьшению скорости и надёжности доставки оповещения

Построенная математическая модель позволяет найти оптимальное значение начального конкурентного окна, обеспечивающее наиболее быструю и надёжную доставку оповещения,

а также позволяет понять возможна ли доставка оповещения с заданными требованиями на скорость и надёжность доставки с использованием только метода случайного доступа EDCA, или же необходимо использовать механизмы ограничения конкуренции за доступ к каналу, такие как механизм окна ограниченного доступа [11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Internet of Things At a Glance. Cisco. // <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/at-a-glance-c45-731471.pdf>
2. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation. 2017
3. Khorov E., Lyakhov A., Krotov A., Guschin A. A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities // *Computer Communications*. – 2015. – Т. 58. – С. 53-69.
4. Qiao L., Zheng Z., Cui W., Wang L. A survey on Wi-Fi HaLow technology for Internet of Things // *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. – IEEE, 2018. – С. 1-5.
5. Madueño G.C., Stefanović Č., Popovski P. Reliable and efficient access for alarm-initiated and regular M2M traffic in IEEE 802.11 ah systems // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2015. – Т. 3. – №. 5. – С. 673-682.
6. Bankov D., Khorov E., Kureev A., Lyakhov A. Improving efficiency of heterogeneous Wi-Fi networks with energy-limited devices // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. – Springer, Cham, 2016. – С. 181-192.
7. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A. Modelling machine type communication in IEEE 802.11 ah networks // *2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW)*. – IEEE, 2015. – С. 1149-1154.
8. Zhang X., Yeung K.L. LLE: A timer extension mechanism for alarm-triggered traffic in IEEE 802.11 ah WLANs // *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. – IEEE, 2017. – С. 1-6.
9. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I. IEEE 802.11 wireless LAN: Saturation throughput analysis with seizing effect consideration // *Cluster Computing*. – 2002. – Т. 5. – №. 2. – С. 133-144.
10. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on selected areas in communications*. – 2000. – Т. 18. – №. 3. – С. 535-547.
11. Khorov E., Lyakhov A., Nasedkin I., Yusupov R. Poster: Fast and Reliable Alert Delivery in Wi-Fi HaLow Sensor Networks // *in proceedings of IFIP Networking 2019*

### Alert Delivery in a Heterogeneous Wi-Fi HaLow Network

**Khorov E.M., Lyakhov A.I., Nasedkin I.A., Yusupov R.R.**

In recent years we have witnessed an active development of the Internet of Things (IoT) concept. The most simple way to provide connectivity for the IoT devices is to use wireless network. One of the typical scenarios arised with IoT is a heterogeneous network where sensors transmit emergency alerts in the presence of saturated traffic, created by user devices. We present a mathematical model for the distribution of the alert delivery time in the presence of contention with user devices.

**KEYWORDS:** heterogeneous networks, Internet of Things, Wi-Fi HaLow, alert delivery.