

## Оценка емкости сети Wi-Fi при использовании окна ограниченного доступа с короткими слотами

Е.А. Зажигина<sup>\*,\*\*</sup>, Р.Р. Юсупов<sup>\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*</sup>, А.И. Ляхов<sup>\*</sup>

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

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

Поступила в редколлегию 27.10.2022 г.

**Аннотация**—С развитием Интернета вещей возникает задача обеспечения связью большого количества устройств, одновременно подключенных к сети. Увеличение числа одновременно подключенных станций ведет к возрастанию конкуренции за доступ к каналу и замедлению передачи данных. В стандарте IEEE 802.11ah введен механизм окна ограниченного доступа, позволяющий снизить конкуренцию за доступ к каналу посредством резервирования интервала времени для передач определенной группы станций. Целью данной работы является нахождение емкости сети — максимально допустимого числа станций, передающих в окне ограниченного доступа, для которого удастся выполнить требования к надежности и задержке доставки данных при заданных ограничениях на каналный ресурс и интенсивности генерации кадров. Для определения емкости сети в статье разрабатывается аналитическая модель обслуживания разреженного трафика с использованием периодического окна ограниченного доступа, состоящего из коротких слотов. Затем решается задача оптимизации параметров механизма периодического окна ограниченного доступа.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** IEEE 802.11ah, Интернет вещей, окно ограниченного доступа, математическое моделирование.

**DOI:** 10.53921/18195822\_2022\_22\_4\_276

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Интернет вещей все более плотно входит в повседневную жизнь: развиваются умные города, умное производство и другие отрасли. Популярная беспроводная технология Wi-Fi была адаптирована для сценариев Интернета вещей в стандарте IEEE 802.11ah, где поддерживается до восьми тысяч одновременно подключенных к точке доступа станций, распределенных в области радиусом до 1 км. Большое число станций, одновременно подключенных к точке доступа, приводит к высокой конкуренции за доступ к каналу. Результатом такой конкуренции являются коллизии кадров и большая задержка, что представляет проблему для сетей Wi-Fi.

В стандарте IEEE 802.11ah вводится механизм окна ограниченного доступа (англ.: Restricted Access Window, RAW), который способен решить проблему высокой конкуренции за доступ к каналу в сетях Интернета вещей. При использовании механизма RAW выделяется интервал RAW, разделенный на RAW-слоты, в каждом из которых передает данные только соответствующая группа станций. Передача данных внутри RAW-слота происходит согласно базовому для сетей Wi-Fi методу случайного доступа, однако за счет ограничения числа станций, одновременно пытающихся получить доступ к каналу, использование механизма RAW снижает конкуренцию за доступ к каналу. Информация о параметрах механизма RAW, таких, как длительность RAW-слота, число RAW-слотов, число станций, имеющих право передавать в RAW-слоте, рассылается посредством бикон-кадров (англ.: beacon frame). Для снижения накладных расходов на рассылку этой информации можно единожды установить периодическое RAW (англ.: Periodic Restricted Access Window, PRAW), см. рис. 1.

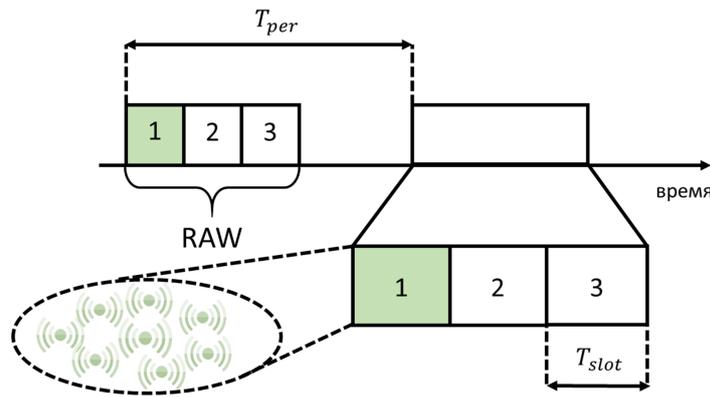


Рис. 1. Пример периодического RAW с тремя RAW-слотами.

Существует большое количество сценариев применения механизма RAW, в каждом из которых по-разному выбираются параметры этого механизма. В рамках данной работы рассматривается гетерогенная сеть 802.11ah, где сосуществуют как обычные станции, генерирующие насыщенный трафик, т.е. всегда имеющие данные на передачу, так и сенсорные станции, асинхронно передающие редко генерируемые кадры. Если для обычных станций важна пропускная способность сети, то для сенсорных станций существенными становятся задержка доставки и доля недоставленных кадров. При конкуренции с обычными станциями сложно обеспечить низкие значения задержки и доли недоставленных кадров, поэтому для улучшения этих метрик выделяется периодическое RAW, где за доступ к каналу конкурируют только сенсорные станции.

В работе рассматривается сценарий *быстрой и надежной* доставки данных от каждого сенсора за несколько периодов RAW. При этом под быстрой и надежной доставкой понимается требование доставить кадр за заданное время с вероятностью не менее заданной. Такой сценарий, в частности, характерен для датчиков температуры, каждый из которых замеряет температуру одного из множества различных термостатов на производственном предприятии. По достижении некоторого порога температуры необходимо оповестить центр управления о перегреве. Кадры с информацией о температуре должны быть доставлены как можно скорее и не должны быть утеряны.

В работе оценивается емкость сети — максимально допустимое число сенсоров, передающих в окне ограниченного доступа, для которого удастся выполнить требования на надежность и задержку при заданном ограничении на каналный ресурс и заданной интенсивности генерации кадров. На текущий момент не было исследований, в которых оценивалась бы емкость сети в сценарии быстрой и надежной доставки данных от каждой станции за несколько периодов RAW. Принимая во внимание большую мощность множества значений параметров механизма PRAW, поиск по этому множеству параметров с целью определения емкости сети удобно делать с использованием аналитического моделирования.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится описание метода случайного доступа, используемого в RAW, и обзор работ, аналитически исследующих RAW, с объяснением, почему описанные в этих работах подходы не могут быть применены для решения обозначенной задачи. Далее в разделах 3 и 4 приводится описание рассматриваемого сценария и строится аналитическая модель. В разделе 5 представлены полученные с помощью построенной модели результаты исследования зависимости емкости сети от требований к вероятности доставки кадров и задержке, доли выделенного каналного времени и интенсивности генерации кадров. Затем в разделе 6 подводятся итоги работы.

## 2. СЛУЧАЙНЫЙ ДОСТУП В RAW И ЕГО АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 2.1. Метод случайного доступа EDCA

Внутри RAW-слотов передача кадров происходит согласно механизму EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access), который основывается на механизме множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA) и механизме двоичной экспоненциальной отсрочки. Процедура получения доступа к каналу состоит в следующем: в начале каждого RAW-слота каждая станция из выделенной группы, имеющая пакет на передачу, инициализирует счетчик отсрочки целым числом, выбранным равновероятно из интервала  $[0; W_0 - 1]$ , где  $W_0$  — минимальное конкурентное окно. Затем станции прослушивают канал в течение времени  $T_e$  и, если канал свободен, то уменьшают счетчик отсрочки на единицу. Если канал занят, то счетчики отсрочки замораживаются и отсчет возобновляется, когда канал освободится. При обнулении счетчика отсрочки происходит попытка передачи кадра данных, которая считается успешной при получении кадра подтверждения. Если несколько станций совершают одновременную попытку передачи, то передаваемые кадры попадают в коллизию и не могут быть приняты. В случае неудачной попытки передачи кадра станция удваивает конкурентное окно, увеличивает на единицу счетчик повторных передач и выбирает новое значение счетчика отсрочки. По достижении ограничения на число повторных попыток передач  $R$  кадр отбрасывается. Если времени до конца RAW-слота не хватает на завершение попытки передачи, то станция не начинает передавать. В следующем RAW-слоте этой же станции конкурентное окно возвращается к значению  $W_0$ , однако счетчик повторных передач кадра не меняется.

### 2.2. Обзор работ

С момента своего появления в стандарте IEEE 802.11ah механизм RAW привлек внимание многих исследователей. Перед тем, как вышла финальная версия стандарта IEEE 802.11ah, многие работы аналитически исследовали механизм Group-Synchronized Distributed Coordination

Function (GS-DCF), который является механизмом RAW, но с сохранением значения счетчика отсрочки и размера конкурентного окна между выделенными для одной и той же станции RAW-слотами [1–5]. Во многих работах производительность механизма RAW оценивается по пропускной способности, задержке и энергопотреблению в предположении насыщенного трафика [1–10].

Для сценариев Интернета вещей обычно характерен разреженный трафик, исследуемый в работах [11–20]. В некоторых работах [11, 12] применяются другие методы доступа в RAW, отличные от метода EDCA, в то время как в работах [13–20] исследуется метод EDCA, причем учитывается сброс размера конкурентного окна в начале RAW-слота и конечная длина RAW-слота в сценарии разреженного трафика. Авторы [13, 14] полагают, что вероятность передачи не зависит от времени, что применимо только в случае очень длинных RAW-слотов.

Для описания поведения сети в работах [15–19] рассматривается эволюция многомерных марковских цепей с дискретным временем, что требует немалых вычислительных ресурсов. Авторы [15–17] адаптируют модель из [18] для оценки пропускной способности, энергопотребления и доли отброшенных пакетов при ограничении на задержку в один период RAW. В работе [19] разработана модель для сценария быстрой и надежной доставки данных от любой из станций сети в случае разреженного трафика. Работы [15, 19] показали, что RAW-слоты малой длительности являются квазиоптимальными в терминах средней задержки для разреженного трафика. Модель из [20] позволяет в явном виде оценить среднюю мощность, потреб-

ляемую станцией, и среднюю задержку для случая коротких RAW-слотов, т.е. RAW-слотов, длительности которых достаточно только для одной попытки передачи.

Таким образом, существует множество работ, исследующих RAW в предположении насыщенного трафика, в то время как для Интернета вещей характерен разреженный трафик. При этом в некоторых работах не учитываются нюансы механизма RAW, прописанные в стандарте, такие как передача данных согласно методу EDCA и сброс счетчика отсрочки в начале RAW-слота. Другие авторы рассматривали быструю и надежную доставку данных от любой станции из множества, тогда как быстрая и надежная доставка кадров от каждой станции не рассматривалась. Также в некоторых работах ставилось ограничение на задержку в один период RAW, в то время как передача в течение нескольких периодов допускалась только в [20]. В этом исследовании рассматривается разреженный трафик, PRAW и короткие RAW-слоты, в предположении которых строится аналитическая модель, основанная на модели из [20], но в отличие от нее позволяющая найти распределение времени доставки данных от каждой станции.

### 3. ОПИСАНИЕ СЦЕНАРИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается гетерогенная сеть со станциями разных типов: сенсорами, требующими быстрой и надежной доставки данных при ненасыщенном трафике, и обычными станциями, которые работают в режиме насыщения, т.е. всегда имеют кадры на передачу. Из-за того, что обычные станции обслуживают насыщенный трафик, сенсорам сложнее получить доступ к каналу для своих передач, что является причиной больших задержек кадров в сети и вовсе их утери [21].

Число сенсоров далее обозначается как  $N$ . Все станции находятся в зоне слышимости друг друга, т.е. скрытых станций нет. Отсутствия скрытых станций при использовании механизма PRAW можно достичь, используя, например, методы группировки, описанные в [22, 23]. Влияние шума на передачи не рассматривается. Все кадры сенсоров имеют одинаковый размер и передаются с одинаковой сигнально-кодовой конструкцией. Из-за своей простоты сенсоры могут иметь только один кадр в очереди. Рассматривается следующая модель трафика сенсоров, осуществляющих редкие замеры параметров окружающей среды и передающих результаты замеров точке доступа: время после окончания обслуживания кадра до генерации нового подчиняется экспоненциальному распределению с интенсивностью  $\lambda$ .

Для защиты сенсоров от конкуренции с обычными станциями точка доступа выделяет периодическое окно ограниченного доступа с  $M$  RAW-слотами, где каждому RAW-слоту соответствует какая-то группа сенсоров, и периодом  $T_{per}$ . Обычные станции передают вне периодического RAW, их производительность не рассматривается. Для экономии энергии сенсорами механизм PRAW можно использовать совместно с механизмом TWT (англ.: Target Wake Time, TWT), согласно которому точка доступа определяет расписание для сенсоров: когда они могут передавать данные и слушать канал, и когда они находятся в спящем состоянии. Если сенсоры имеют кадр на передачу перед началом RAW-слота, то они «просыпаются» перед назначенным RAW-слотом и пытаются его передать, а в конце RAW-слота сенсоры «засыпают». Поскольку трафик сенсоров является разреженным, используются короткие RAW-слоты — RAW-слоты, длительности которых достаточно только для одной попытки передачи кадров. Если перед попыткой передачи выясняется, что длительности RAW-слота для ее окончания не хватает, то сенсор «засыпает» раньше номинального конца RAW-слота до следующего назначенного RAW-слота. Если кадр генерируется в течение RAW-слота, то сенсор откладывает попытку передачи до следующего периода RAW: несмотря на то, что увеличивается время нахождения кадра в очереди, экономится потребление энергии, так как не будет происходить прослушивания передач других сенсоров, у которых большая вероятность начать передачу.

Задержкой назовем время, которое прошло с момента генерации сенсором кадра до его успешной доставки. Под потреблением канального времени подразумевается доля канального времени, занимаемая механизмом PRAW. В отличие от [20], рассматривается надежная доставка данных, т.е. обеспечение доставки кадров с вероятностью  $P_{lim}$  за время меньше, чем  $D_{lim}$ . Выделение сенсорам PRAW позволяет защитить сенсоры от конкуренции за доступ к каналу с обычными станциями, однако уменьшает канальное время, доступное обычным станциям, что приводит к уменьшению пропускной способности сети для обычных станций. В данной работе рассматривается выделение фиксированной доли канального времени для используемого сенсорами PRAW, при этом необходимо обслужить с использованием механизма PRAW как можно большее число сенсоров. Возникает задача оценки и исследования емкости сети в зависимости от накладываемых ограничений на качество обслуживания, интенсивности генерации кадров  $\lambda$  и доли канального ресурса, выделенной для механизма PRAW. Для решения этой задачи в следующем разделе разрабатывается аналитическая модель, позволяющая найти функцию распределения вероятности задержки.

#### 4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для решения поставленной выше задачи разрабатывается аналитическая модель процессов передачи внутри RAW с учетом возможности передачи одного кадра в нескольких последовательных периодах RAW. При описании модели используется введенное в [24, 25] понятие виртуального слота — интервала времени между последовательными изменениями счетчика отсрочки. Виртуальный слот может содержать либо успешную или коллизионную попытку передачи, либо быть пустым. Длительности попытки передачи и пустого виртуального слота обозначим как  $T_{TX}$  и  $T_e$  соответственно.

В силу того, что рассматриваются короткие RAW-слоты, вмещающие не более одной попытки передачи, длительность RAW-слота может быть параметризована как  $T_{slot} = T_{TX} + K \cdot T_e$ , где  $K$  — максимальное число пустых виртуальных слотов в RAW-слоте. Каждый RAW-слот с номером  $m$  выделяется для передачи группы из  $N_m$  сенсоров, причем  $m = 1 \dots M$ ,  $\sum_{m=1}^M N_m = N$ . Потребление канального ресурса  $CTC$  (англ.: channel time consumption), по определению, — отношение  $\frac{T_{slot} \cdot M}{T_{per}}$ . Все RAW-слоты рассматриваются независимо друг от друга, так как передача на границах RAW-слотов запрещена. Поэтому разрабатывается модель для одного RAW-слота, которая затем расширяется для случая нескольких RAW-слотов, т.е. рассмотрение начинается с анализа поведения группы сенсоров размером  $N_m$  в RAW-слоте  $m$ .

Аналитическая модель представляет собой расширенную модель из [20]. Поведение группы сенсоров в этой работе описывается с помощью цепи Маркова с дискретным временем и состоянием  $n$ , где  $n$  — число активных сенсоров (имеющих кадр для передачи) на момент начала RAW-слота, а единицей времени является период RAW. Между двумя последовательными наблюдениями сети число активных сенсоров может уменьшиться на единицу (поскольку за короткий RAW-слот может успешно передать не более одного сенсора), остаться таким же или увеличиться вплоть до  $N_m$ . Далее для нахождения вероятностей таких переходов комбинаторными методами вычисляется вероятность успешной передачи, коллизии или отсутствия передачи в RAW-слоте. С помощью системы уравнений глобального баланса, используя тот факт, что часть матрицы переходных вероятностей, которая расположена ниже главной диагонали, содержит нули, получается стационарное распределение числа активных сенсоров на момент начала RAW-слота. Из стационарного распределения получается среднее число сгенерированных кадров за период RAW, равное среднему числу кадров, переданных за период RAW.

Задержка зависит от двух случайных величин: времени, прошедшего с момента генерации кадра до первого RAW-слота, где он может передаваться (распределение этой величины известно), и числа периодов RAW, в течение которых кадр передается. Для нахождения распределения числа периодов рассматривается переходный процесс цепи Маркова с теми же моментами наблюдений, и состояниями, соответствующими количеству активных сенсоров за исключением рассматриваемого произвольно выбранного активного сенсора. Полагается, что в момент поступления кадра в пустую очередь выбранного сенсора установилось такое распределение числа активных сенсоров, помимо выбранного, которое соответствует стационарному распределению числа активных сенсоров в начале RAW-слота в группе из  $N_m - 1$  сенсоров. Это связано с тем, что до генерации кадра на выбранном сенсоре группа сенсоров вела себя так, будто бы выбранного сенсора и не было в этой группе. Используя два полученных распределения, выводится выражение для вероятности того, что задержка  $D$  не превышает ограничение  $D_{lim}$ :  $\mathcal{P}(D \leq D_{lim}; M, T_{slot}, T_{per}, W_0, N, \lambda)$ .

## 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

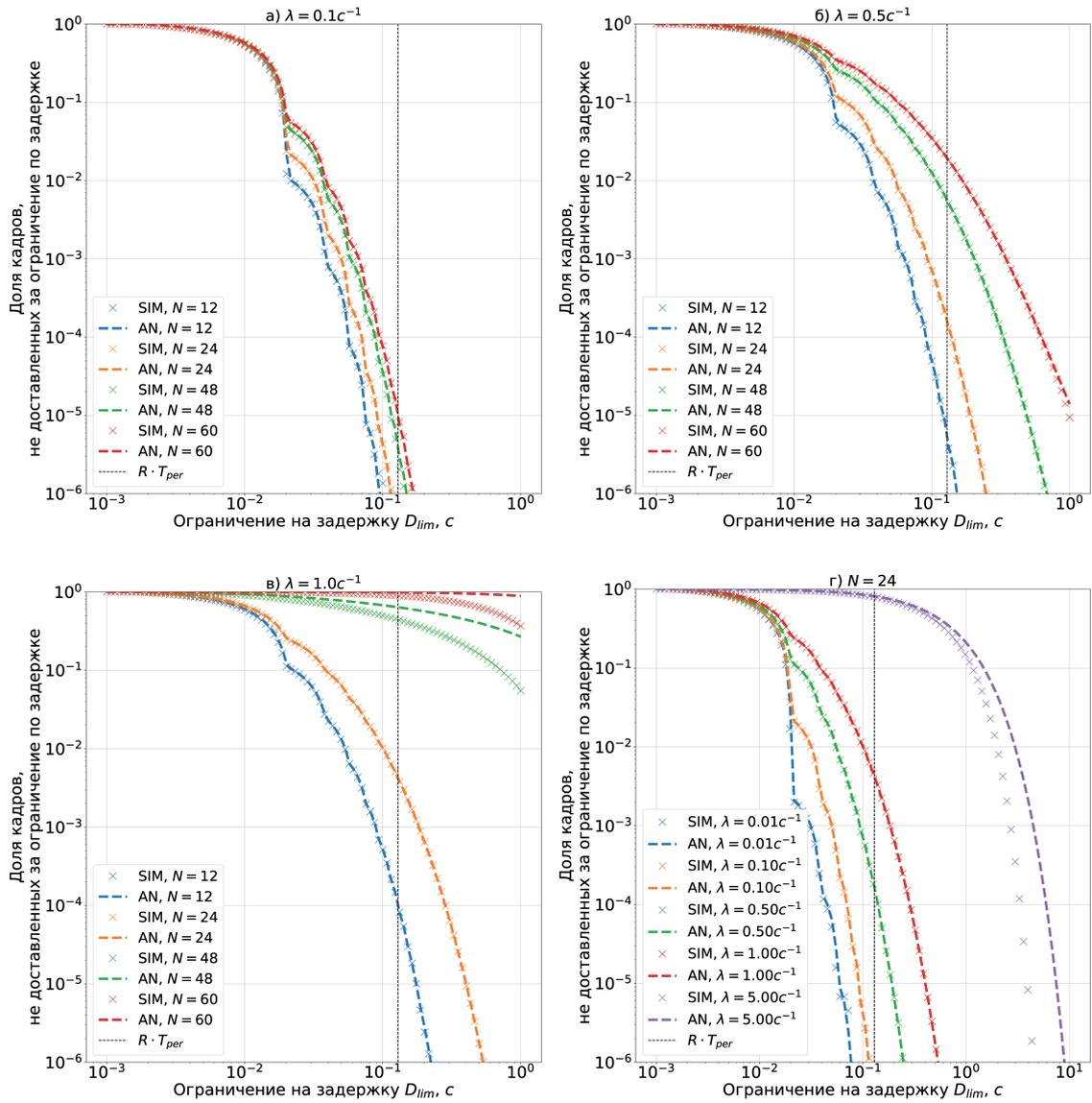
Пусть в сети передаются короткие кадры с полезной нагрузкой размера  $l = 100$  байт на СКК с индексом 8 в канале шириной 2 МГц. Длительности передачи  $T_{TX}$  и пустого виртуального слота  $T_e$  равны 1064 и 52 мкс, соответственно.

### 5.1. Оценка точности модели

Проведем оценку точности полученной модели, сравнив результаты, полученные с помощью аналитической модели и средств имитационного моделирования. В отличие от аналитической модели, где предполагается, что повторно отправлять кадры можно бесконечное число раз, в имитационной модели действует рекомендуемое стандартом ограничение в  $R = 7$  попыток передач, по достижении которого кадр отбрасывается.

На рис. 2 представлены графики зависимости доли кадров, не доставленных за ограничение по времени, от величины этого ограничения, для различных параметров сценария. Подписи «AN» и «SIM» на рис. 2 соответствуют результатам, полученным с помощью аналитической модели и имитационного моделирования. Построенные зависимости имеют ступенчатый вид, причем каждой ступени соответствует число периодов, прошедших от момента генерации кадра на сенсоре до его доставки: вероятность доставить кадр за время первого периода  $T_{per} = 18440$  мкс больше 90% для разреженного трафика и любого числа сенсоров в сети  $N$ , см. рис. 2а и 2б. Из рис. 2в и 2г видно, что вместе с ростом  $\lambda$  и  $N$  увеличивается и количество отброшенных по достижении  $R$  кадров в сравнении с отброшенными по превышении допустимой задержки, поэтому модель не применима для значений  $\lambda$  больших, чем  $1\text{с}^{-1}$ . Для практически интересных вероятностей потери кадров ( $10^{-2} - 10^{-4}$ ) относительная погрешность доли недоставленных кадров не превышает 15% для  $\lambda < 1\text{с}^{-1}$ . В этих случаях отбрасывание кадров по достижении  $R$  происходит заметно реже, чем по превышении ограничения на задержку. Погрешность становится велика, когда отбрасывание кадров по достижении  $R$  происходит так же часто, как и отбрасывание кадров по превышении ограничения на задержку.

Оценить, при каких параметрах отбрасывание кадров по достижении  $R$  будет происходить значительно реже, чем по превышении допустимого времени на передачу, можно следующим образом. На рис. 2 вертикальной линией показано минимальное время, через которое кадр может быть отброшен по достижении  $R$ , равное  $R \cdot T_{per}$ , т.е., если ограничение на задержку меньше этого времени, отбрасывание кадра по достижении  $R$  не происходит. Если вероятность доставить кадр за время  $R \cdot T_{per}$  велика, то аналитическая модель показывает низкую ошибку в сравнении с имитационным моделированием. При больших значениях доли кадров, не



**Рис. 2.** Графики зависимости доли кадров, не доставленных за ограничение по задержке, от ограничения по задержке,  $W_0 = 16, K = W_0 - 1, M = 1, CTC = 0, 1$ .

доставленных за ограничение на задержку  $R \cdot T_{per}$ , в имитационном моделировании может происходить отбрасывание кадров по достижении  $R$ .

Например, при  $\lambda = 1c^{-1}$  и  $N = 24$  доля кадров, не доставленных за ограничение на задержку  $R \cdot T_{per}$ , меньше  $10^{-2}$ , расхождение моделей незначительно, тогда как при  $\lambda = 1c^{-1}$  и  $N = 48$  эта доля уже больше  $10^{-1}$ , поэтому для  $\lambda = 1c^{-1}$  и  $N = 48$  наблюдается значительное расхождение аналитических результатов с результатами, полученными имитационно (см. рис. 2в).

## 5.2. Емкость сети

При заданных ограничениях на надежность доставки кадра  $P_{lim}$  и задержку  $D_{lim}$  оценим максимальное число сенсоров, удовлетворяющих этим ограничениям, при фиксированном по-

треблении канального ресурса  $CTC$ . Для этого решим следующую задачу оптимизации:

$$\begin{aligned} & \max_{W_0, K, M} N, \\ \text{s.t. } & T_{slot} = T_{TX} + K \cdot T_e, \\ & CTC = \frac{T_{slot} \cdot M}{T_{per}}, \\ & \mathcal{P}(D \leq D_{lim}; M, T_{slot}, T_{per}, W_0, N, \lambda) \geq P_{lim}. \end{aligned}$$

Алгоритм 1, используемый для решения этой задачи, на каждом шаге проверяет, выполняются ли ограничения на квантиль задержки при заданной интенсивности  $\lambda$  и потреблении канального ресурса  $CTC$  при каких-либо наборах параметров  $(M, W_0, K)$  для текущего числа сенсоров в PRAW, и увеличивает число сенсоров, если хотя бы один такой набор находится. Если ни одного набора параметров  $(M, W_0, K)$ , при котором ограничения выполняются, не было найдено, то емкость сети  $N_{opt}$  определяется последним значением числа станций  $N$ , для которого был найден хотя бы один набор параметров  $(M, W_0, K)$ . Нулевая емкость сети означает, что выполнить поставленные ограничения нельзя даже для одного сенсора.

---

**Алгоритм 1** Нахождение емкости сети

---

**Входные данные:**  $D_{lim}, P_{lim}, CTC, \lambda$

**Выходные данные:**  $N_{opt}$

$N \leftarrow 1$

$N_{opt} \leftarrow 0$

**До тех пор, пока**  $N \leq 128$  **выполнять**

**Для**  $(M, W_0, K) \in \{1, 2, 3, 4\} \times \{2, \dots, 64\} \times \{0, 1, \dots, \min(\lfloor \frac{T_{TX}}{T_e} \rfloor, W_0 - 1)\}$  **выполнять**

$T_{slot} \leftarrow T_{TX} + K \cdot T_e$

$T_{per} \leftarrow \frac{T_{slot} \cdot M}{CTC}$

**Если**  $\mathcal{P}(D \leq D_{lim}; M, T_{slot}, T_{per}, W_0, N, \lambda) \geq P_{lim}$  **тогда**

$N_{opt} \leftarrow N$

$N \leftarrow N + 1$

        прервать

**иначе**

            продолжать

**Конец условия**

**Конец цикла**

**Если**  $N_{opt} = 0$  **тогда**

        прервать

**иначе**

        продолжать

**Конец условия**

**Конец цикла**

---

На рис. 3 и 4 представлены зависимости емкости сети от интенсивности генерации кадров  $\lambda$  и ограничения на задержку  $D_{lim}$  при разных  $CTC$  и  $P_{lim}$  и от ограничений на задержку  $D_{lim}$  и вероятность доставки  $P_{lim}$  при разных  $CTC$  и  $\lambda$ . По результатам можно сделать следующие выводы:

- С ростом  $\lambda$  наблюдается уменьшение емкости, так как при фиксированном общем числе сенсоров увеличение  $\lambda$  приводит к тому, что активных сенсоров становится больше и увеличивается конкуренция за доступ к каналу, что приводит к увеличению задержки, т.е. для выполнения ограничения на задержку необходимо уменьшать общее число сенсоров. Отдельно следует отметить что увеличение конкуренции за доступ к каналу с ростом  $\lambda$  приводит к тому, что становится выгодно делить сенсоры на группы.

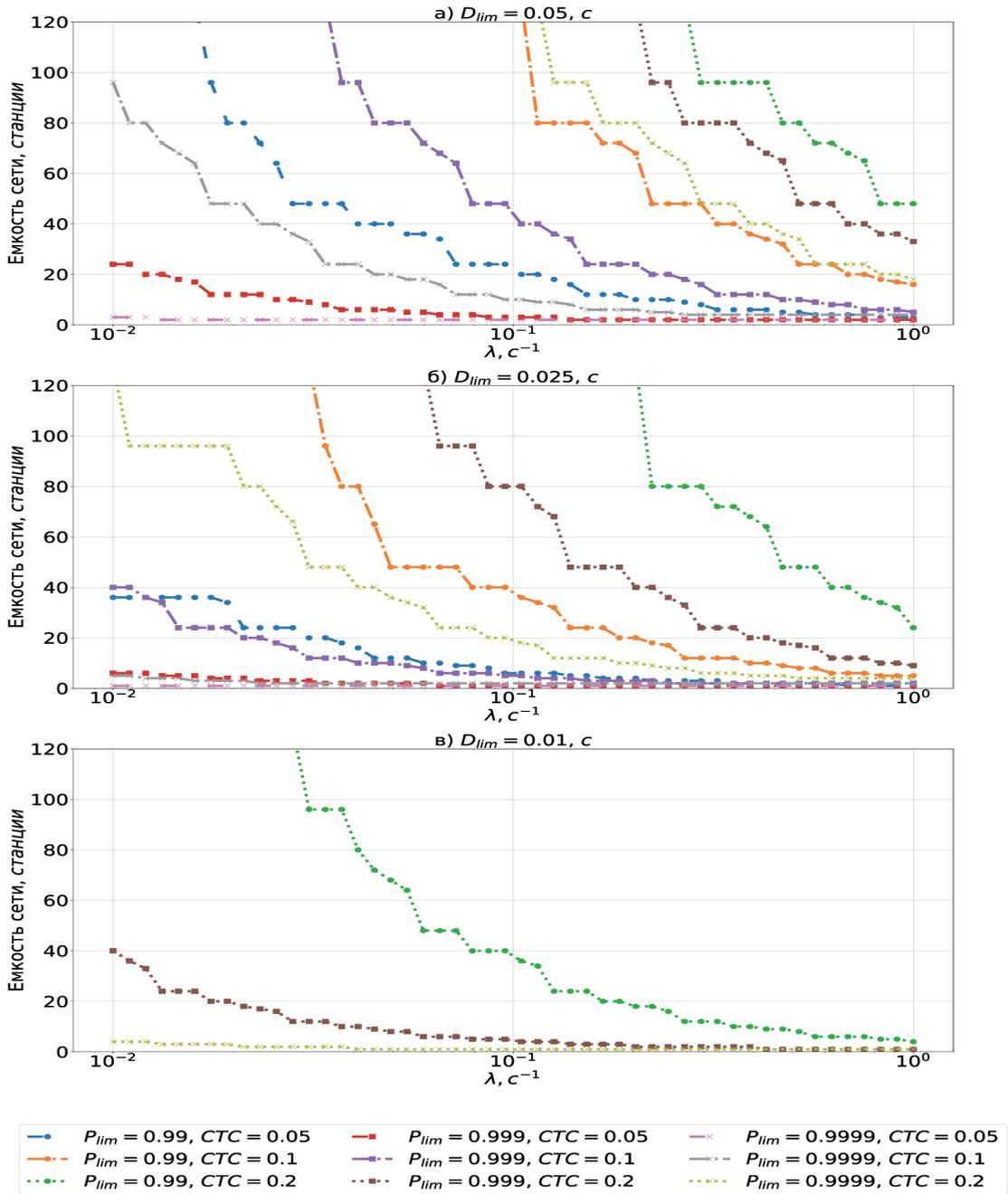


Рис. 3. Графики зависимости емкости сети от интенсивности генерации кадров.

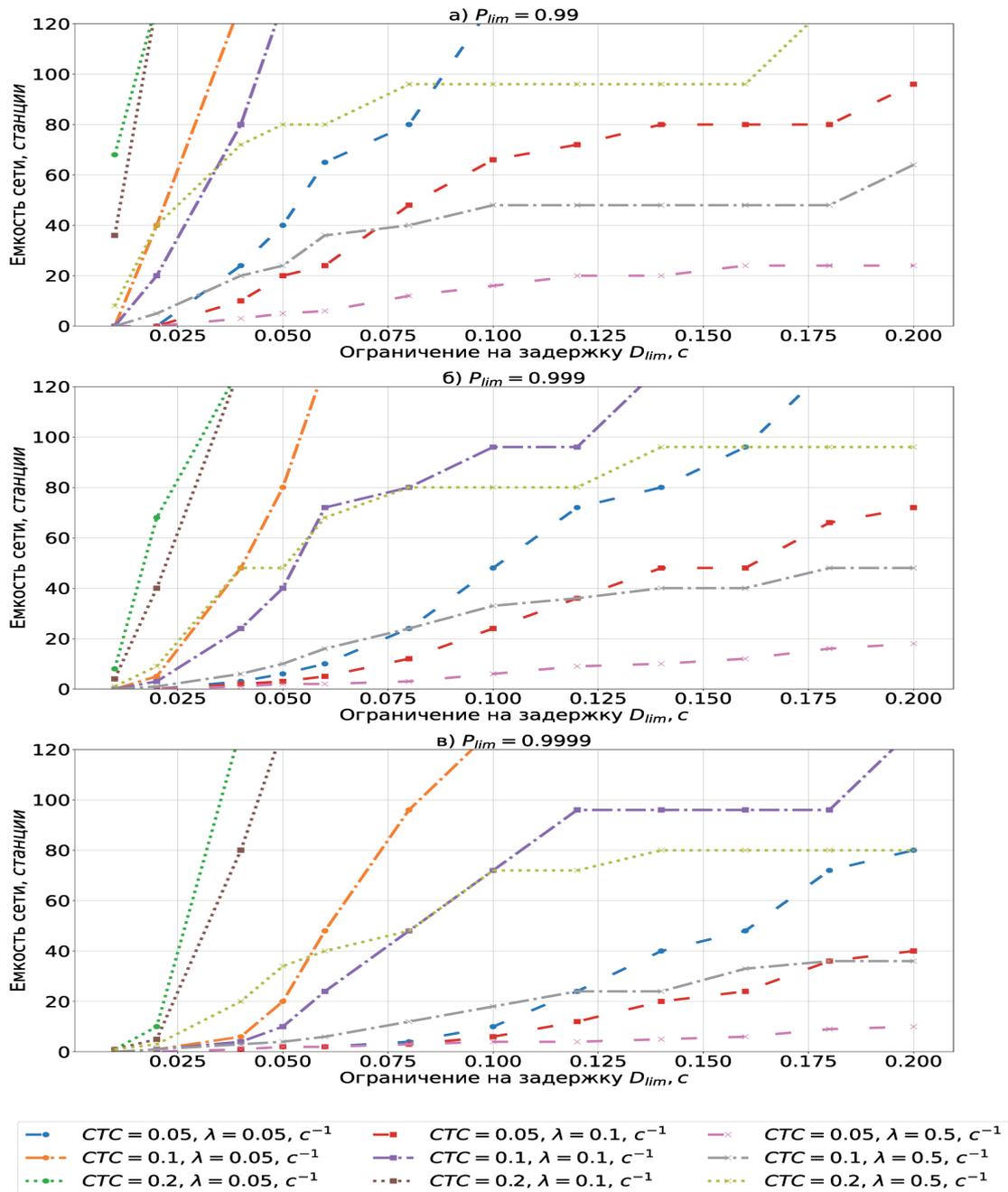


Рис. 4. Графики зависимости емкости сети от ограничения на время доставки.

- При увеличении  $D_{lim}$  кадрам доступно больше попыток передачи до достижения предельной задержки и доля недоставленных за ограничение  $D_{lim}$  кадров уменьшается при фиксированном числе сенсоров. В силу этого удается выполнить ограничение на задержку при большем числе сенсоров, так как сенсор может конкурировать с большим количеством других сенсоров, при этом выполняя поставленные ограничения на квантиль задержки.
- Для того, чтобы при фиксированном  $\lambda$  и  $D_{lim}$  обеспечить выполнение более строгих ограничений на  $P_{lim}$ , требуется уменьшить вероятность коллизии кадров, т.е. уменьшить число одновременно конкурирующих за доступ к каналу активных сенсоров. Это приводит к уменьшению числа сенсоров, для которых выделяется периодическое RAW, т.е. емкости сети.
- Выделение большей доли канального времени под периодическое RAW, т.е. увеличение  $CTS$ , влечет за собой и более частые возможности передавать кадр, т.е. приводит к уменьшению доли недоставленных за ограничение  $D_{lim}$  кадров. Это позволяет увеличить число активных станций и конкуренцию за доступ к каналу без нарушения требований на качество обслуживания, т.е. увеличивает емкость сети.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был рассмотрен сценарий передачи разреженного трафика беспроводных сенсоров в восходящем канале с использованием периодического окна ограниченного доступа (PRAW) с короткими слотами. Использование механизма окна ограниченного доступа защищает от конкуренции за доступ к каналу с обычными станциями, передающими насыщенный трафик, снижает конкуренцию между сенсорами и тем самым обеспечивает оперативную и надежную доставку данных для сенсорных станций. В стандарте IEEE 802.11ah, где механизм PRAW был введен, не дано рекомендаций по поводу выбора параметров этого механизма, которые позволили бы выполнить требования к качеству обслуживания, например, требования к задержке и надежности доставки данных, и при этом максимально эффективно использовать выделенный канальный ресурс. В данной работе построена аналитическая модель PRAW с короткими слотами и исследована емкость сети — максимально допустимое число сенсорных станций, для которых с помощью механизма PRAW обеспечивается выполнение требований к задержке и надежности доставки данных при заданном потреблении канального ресурса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheng L., Cai L., Pan J., Ni M. Performance Analysis of Grouping Strategy for Dense IEEE 802.11 Networks. *2013 IEEE Global Communications Conference (GlobeCom)*. Atlanta: IEEE, 2013, P. 219–224.
2. Hazmi A., Badihi B., Larmo A., Torsner J., Valkama M., et al. Performance Analysis of IoT-Enabling IEEE 802.11 ah Technology and its RAW Mechanism with Non-Cross Slot Boundary Holding Schemes. *2015 IEEE 16th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Boston: IEEE, 2015, P. 1–6.
3. Mahesh M., Harigovindan V.P. Restricted Access Window-Based Novel Service Differentiation Scheme for Group-Synchronized DCF. *IEEE Communications Letters*, 2019, Vol. 23, no. 5, P. 900–903.
4. Nawaz N., Hafeez M., Zaidi S. Ali R., McLernon D.C., Ghogho M. *Throughput Enhancement of Restricted Access Window for Uniform Grouping Scheme in IEEE 802.11 ah*, 2017, P. 1–7.
5. Zheng L., Ni M., Cai L., Pan J., Ghosh C., Doppler K. Performance Analysis of Group-Synchronized DCF for Dense IEEE 802.11 Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, Vol. 13, no. 11, P. 6180–6192.

6. Sangeetha U, Babu A. Performance Analysis of IEEE 802.11 ah Wireless Local Area Network under the Restricted Access Window-Based Mechanism. *International Journal of Communication Systems*, 2019, Vol. 32, no. 4.
7. Raeesi O., Pirskanen J., Hazmi A., Levanen T., Valkama M. *Performance Evaluation of IEEE 802.11 ah and its Restricted Access Window Mechanism*, 2014, P. 460–466.
8. Park C.W., Hwang D., Lee T.J. Enhancement of IEEE 802.11 ah MAC for M2M Communications. *IEEE Communications Letters*, 2014, Vol. 18, no. 7, P. 1151–1154.
9. Khorov E., Lyakhov A., Yusupov R. Two-Slot Based Model of the IEEE 802.11 ah Restricted Access Window with Enabled Transmissions Crossing Slot Boundaries. *2018 IEEE 19th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Chania: IEEE, 2018, P. 1–9.
10. Kai C., Zhang J., Zhang X., Huang W. Energy-Efficient Sensor Grouping for IEEE 802.11 ah Networks with Max-Min Fairness Guarantees. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, P. 102284–102294.
11. Madueno 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, Vol. 3, no. 5, P. 673–682.
12. 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. *2017 13th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*. Jackson: IEEE, 2017, P. 69–76.
13. Ali M.Z., Mišić J., Mišić V.B. Efficiency of Restricted Access Window Scheme of IEEE 802.11 ah Under Non-Ideal Channel Condition. *2018 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)*. Halifax: IEEE, 2018, P. 251–256.
14. Ali M.Z., Mišić J., Mišić V.B. Performance Evaluation of Heterogeneous IoT Nodes with Differentiated QoS in IEEE 802.11 ah RAW Mechanism. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68, no. 4, P. 3905–3918.
15. 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, P. 127402–127415.
16. 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.
17. Kureev A., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Improving Efficiency of Heterogeneous Wi-Fi Networks with Joint Usage of TIM Segmentation and Restricted Access Window. *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Montreal: IEEE, 2017, P. 1–5.
18. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A. Modelling Machine Type Communication in IEEE 802.11 ah Networks. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*. London: IEEE, 2015, P. 1149–1154.
19. Khorov E., Lyakhov A., Nasedkin I., Yusupov R., Famaey J., and Akyildiz I.F. Fast and Reliable Alert Delivery in Mission-Critical Wi-Fi HaLow Sensor Networks. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, P. 14302–14313.
20. Zazhigina E., Yusupov R., Khorov E., Lyakhov A. Analytical Study of Periodic Restricted Access Window Mechanism for Short Slots. *MDPI Electronics*, 2021, Vol. 10, no. 5, P. 549.
21. Khorov, E.M., Lyakhov, A.I., Nasedkin, I.A. et al. Emergency Alert Delivery in a Heterogeneous Wi-Fi HaLow Network. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, Vol. 64, P. 1517–1522.
22. Shimokawa M., Sanada K., Hatano H., Mori K. Station Grouping Method for Non-Uniform Station Distribution in IEEE 802.11 ah Based IoT Networks. *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. IEEE, 2020, P. 1–5.

23. Nishida R., Shimokawa M., Sanada K., Hatano H., Mori K. A Station Grouping Method Considering Heterogeneous Traffic and Multiple Data Rates for IEEE 802.11 ah Networks with Non-uniform Station Deployment. *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring)*. IEEE, 2022, P. 1–5.
24. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I. IEEE 802.11 Wireless LAN: Saturation Throughput Analysis with Seizing Effect Consideration. *Cluster Computing*, 2002, Vol. 5, no. 2, P. 133–144.
25. Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, Vol. 18, no. 3, P. 535–547.

## Estimation of the Wi-Fi Network Capacity when Using Restricted Access Window with Short Slots

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

A fast-growing Internet of Things poses new challenges to providing communications to a tremendous number of simultaneously connected devices. The growth of the number of devices increases contention for the channel and slows down data transmission. In the IEEE 802.11ah standard, a Restricted Access Window (RAW) mechanism is introduced that allows reducing the contention for the channel by reservation of channel time for a predefined group of stations. This paper estimates the network capacity, i.e., the maximum number of stations in RAW, which allows satisfying the requirements on the delay quantile with predefined restriction on channel resource share and traffic intensity. To estimate the network capacity, the paper develops an analytical model of transmitting rare data with periodic RAW with short slots. Then it solves the periodic RAW parameters optimization problem.

**KEYWORDS:** IEEE 802.11ah, Wi-Fi HaLow, Restricted Access Window, analytical modeling.