

# Влияние вида корреляции детектирования событий на надежность доставки информации за ограниченное время с помощью механизма PRAW<sup>1</sup>

М.В. Шлапак<sup>\*,\*\*</sup>, А.И. Ляхов<sup>\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

<sup>\*\*</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Москва

Поступила в редколлегию 01.08.2024 г. Принята 08.10.2024 г.

**Аннотация**—Одним из способов обеспечения быстрой и надежной доставки информации от сенсоров, работающих в гетерогенных беспроводных сетях, является использование технологии Wi-Fi HaLow и, в частности, механизма периодического окна ограниченного доступа PRAW (англ.: Periodic Restricted Access Window). В большинстве работ, исследующих механизм PRAW в сценариях надежной доставки информации за ограниченное время, подразумевается, что трафик, генерирующийся на сенсорах, не коррелирован. Однако в реальных сценариях часто возникают ситуации, при которых одно и то же событие, приводящее к генерации трафика, детектируется сразу несколькими сенсорами. В данной работе на основе аналитического моделирования исследуется влияние дисперсии и коэффициента асимметрии распределения числа сенсоров, одновременно детектирующих каждое событие, на надежность доставки информации за ограниченное время с помощью механизма PRAW.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гетерогенные сети, IEEE 802.11ah, RAW, коррелированное детектирование событий, распределение задержки.

DOI: 10.53921/18195822\_2024\_24\_3\_287

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные сети чаще всего гетерогенны: они объединяют сенсоры, передающие чувствительные к задержке и надежности доставки данные, с другими станциями, генерирующими тяжелый и/или насыщенный трафик (например, видеокамерами). Поддерживать высокое качество обслуживания всей гетерогенной сети, т.е. а) обеспечивать низкие задержки доставки данных от сенсоров и б) поддерживать высокую пропускную способность для остальных станций позволяет стандарт IEEE 802.11ah и представленные в нем механизмы, такие как механизм окна ограниченного доступа RAW (англ.: Restricted Access Window) и механизм пробуждения по расписанию TWT (англ.: Target Wake Time).

Механизм RAW позволяет точке доступа защитить сенсоры от конкуренции с остальными станциями, выделяя под передачи сенсоров ограниченные интервалы времени, называемые интервалами RAW. Информация об интервалах RAW рассылается в специальных кадрах, называемых биконами (англ.: beacon frame). В целях экономии времени и энергии на принятие биконов можно выделять интервалы RAW периодически (реализуя таким образом периодический RAW, или же PRAW) с помощью только одного бикона. Для снижения внутренней

<sup>1</sup> Исследование осуществлено в рамках Госзадания № FFNU-2022-0036 ИППИ РАН

конкуренции сенсоров точка доступа может дополнительно делить интервал RAW на несколько RAW-слотов, в течение которых получить доступ к каналу может только определенная группа сенсоров. Вне назначенных им RAW-слотов сенсоры могут уходить в спящий режим и экономить энергию с помощью механизма TWT.

Внутри RAW-слота сенсоры используют метод доступа к каналу EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access). Согласно данному методу каждый сенсор, обнаруживающий, что канал был свободен в течение некоторого заданного интервала времени, может получить доступ к каналу не ранее, чем через  $w$  интервалов, называемых слотами отсрочки. Значение  $w$  выбирается равновероятно из промежутка  $[0, W_i - 1]$ , в котором значение конкурентного окна  $W_i$  равно  $W_0$  в начале RAW-слота, удваивается с каждой неудачной попыткой передачи и ограничивается сверху числом  $W_{max}$ .

Выбор оптимальных параметров механизма PRAW, включая значение  $W_0$ , число групп  $M$ , на которые точка доступа делит сенсоры, длительность каждого RAW-слота  $T_{slot}$  и период повторения интервалов RAW  $T_{per}$ , зависит от целевых метрик производительности сети и в общем случае является нетривиальной задачей.

Многие авторы искали параметры механизмов RAW и PRAW, максимизирующие вероятность доставки пакетов за ограниченное время, с помощью аналитического или имитационного моделирования. В большинстве работ предполагалось, что каждый сенсор детектирует свой собственный поток событий. Однако в реальных сценариях часто возникают ситуации, когда одно и то же событие детектируется сразу несколькими сенсорами. В частности, такие ситуации распространены на производстве, где сенсоры осуществляют функции мониторинга и контроля посредством измерения параметров окружающей среды. Превышение допустимого уровня того или иного параметра, являющееся в данном случае детектируемым событием, может привести к аварийной ситуации. Для получения точной информации о координатах возникновения потенциальной аварийной ситуации и/или ее параметрах необходимо быстро и надежно получить информацию о событии от всех задетектировавших это событие сенсоров, т.е. необходимо рассматривать единый поток событий, при котором детектирование происходит коррелированным образом.

В [1] было показано, что степень корреляции трафика, под которой подразумевалось среднее число сенсоров, одновременно детектирующих каждое событие (в [1] это число предполагалось фиксированным), существенно влияет на максимально достижимые значения доли пакетов, доставленных за заданное время. Однако вид распределения числа сенсоров, одновременно детектирующих каждое событие и, в частности, такие его характеристики, как первые несколько моментов, могут также влиять на метрики производительности сети, связанные с надежностью доставки информации за ограниченное время.

В данном исследовании впервые оценивается влияние дисперсии и коэффициента асимметрии распределения числа сенсоров, одновременно детектирующих каждое событие, на надежность доставки информации за ограниченное время при ограниченном потреблении канального ресурса с помощью механизма PRAW. Исследование проводится на основе аналитических моделей [2–4].

Далее в разделе 2 приводится краткий обзор работ, исследующих механизм RAW. В разделе 3 описывается сценарий, в рамках которого проводится данное исследование. В разделе 4 содержится краткое описание аналитической модели. В разделе 5 приводятся результаты решения задач оптимизации и оценивается, как на них влияет вид корреляции детектирования событий. Наконец, в разделе 6 представлены краткие выводы о проделанной работе.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существует много работ, посвященных аналитическому моделированию RAW, позволяющему исследовать данный механизм с меньшими вычислительными затратами по сравнению с имитационным моделированием.

Первые аналитические модели [5,6] основывались на ранней версии механизма RAW, называемой Group-Synchronized Distributed Coordination Function (GS-DCF). При использовании GS-DCF значения счетчика отсрочки и размера конкурентного окна сохранялись между интервалами RAW, в то время как в заключительной версии механизма RAW эти величины обновляются в начале каждого нового интервала. Отличие в методе доступа к каналу приводит к ошибкам при оценке производительности RAW с помощью моделей GS-DCF в случае, когда используются короткие или средние RAW-слоты [7]. Ошибки в оценке также возникают при моделировании заключительной версии механизма RAW в предположении о том, что вероятность передачи пакета в RAW-слоте не меняется со временем [8–10]. Такое предположение не приводит к большим погрешностям только в том случае, если RAW-слот достаточно длинный, и начиная с какого-то момента вероятность передачи существенно не меняется до конца RAW-слота.

Учесть изменение вероятности передачи пакета со временем можно при описании процесса передачи пакетов внутри RAW-слотов и/или за несколько периодов RAW с помощью цепей Маркова и рассмотрении их эволюции, как это было сделано в работах [1–4, 7, 11–16]. Часть из этих работ посвящена оценке вероятности доставки пакета за ограниченное время в случае, когда сенсоры генерируют разреженный трафик [1, 4, 7, 11–13], характерный для сетей Интернета вещей. Тем не менее в каждой из моделей [1, 4, 7, 11–13] имеются некоторые допущения, которые не позволяют использовать эти модели в исходном виде для текущего исследования.

В работах [7, 11] предполагалось, что оптимальные показатели производительности достигаются при передаче данных в течение только одного длинного интервала RAW, период повторения которого в точности совпадает с ограничением на задержку. Однако в случае, когда данные для передачи имеются у малого числа сенсоров, выделение длинного интервала RAW приводит к простоям канала. В работе [13] данные могли передаваться в течение нескольких периодов RAW, однако сами RAW-слоты могли быть только короткими, т.е. вмещали только одну попытку передачи пакета. Короткие RAW-слоты квазиоптимальны при обслуживании низкоинтенсивного трафика [13, 14], генерирующегося каждым сенсором независимо друг от друга, однако могут не давать оптимальных результатов при рассмотрении трафика более общего типа. Подходы [7, 11, 13] обобщаются в моделях [4, 16]: в них исследуется передача данных посредством RAW-слотов произвольной длительности в течение нескольких периодов RAW для трафика различной интенсивности. Тем не менее в работах [4, 16] также предполагалось, что трафик генерируется каждым сенсором независимо друг от друга. Такое допущение не всегда соответствует реальности, поскольку на производстве распространены ситуации, при которых одно и то же событие детектируется сразу несколькими сенсорами, и после одного события генерируется сразу несколько пакетов.

Генерацию пачки пакетов в ответ на одно событие, т.е. коррелированное детектирование, можно описать с помощью неординарного пуассоновского потока [17, 18] в случае, если сгенерированный коррелированным образом трафик обслуживается многоканальными устройствами (множеством сенсоров) независимо друг от друга. В общем случае внутри интервалов RAW передачи сенсоров зависят друг от друга, поэтому для описания корреляции используются другие подходы, такие как [1, 7, 12]. В работе [7] число  $K$  сенсоров, одновременно генерирующих пакеты, было распределено биномиально, однако при моделировании рассматривался только один период RAW, как и в [11]. В работе [12] исследовался сценарий доставки только первого оповещения от группы сенсоров, а не всех, детектирующих одно и то же событие.

Однако для избежания аварийной ситуации зачастую необходимо знать точные координаты и/или значение параметра, т.е. получить информацию от всех задетектировавших данное событие сенсоров.

Наконец, исследование передачи данных за несколько периодов RAW с RAW-слотами произвольной длительности с точки зрения надежности доставки каждого пакета за ограниченное время в случае коррелированного трафика было проведено в [1]. Однако в [1] предполагалось, что каждое событие детектируется одинаковым числом сенсоров, хотя в общем случае распределение  $\{F(K)\}$  может иметь любой дискретный вид. Вид распределения  $\{F(K)\}$  может существенно влиять на надежность доставки пакета за ограниченное время. Методы оценки влияния вида распределения  $\{F(K)\}$  на метрики, связанные с надежной доставкой пакета за ограниченное время, не представлены в литературе.

В данной работе с помощью аналитических моделей [2–4], расширенных на случай произвольного распределения  $\{F(K)\}$ , исследуется влияние дисперсии и коэффициента асимметрии распределения  $\{F(K)\}$  на надежность доставки информации за ограниченное время. Аналогично [1–3, 16] рассматривается передача данных за несколько периодов RAW с RAW-слотами произвольной длительности. Кроме того, аналогично [1] рассматривается реальный сценарий, в котором информация может теряться из-за вытеснений из буферов конечных размеров.

### 3. СЦЕНАРИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается гетерогенная сеть Wi-Fi, в которой сенсоры совершают передачи данных, требующие быстрой и надежной доставки, вместе со станциями, обслуживающими тяжелый и/или насыщенный трафик.

$N$  сенсоров измеряют параметры окружающей среды, сохраняют в памяти измерения, превышающие допустимые значения, которые называются детектируемыми событиями, и передают информацию о детектируемых событиях точке доступа. Будем считать поток детектируемых событий пуассоновским с интенсивностью  $\lambda$ . Вследствие дешевизны и простоты своего устройства, сенсоры могут хранить в памяти — измерительном буфере — не более одного измерения. Будем считать распределение  $\{F(K)\}$  числа  $K$  сенсоров, детектирующих каждое событие, известным.

Точка доступа использует механизм PRAW и выделяет для передач сенсоров интервалы RAW длительностью  $T_{raw}$ , повторяющиеся с периодом  $T_{per}$ . Таким образом точка доступа закрепляет за механизмом PRAW долю  $CTC = \frac{T_{raw}}{T_{per}}$  канального времени. Для снижения внутренней конкуренции сенсоров точка доступа дополнительно делит интервал RAW на  $M$  RAW-слотов длительностью  $T_{slot} = \frac{T_{raw}}{M}$ , в каждом из которых разрешено передавать данные только определенной группе из  $N_m$  ( $1 \leq m \leq M$  — номер RAW-слота) сенсоров.

Будем считать, что сенсоры распределены по группам равномерно, а именно каждый сенсор принадлежит группе под номером  $m = [(x + N_{offset}) \bmod M] + 1$ , где  $x$  является номером сенсора в списке точки доступа, а  $N_{offset}$  — случайным сдвигом. Поскольку распределение сенсоров по группам не зависит от их расположения на производстве, будем считать, что вероятность детектирования события некоторым сенсором из группы  $m$  пропорциональна размеру этой группы и не зависит от вероятности детектирования этого же события другими сенсорами из данной группы. В частности, если событие задетектировало  $K$  сенсоров, вероятность того, что произвольно выбранный сенсор задетектировал данное событие, равна  $\frac{K}{N}$ .

На момент начала каждого из выделенных ему RAW-слотов сенсор проверяет измерительный буфер, генерирует новый пакет в случае, если буфер оказывается непустым, обновляет вмещающий один пакет буфер передатчика, чтобы в текущем RAW-слоте передавать наиболее актуальное измерение, и очищает измерительный буфер.

Будем называть сенсор, имеющий пакет в буфере передатчика, активным. Вне назначенного сенсору RAW-слота, а также в случае, если в начале назначенного RAW-слота сенсор оказался неактивен, сенсор уходит в спящий режим и экономит энергию, используя механизм TWT. Процесс передачи пакета происходит строго внутри RAW-слота, поэтому сенсоры, обнаруживающие, что для совершения передачи недостаточно времени, оставшегося до конца RAW-слота, также уходят в спящий режим.

Считаем, что сенсоры передают данные в идеальном канале, т.е. неудачные попытки передачи пакетов происходят только из-за коллизий. При этом подразумевается, что все сенсоры находятся в зоне слышимости друг друга, а проблема скрытых станций решается с помощью методов [19, 20]. Будем считать, что все пакеты имеют одинаковый размер и передаются с помощью одной сигнально-кодовой конструкции. Поскольку в качестве полезной нагрузки в каждом пакете передается всего лишь одно измерение, пакеты короткие и механизм RTS/CTS (англ.: Request To Send / Clear To Send) не используется.

Назовем задержкой доставки пакета  $D$  время, прошедшее с момента детектирования события, информация о котором содержится в передаваемом пакете, до момента получения подтверждения о его успешной доставке. Для предотвращения потенциально аварийных ситуаций необходимо обеспечивать задержку доставки пакета, не превышающую некоторое ограничение  $D^{lim}$ .

Измерительный буфер обновляется после детектирования каждого нового события, а буфер передатчика может обновляться в начале каждого нового RAW-слота, поэтому информация о части событий теряется. Будем считать измерения, не вытесненные из измерительного буфера или буфера передатчика и доставленные с задержкой, не превосходящей ограничение  $D^{lim}$ , успешными; в противном случае измерения будут неуспешными.

Качественное обслуживание трафика сенсоров предполагает, что доля  $PLR_{all}$  неуспешных измерений не превосходит определенный порог. Справедливое сосуществование генерирующих насыщенный трафик станций с сенсорами предполагает, что доля  $CTC$  канального времени, отведенного на передачи сенсоров, не будет превышать заданный порог.

На качество обслуживания трафика сенсоров, помимо интенсивности детектирования событий  $\lambda$ , числа сенсоров  $N$  и ограничения на задержку  $D^{lim}$ , может также влиять вид распределения  $\{F(K)\}$  числа сенсоров, одновременно детектирующих каждое событие. В данной работе исследуется влияние дисперсии и коэффициента асимметрии распределения  $\{F(K)\}$  на целевые метрики  $PLR_{all}$  и  $CTC$ . Для этого решаются две оптимизационные задачи, связанные с минимизацией одной из метрик при ограничении на вторую метрику, подробно описанные в разделе 5. В качестве распределений  $\{F(K)\}$  рассматриваются как известные биномиальное, ограниченное справа пуассоновское и дискретное равномерное в некотором окне распределения, так и случайные распределения с заданными первыми тремя моментами.

#### 4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Аналогично [4] выберем произвольным образом сенсор (обозначим через  $m$  номер группы, к которой принадлежит данный сенсор) и рассмотрим для него процесс передачи пакета за несколько периодов RAW. Данный процесс описывается в [4] цепью А, которая является цепью Маркова с дискретным временем. В качестве единицы времени рассматривается период RAW, а в качестве состояния — число активных сенсоров, отличных от выбранного, на момент начала RAW-слота  $m$  соответствующего периода.

Изменение числа активных сенсоров на момент начала RAW-слотов  $m$  двух последовательных периодов происходит из-за успешной передачи пакетов в RAW-слоте  $m$  и детектирования новых событий в течение периода RAW. Вероятности успешной передачи фиксированного чис-

ла пакетов за RAW-слот не зависят от типа генерирующегося трафика и могут быть найдены с помощью моделей [2, 3].

Найдем распределение числа сенсоров, задетектировавших хотя бы одно событие в течение периода RAW. Обозначим через  $K_m \leq K$  число сенсоров, которые задетектировали событие и входят в рассматриваемую группу  $m$ . Величины  $K$  и  $K_m$  являются случайными, а их распределения  $\{F(K)\}$  и  $\{P(K_m)\}$  связаны между собой как:

$$P(K_m) = \sum_{K=0}^N \frac{\binom{N_m}{K_m} \cdot \binom{N-N_m}{K-K_m}}{\binom{N}{K}} F(K). \quad (1)$$

Зная распределение  $\{P(K_m)\}$  и вероятности генерации ровно  $n$  событий из пуассоновского потока с интенсивностью  $\lambda$  за период RAW, находим искомое распределение числа сенсоров, задетектировавших хотя бы одно событие за период RAW. Наконец, зная вероятности успешной передачи фиксированного числа пакетов за RAW-слот  $m$  и распределение числа сенсоров, задетектировавших хотя бы одно событие за период RAW, находим вероятности переходов между состояниями цепи А.

Рассматривая эволюцию цепи А, находим вероятность  $P_m(D \leq D^{lim}; N_m)$  того, что пакет, находящийся в буфере передатчика выбранного сенсора, не будет вытеснен, а информация, содержащаяся в нем, будет доставлена за время, не превышающее  $D^{lim}$ . Вычисляя сумму  $P(D \leq D^{lim}; N) = \frac{\sum_{m=1}^M N_m \cdot P_m(D \leq D^{lim}; N_m)}{N}$ , обобщаем вероятность на все множество сенсоров.

Рассмотрим произвольное измерение, совершенное выбранным сенсором. Оно не вытеснится из измерительного буфера с вероятностью  $1 - PLR_{rep}$ , которая может быть найдена как отношение среднего числа измерений, попавших в буфер передатчика в конце рассматриваемого периода, и среднего числа измерений, задетектированных выбранным сенсором в течение периода. Сформированный по результатам этого измерения пакет станет успешным с вероятностью  $P(D \leq D^{lim}; N)$ . Тогда долю  $PLR_{all}$  неуспешных измерений, совершенных произвольно выбранным сенсором, можно найти как:

$$PLR_{all} = 1 - (1 - PLR_{rep}) \cdot P(D \leq D^{lim}; N). \quad (2)$$

## 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 1. Параметры сценария.

<i>AIFS</i>	<i>SIFS</i>	<i>DATA</i>	$T_{DATA}$	$T_{ACK}$	$W_{max}$	$\lambda$	<i>N</i>
316 мкс	160 мкс	100 байт	352 мкс	240 мкс	1024	$1 \text{ c}^{-1}$	24

Для получения численных результатов конкретизируем сценарий, описанный в разделе 3. Пусть сенсоры передают данные с помощью самой высокой сигнально-кодовой конструкции MCS8, доступной в канале 2 МГц с одним пространственным потоком, используя короткий защитный интервал (англ.: Guard Interval, GI) [21]. Номинальная скорость передачи данных в таком случае равна 8,7 Мбит/с. Поскольку механизм RTS/CTS не используется, длительность успешной передачи пакета равна длительности коллизии и рассчитывается по формуле  $T_s = AIFS + T_{DATA} + SIFS + T_{ACK}$ , где *AIFS* и *SIFS* являются межкадровыми интервалами, а кадр подтверждения длительностью  $T_{ACK}$  посылается точкой доступа в ответ на успешно принятый пакет. Параметры сценария представлены в таблице 1.

Оценим влияние дисперсии и коэффициента асимметрии на минимальную долю неуспешных измерений  $PLR_{all}^{min}$  или минимальную долю потребляемого механизмом PRAW канального времени  $CTC^{min}$  при заданных ограничениях на задержку доставки каждого пакета. Для этого решим задачу оптимизации 1, связанную с минимизацией доли  $PLR_{all}$  неуспешных измерений при заданных ограничениях на задержку  $D^{lim}$  доставки пакета и долю  $CTC$  потребляемого механизмом PRAW канального времени:

$$PLR_{all}^{min} = \min_{(M, W_0, T_{slot}, T_{per})} PLR_{all},$$

$$\text{s.t. } D \leq D^{lim}, CTC \leq CTC^{lim},$$

и задачу оптимизации 2, связанную с минимизацией доли  $CTC$  потребляемого механизмом PRAW канального времени при заданных ограничениях на задержку  $D^{lim}$  доставки пакета и долю  $PLR_{all}^{lim}$  неуспешных измерений:

$$CTC^{min} = \min_{(M, W_0, T_{slot}, T_{per})} CTC,$$

$$\text{s.t. } D \leq D^{lim}, PLR_{all} < PLR_{all}^{lim}$$

для  $N$  сенсоров, интенсивности генерации событий  $\lambda$  и распределений  $\{F(K)\}$  с заданными первыми тремя моментами  $m_1, m_2$  и  $m_3$ .

Очевидно, что минимумы метрики  $PLR_{all}$ , являющиеся решениями первой задачи оптимизации, достигаются при выделении механизму PRAW наибольшей возможной доли канальных ресурсов  $CTC = CTC^{lim}$ . Минимумы метрики  $CTC$  во второй задаче найдем с помощью бинарного поиска с точностью 0,01. В обоих случаях длительность периода RAW однозначно определяется через параметры  $M, T_{slot}$  и  $CTC$  как  $T_{per} = \frac{M \cdot T_{slot}}{CTC}$ . В работе [4], исследующей надежность доставки информации за ограниченное время в случае некоррелированного трафика, было показано, что локальные минимумы доли пакетов, не доставленных за заданное время, достигаются при выделении всем сенсорам  $M = 1$  или  $M = N$  RAW-слотов. В случае деления интервала RAW на  $M = N$  RAW-слотов все измерения, находящиеся в буфере передатчика, гарантированно доставятся за один период RAW, поскольку каждому сенсору назначается отдельный RAW-слот. Тем не менее в случае низкоинтенсивного ( $\lambda \leq 1 \text{ с}^{-1}$ ) трафика сенсоры редко детектируют события, поэтому выделение для передач сенсоров большого интервала RAW приведет к простоя канала. В данной работе исследуется низкоинтенсивный трафик, поэтому при решении задач оптимизации будем рассматривать только случай с  $M = 1$ . Таким образом, будем решать задачи оптимизации с помощью полного перебора по всем возможным наборам параметров  $(W_0, T_{slot})$ .

Для упрощения оценки будем считать, что влияние моментов четвертого и выше порядков на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  пренебрежимо мало по сравнению с влиянием дисперсии и коэффициента асимметрии. Тогда будем говорить, что на заданные метрики влияет именно дисперсия  $\sigma^2 = m_2$ , если у распределений  $\{F(K)\}$  зафиксированы первый и третий моменты, и влияет именно коэффициент асимметрии  $a_s = \frac{m_3}{\sigma^3}$ , если у соответствующих распределений зафиксированы первые два момента.

### 5.1. Влияние дисперсии распределения на $PLR_{all}^{min}$ и $CTC^{min}$

Рассмотрим известные дискретные распределения с одинаковым средним  $m_1$ , такие как:

– постоянное:

$$F_c(K) = \begin{cases} 1, & K = m_1, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

– равномерное в окне  $2d + 1$ , где  $d$  является таким неотрицательным целым числом, при котором данное окно находится внутри отрезка  $[0, N]$ :

$$F_u(K) = \begin{cases} \frac{1}{2d+1}, & m_1 - d \leq K \leq m_1 + d, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

– биномиальное:

$$F_b(K) = \binom{N}{K} p^K (1-p)^{N-K}, \quad p = \frac{m_1}{N},$$

– распределение Пуассона при ограниченном сверху множестве значений  $K$ :

$$F_p(K) = \begin{cases} \frac{\frac{m_1^K}{K!} e^{-m_1}}{\sum_{i=0}^N \frac{m_1^i}{i!} e^{-m_1}}, & K \leq N, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Оценим влияние дисперсии данных распределений на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ . Для оценки влияния именно дисперсии необходимо, чтобы данные распределения обладали совпадающими (или близкими) по значению коэффициентами асимметрии. Такой результат для  $N = 24$  сенсоров достигим при рассмотрении  $m_1 = 12$ , поскольку в данном случае биномиальное распределение, так же, как и постоянное и равномерное в окне, оказывается симметричным ( $a_s = 0$ ). В таблице 2 приведены результаты решения задач оптимизации для близких между собой значений коэффициента асимметрии  $a_s = \frac{m_3}{\sigma^3}$  (где  $\sigma^2 = m_2$  является дисперсией или же вторым моментом), ограничения на задержку  $D^{lim} = 120$  мс, ограничения на долю потребляемых канальных ресурсов  $CTC^{lim} = 0,4$  (задача 1) и ограничения  $PLR_{all}^{lim} = 10^{-2}$  на долю неуспешных измерений (задача 2).

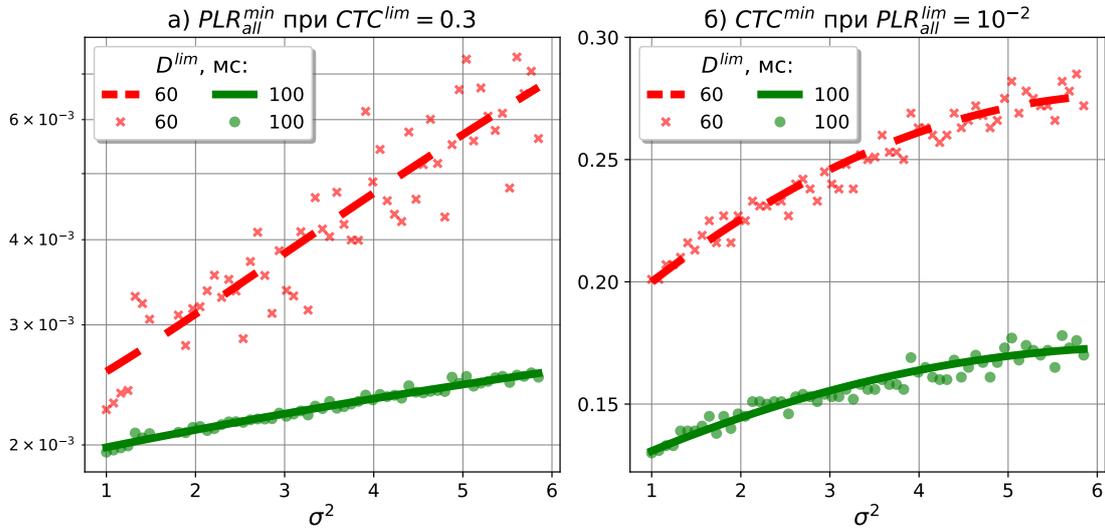
**Таблица 2.** Влияние дисперсии известных дискретных распределений на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$

Распределение	$\sigma^2 = m_2$	$a_s$	задача 1: $PLR_{all}^{min}$	задача 2: $CTC^{min}$
$\{F_c(K)\}$	0	0	$1,19 \times 10^{-2}$	0,53
$\{F_u(K)\}, d = 2$	2	0	$1,22 \times 10^{-2}$	0,55
$\{F_b(K)\}$	6	0	$1,25 \times 10^{-2}$	0,59
$\{F_p(K)\}$	12	0,26	$1,31 \times 10^{-2}$	0,63

Поскольку почти для всех рассматриваемых распределений коэффициенты асимметрии совпадают и равны 0, а при  $a_s = 0,26$  в случае пуассоновского распределения асимметрия считается незначительной, можно считать, что вклад в изменение метрик  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ , наблюдаемый в таблице 2, вносит именно дисперсия. Отметим, что с ростом дисперсии значения обеих метрик  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  ухудшаются. Однако изменение  $PLR_{all}^{min}$  при рассматриваемых наборах входных параметров оказывается незначительным. Более чувствительна к изменению дисперсии при рассматриваемых наборах входных параметров метрика  $CTC^{min}$ : при изменении дисперсии с 0 до 12 минимальная доля потребляемых механизмом PRAW канальных ресурсов, при которой обеспечивается надежность  $PLR_{all}^{lim} = 10^{-2}$ , увеличивается на 19%.

Описанные выше дискретные распределения имеют ограниченное множество значений дисперсии. Для более точной оценки влияния дисперсии перейдем к рассмотрению случайных распределений с заданными первым и третьим моментами. Данные распределения получены как решение системы линейных алгебраических уравнений с вектором-столбцом свободных коэффициентов, состоящим из заданных первого и третьего моментов и случайных чисел. На

рис. 1а,б приведены результаты решения задач оптимизации для  $m_1 = 4$ ,  $m_3 = 0$ . Маркерами обозначены значения метрик случайных распределений. Линии тренда на рис. 1а,б получены с помощью квадратичной аппроксимации.



**Рис. 1.** Зависимости (а) минимальной доли  $PLR_{all}^{min}$  неуспешных измерений и (б) минимальной доли  $CTC^{min}$  потребляемого механизмом PRAW канального времени от дисперсии  $\sigma^2$  случайных распределений с  $m_1 = 4$  и  $m_3 = 0$ .

Наблюдаемая при оценке влияния известных дискретных распределений на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  тенденция к ухудшению обеих метрик при увеличении дисперсии сохраняется при рассмотрении более частой выборки  $1 \leq \sigma^2 \leq 6$ : кривые  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  на рис. 1а,б расположились в порядке возрастания дисперсии соответствующих им распределений. При этом более строгим ограничениям на задержку  $D^{lim}$  соответствует более резкий рост кривых. В частности, при  $D^{lim} = 60$  мс и увеличении дисперсии с  $\sigma^2 = 1$  до  $\sigma^2 \approx 6$  значения  $PLR_{all}^{min}$  увеличиваются в примерно 2 раза, а доля  $CTC^{min}$  увеличивается на 35%.

Отметим, что при усилении ограничения  $D^{lim}$  увеличивается относительное отклонение точек  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  от линии тренда. Данные отклонения обусловлены влиянием моментов четвертого и выше порядков, которые в рассматриваемых распределениях не фиксированы и принимают произвольные значения.

### 5.2. Влияние коэффициента асимметрии распределения на $PLR_{all}^{min}$ и $CTC^{min}$

Оценим, как коэффициент асимметрии  $a_s = \frac{m_3}{\sigma^3}$ , связанный со вторым и третьим моментами, влияет на качество обслуживания сенсорной сети. Аналогично разделу 5.1, оценим влияние  $a_s$  известных дискретных распределений, а далее обобщим полученные выводы на случайные распределения с заданными первыми двумя моментами.

В таблицах 3, 4 приведены результаты решения задач оптимизации для ограничения на долю потребляемых канальных ресурсов  $CTC^{lim} = 0,2$  (задача 1) и ограничения на задержку  $D^{lim} = 100$  мс (задача 2). В отличие от раздела 5.1, в данном разделе необходимо рассматривать дискретные распределения с одинаковыми дисперсиями и разными коэффициентами асимметрии. Такой результат достигается, например, при выборе параметра  $m_1 = 4$ , при котором второй момент сразу двух известных дискретных распределений, ограниченного справа пуассоновского и равномерного в окне  $d = 3$ , равен 4.

Таблица 3. Влияние коэффициента асимметрии известных дискретных распределений на  $PLR_{all}^{min}$

Распределение	$a_s = \frac{m_3}{\sigma^3}$	$D^{lim}$ , мс	$PLR_{all}^{min}$
$\{F_u(K)\}$ , $d = 3$	0	60	$2,3 \times 10^{-2}$
$\{F_p(K)\}$	0,5	60	$3,6 \times 10^{-2}$
$\{F_u(K)\}$ , $d = 3$	0	100	$4 \times 10^{-3}$
$\{F_p(K)\}$	0,5	100	$5 \times 10^{-3}$

Таблица 4. Влияние коэффициента асимметрии известных дискретных распределений на  $CTC^{min}$

Распределение	$a_s = \frac{m_3}{\sigma^3}$	$PLR_{all}^{lim}$	$CTC^{min}$
$\{F_u(K)\}$ , $d = 3$	0	$10^{-2}$	0,16
$\{F_p(K)\}$	0,5	$10^{-2}$	0,17
$\{F_u(K)\}$ , $d = 3$	0	$5 \times 10^{-3}$	0,19
$\{F_p(K)\}$	0,5	$5 \times 10^{-3}$	0,20
$\{F_u(K)\}$ , $d = 3$	0	$10^{-3}$	0,7
$\{F_p(K)\}$	0,5	$10^{-3}$	0,7

Аналогично результатам, приведенным в таблице 2 для задачи 1 и на рис. 1а, влияние коэффициента асимметрии на метрику  $PLR_{all}^{min}$  при рассматриваемых наборах входных параметров оказывается незначительным. Тем не менее, в противовес результатам, приведенным в таблице 2 для задачи 2 и на рис. 1б, незначительным оказывается также влияние  $a_s$  на  $CTC^{min}$ . Для рассмотрения расширенного множества значений  $a_s$  и оценки их влияния на  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  в случае, когда коэффициент асимметрии изменяется сильно, воспользуемся случайными распределениями с заданными первыми двумя моментами.

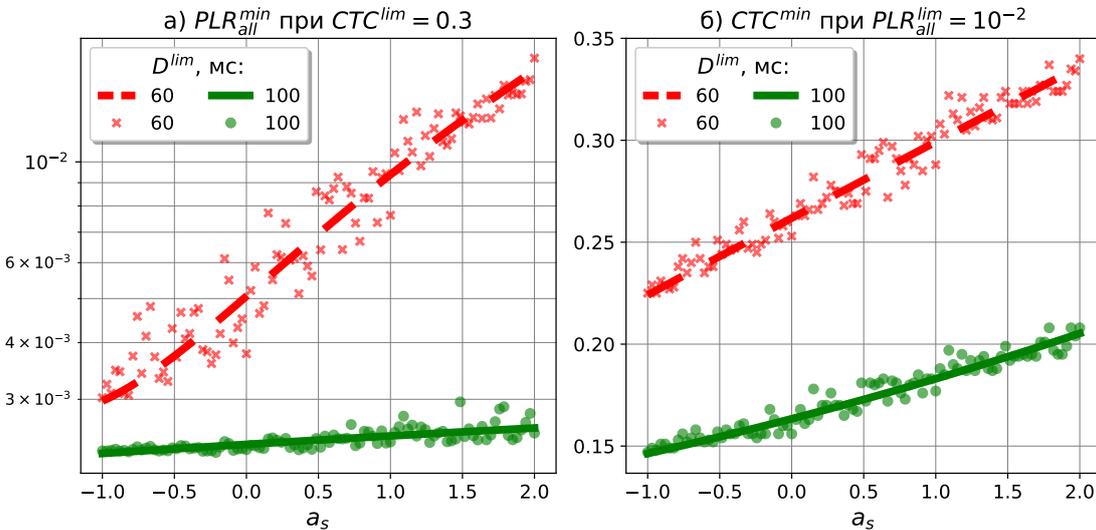


Рис. 2. Зависимости (а) минимальной доли  $PLR_{all}^{min}$  неуспешных измерений и (б) минимальной доли  $CTC^{min}$  потребляемого механизмом PRAW канального времени от коэффициента асимметрии  $a_s$  случайных распределений с  $m_1 = 4$  и  $m_2 = 4$ .

На рис. 2а,б приведены результаты решения задач оптимизации, когда в качестве распределений  $\{F(K)\}$  рассматривались случайные распределения, у которых были зафиксированы первые два момента  $m_1 = 4$  и  $m_2 = 4$ . Линии тренда на рис. 2а,б получены с помощью квад-

ратичной аппроксимации, аналогично результатам на рис. 1а,б. Общая тенденция кривых на рис. 2а,б заключается в росте метрик  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  при увеличении коэффициента асимметрии. Более строгому ограничению  $D^{lim} = 60$  мс соответствует более резкий рост. Так, например, при увеличении коэффициента асимметрии с  $a_s = -1$  до  $a_s = 2$  при ограничении на задержку  $D^{lim} = 60$  мс метрика  $PLR_{all}^{min}$  ухудшается почти на порядок ( $3 \times 10^{-3}$  при  $a_s = -1$  и  $1,7 \times 10^{-2}$  при  $a_s = 2$ ), а метрика  $CTC^{min}$  увеличивается на 50%. Аналогично результатам 5.1, менее строгому ограничению на задержку соответствуют более пологие кривые  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ .

Таким образом, метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  также оказываются чувствительными к изменению  $a_s$  при фиксированных первых двух моментах. С ростом коэффициента асимметрии повышается вероятность одновременного детектирования некоторого события большим числом сенсоров, способным значительно превышать значение первого момента. Увеличение этой вероятности может привести к повышенной конкуренции за доступ к каналу и, следовательно, увеличению задержки доставки пакета, что негативно влияет на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ .

При высоких значениях дисперсии отклонения от среднего значения могут наблюдаться как в сторону увеличения числа одновременно детектирующих событие сенсоров, так и в сторону его уменьшения, которое будет уменьшать конкуренцию за доступ к каналу и может положительно влиять на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ . Высокое значение коэффициента асимметрии может быть обусловлено только наличием у соответствующего распределения длинного правого хвоста, который увеличивает  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ . Таким образом, можно предположить, что влияние коэффициента асимметрии на надежность передачи данных за ограниченное время оказывается весомее влияния дисперсии.

Влияние моментов четвертого и выше порядков рассматриваемых на рис. 2а,б случайных распределений отражается в дрожании значений  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ . При этом более строгому ограничению  $D^{lim} = 60$  мс соответствует более сильное относительное отклонение точек от линии тренда. Для получения более точной линии тренда можно увеличить размер выборки и/или изменить тип аппроксимации. Для более точного исследования влияния конкретного момента в случае строгих ограничений на задержку  $D^{lim}$  необходимо также фиксировать моменты четвертого и выше порядков.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была исследована передача данных, чувствительных к задержке, с помощью механизма периодического окна ограниченного доступа PRAW в гетерогенных сетях в реальном сценарии, в котором события детектируются сразу несколькими сенсорами, а информация о событиях может теряться из-за вытеснения из буферов конечных размеров.

Распределение  $\{F(K)\}$  числа  $K$  сенсоров, одновременно детектирующих каждое событие, в общем случае зависит от сценария, а также от расположения сенсоров на производственной площади и их чувствительности. Для выявления общих зависимостей и оценки чувствительных к задержке и надежности метрик в случае коррелированного детектирования можно группировать распределения по совпадающим первым моментам и считать, что влияние распределений внутри фиксированной группы примерно одинаково.

В работе [1] было показано, что первый момент распределения  $\{F(K)\}$  при фиксированных остальных моментах (в этой работе второй и выше моменты равнялись 0) существенно влияет на минимальные значения доли пакетов, доставленных за ограниченное время. В данной работе было исследовано влияние дисперсии и коэффициента асимметрии распределений  $\{F(K)\}$  на:

- 1) минимальные значения  $PLR_{all}^{min}$  доли  $PLR_{all}$  измерений, вытесненных из буферов конечных размеров или не доставленных за ограниченное время, при ограничении на долю  $CTC$  потребляемого механизмом PRAW канального времени;
- 2) минимальные значения  $CTC^{min}$  доли  $CTC$  потребляемого механизмом PRAW канального времени при выполнении ограничений на  $PLR_{all}$ .

В работе было показано, что дисперсия и коэффициент асимметрии в значительной степени влияют на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$ . При строгих ограничениях на задержку  $D^{lim} \leq 60$  мс метрика  $PLR_{all}^{min}$  может ухудшаться на порядок, а увеличение метрики  $CTC^{min}$  в некоторых случаях может достигать 50%. Кроме того, при строгих ограничениях  $D^{lim} \leq 60$  мс на метрики  $PLR_{all}^{min}$  и  $CTC^{min}$  также оказывают влияние моменты четвертого и выше порядков.

Таким образом, для получения точной оценки качества обслуживания сенсорной сети, связанной с надежной доставкой информации за ограниченное время, необходимо задавать распределения  $\{F(K)\}$  как минимум первыми тремя моментами. В случае строгих ограничений на задержку  $D^{lim} \leq 60$  мс необходимо также учитывать влияние четвертого и выше моментов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлапак М.В., Ляхов А.И., Анализ производительности механизма PRAW в сетях 802.11ah при коррелированном детектировании событий. Сборник трудов 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Радиотехника и компьютерные технологии, 2024.
2. Кротов А.В., Хоров Е.М., Передача данных межмашинного взаимодействия в сетях Wi-Fi HaLow. Сборник трудов 40-й междисциплинарной школы-конференции ИПФИ РАН, 2016.
3. Хоров Е.М., Кротов А.В. Модель передачи одиночных пакетов с помощью периодического окна ограниченного доступа в сетях Wi-Fi HaLow. Проблемы передачи информации, 2024, т. 60, № 3.
4. Шлапак М.В., Ляхов А.И., Распределение задержки доставки пакета с помощью периодического окна ограниченного доступа со слотами произвольной длительности. Сборник трудов 47-й междисциплинарной школы-конференции ИПФИ РАН, 2023.
5. Park C.W., Hwang D., Lee T.J., Enhancement of IEEE 802.11 ah MAC for M2M communications. IEEE Communications Letters, 2014, vol. 7, pp. 1151-1154.
6. Zheng L. et al., Performance analysis of group-synchronized DCF for dense IEEE 802.11 networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, vol. 13, no. 11, pp. 6180-6192.
7. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A., Yusupov R., Condoluci M., Dohler M., Akyildiz I., Enabling the Internet of Things with Wi-Fi HaLow: Performance Evaluation of the Restricted Access Window. IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 127402-127415.
8. Wang Y., Chai K.K., Chen Y., Schormans J., Loo J, Energy-Aware Restricted Access Window Control with Retransmission Scheme for IEEE 802.11 ah (Wi-Fi HaLow) Based Networks. 13th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS), 2017, pp. 69-76.
9. Bel A., Adame T., Bellalta B., An Energy Consumption Model for IEEE 802.11ah WLANs. Ad Hoc Networks, 2018, vol. 72, pp. 14-26.
10. Ali M.Z., Mišić J., Mišić V.B. Efficiency of Restricted Access Window Scheme of IEEE 802.11 ah Under Non-Ideal Channel Condition. IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), 2018, pp. 251-256.
11. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., Famaey J., Resource Allocation for Machine-Type Communication of Energy-Harvesting Devices in Wi-Fi HaLow Networks. Sensors, 2020, vol. 20, no. 9, p. 2449.
12. Khorov E., Lyakhov A., Nasedkin I., Yusupov R., Famaey J., Akyildiz I.F., Fast and Reliable Alert Delivery in Mission-Critical Wi-Fi HaLow Sensor Networks. IEEE Access, 2020, vol. 8, p. 14302-14313.

13. Zazhigina E., Yusupov R., Lyakhov A., Khorov E., Analytical Study of Restricted Access Window With Short Slots for Fast and Reliable Data Delivery From Energy-Harvesting Sensors. *Computer Networks*, 2024, p. 110573.
14. Zazhigina E., Yusupov R., Khorov ., Lyakhov A., Analytical Study of Periodic Restricted Access Window Mechanism for Short Slots. *MDPI Electronics*, 2021, vol. 10, no. 5, p. 549.
15. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A., Modelling Machine Type Communication in IEEE 802.11ah Networks. *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, p. 1149–1154.
16. Shlapak M., Yusupov R., Lyakhov A., Performance Study of the PRAW Mechanism with Slots of Arbitrary Duration in Wi-Fi HaLow Networks. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2024, pp. 1–12.
17. Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю., Моисеев В.И., Неординарные пуассоновские модели трафика мультисервисных сетей. *Проблемы передачи информации*, 2023, т. 59, № 1, стр. 71–79.
18. Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю., Обобщение формул для моментов очереди при неординарном пуассоновском потоке для очередей пакетов в системах телекоммуникаций. *Проблемы передачи информации*, 2023, т. 59, № 4, стр. 32–37.
19. Yoon S.G., Seo J., Bahk S., Regrouping Algorithm to Alleviate the Hidden Node Problem in 802.11ah Networks. *Computer Networks*, 2016, vol. 105, pp. 22–32.
20. Nishida R., Shimokawa M., Sanada K., Hatano H., Mori K., A Station Grouping Method for IEEE 802.11ah Networks with Various Types of Network Non-Uniformity. *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 35–49.
21. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A., Guschin A., A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities. *Computer communications*, 2015, vol. 58, pp. 53–69.

## The impact of the type of correlated event detection on the reliability of the limited-time information delivery using the PRAW mechanism

M.V. Shlapak, A.I. Lyakhov, E.M. Khorov

One of the ways to ensure fast and reliable information delivery from sensors operating in heterogeneous wireless networks is to use Wi-Fi HaLow technology, and, in particular, the Periodic Restricted Access Window (PRAW) mechanism. Most studies investigating PRAW in scenarios of reliable information delivery within a limited time assume that traffic generated at the sensors is not correlated. However, in real-world scenarios there are often situations where the same event causing traffic is detected simultaneously by multiple sensors. In this paper, we use analytical modelling to investigate the impact of the dispersion and asymmetry coefficient of the distribution of sensors simultaneously detecting an event on the reliability of information delivery within the limited time using PRAW.

**KEYWORDS:** heterogeneous networks, IEEE 802.11ah, RAW, correlated event detection, delay distribution.