

# Сравнение протоколов присоединения устройств в сетях межмашинного взаимодействия на основе технологии Wi-Fi\*

Е.А. Степанова, Д.В. Банков, Е.М. Хоров

{stepanova, bankov, khorov}@iitp.ru

ИППИ РАН

**Аннотация** С каждым годом в сетях Wi-Fi становится все больше передающих устройств, в связи с чем появляется необходимость в технологиях межмашинного взаимодействия. В новом дополнении к стандарту IEEE 802.11ah описаны механизмы, позволяющие поддерживать функционирование сетей межмашинного взаимодействия, но все эти механизмы могут быть использованы только для станций, подключившихся к сети. Чтобы регулировать сам процесс присоединения станций к точке доступа в дополнении к стандарту были представлены протоколы управления присоединением. В данной статье исследован протокол распределенного управления присоединением и выполнено сравнение эффективности протоколов управления присоединением в сценариях с различными случаями интерференции.

## 1 Введение

С каждым годом, чтобы облегчить жизнь людей, производится все больше устройств, большинству из которых для эффективной работы не требуется вмешательство человека, а, может быть, необходимы лишь данные, которые собирает специальный сенсор или другой прибор. В связи с этим возникает необходимость в технологиях, обеспечивающих обмен данными между устройствами, то есть в технологиях межмашинного взаимодействия. Особый интерес представляют сети Wi-Fi, являющиеся сетями межмашинного взаимодействия, так как все большее распространение получают сенсорные сети из большого числа передающих устройств. Примером таких сетей являются сети датчиков влажности и температуры, развертываемые на сельскохозяйственных угодьях при посеве особо ценных культур. То есть рассматриваются сети, состоящие из одной точки доступа и большого числа устройств, генерирующих трафик низкой интенсивности.

Для обеспечения работоспособности описанных выше сетей существует ряд механизмов, позволяющих точке доступа регулировать процесс обмена сообщениями передающих ей устройств. Для этого ей необходимо иметь

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-09350 а

некоторую информацию о станциях, получаемую в процессе подключения станции к точке доступа (к примеру *AssociationID* и множество поддерживаемых сигнально-кодовых конструкций). Соответственно, если станции будут вынуждены заново выполнять процесс подключения к точке доступа (это может произойти, если точка доступа перезагрузится), для отправки запроса на присоединения станции должны будут использовать стандартный метод случайного доступа к каналу в сетях Wi-Fi. Производительность данного метода ухудшается с ростом числа передающих устройств, поэтому возникает следующая задача: необходимо ограничить среднее число устройств, одновременно начинающих процесс присоединения.

Для решения этой задачи в дополнении *IEEE802.11ah* к стандарту Wi-Fi, вышедшем в конце 2016 года, были представлены протоколы централизованного и распределенного управления процессом присоединения. Несмотря на то, что дополнение описывает эти протоколы, в нем не регламентируется, как следует выбирать параметры протокола централизованного управления присоединением. Для протокола же распределенного управления присоединением определены параметры по-умолчанию, но не описано, для каких сценариев они являются наилучшими и как следует выбирать набор параметров в зависимости от рассматриваемого сценария.

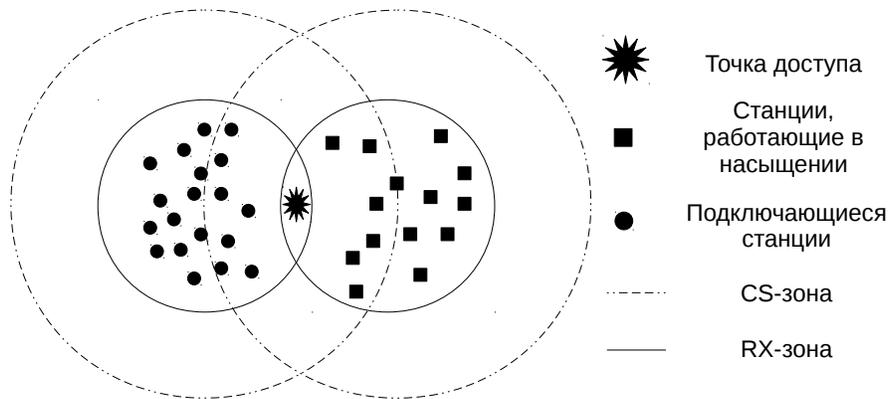
Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 подробно представлены описание объекта исследования, постановка задачи и кратко описаны методы присоединения в сетях Wi-Fi. В разделе 3 приведен обзор работ, посвящённых процессу присоединения устройств в сетях Wi-Fi. В разделе 4 приведено исследование протокола распределенного управления присоединением. Результаты сравнения протоколов присоединения приведены в разделе 5. Раздел 6 содержит заключение.

## 2 Сценарий и постановка задачи

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из точки доступа и некоторого фиксированного количества  $M$  станций, работающих в режиме насыщения. Станции, работающие в режиме насыщения, считаются подключившимися в нулевой момент времени, то есть перед началом моделирования. Пусть в случайный момент времени одновременно появляется заданное (но неизвестное точке доступа) количество  $N$  новых станций, которые подключаются к точке доступа данной сети Wi-Fi. Точка доступа использует один из протоколов управления процессом аутентификации. В рамках данного сценария рассмотрим два различных случая интерференции:

- 1) все рассматриваемые станции находятся в зоне слышимости друг друга;
- 2) станции, работающие в режиме насыщения, являются скрытыми для подключающихся станций (см. рис. 1).

На рис. 1 используются следующие обозначения: *RX*-зона станции — зона, в которой станция слышит передачу и не передает во время передачи другой станции в этой зоне; *CS*-зона станции — зона, в которой станция



**Рис. 1.** Пример взаимного расположения подключающихся и насыщенных станций.

не слышит передачу другой станции, но которая приводит к коллизии при пересечении с передачей данной станции.

*Присоединение.* Упрощенно процесс присоединения состоит в обмене запросом на присоединение и ответом на него между присоединяющейся станцией и точкой доступа, осуществляемом с использованием стандартного метода случайного доступа к каналу. При большом количестве подключающихся станций запросы на присоединение попадают в коллизии. Поэтому необходимы протоколы управления процессом присоединения, регулирующие отправку запросов на присоединение. Далее подробно описано функционирование этих протоколов.

При использовании протокола централизованного управления присоединением, точка доступа в специальных кадрах для рассылки сетевой информации — биконах, отправляемых через равные промежутки времени (бикон-интервалы), определяет пороговое значение, далее — порог, принадлежащее интервалу от 0 до 1023. Каждая станция при инициализации в сети выбирает произвольное значение из интервала от 0 до 1022, которое может быть изменено только после успешного завершения процесса присоединения. Станция сравнивает проинициализированное значение со значением порога после получения бикона, и, если значение порога больше, добавляет в очередь на передачу запрос на присоединение. Иначе станция ждёт следующий бикон, считывает новое значение порога и выполняет операцию сравнения заново. Получив запрос на присоединение от станции, точка доступа помещает в очередь на передачу ответ на присоединение.

Если точка доступа использует протокол распределенного управления процессом присоединения, она в биконах определяет следующие параметры протокола:

- 1) длительность слота присоединения ( $T_{ac}$ );
- 2) минимальный интервал передачи ( $TI_{min}$ );
- 3) максимальный интервал передачи ( $TI_{max}$ ).

После получения бикона станция инициализирует значение интервала передачи  $TI$  значением  $TI_{min}$ , равновероятно выбирает случайное значение  $m$  из интервала  $[0, TI]$  и случайное значение  $l$  из интервала  $[0, L]$ , где  $L = \lfloor \frac{BI}{T_{ac}} \rfloor$ ,  $BI$  — длительность бикон-интервала,  $l = 0$  — первый слот присоединения. Используя данные параметры, в  $l$ -ом слоте присоединения в  $m$ -ом бикон-интервале станция активирует метод случайного доступа к каналу для передачи запроса на присоединение, если текущему бикон-интервалу соответствует  $m = 0$ . Если передача запроса на присоединение оказалась неудачной, станция увеличивает значение  $TI$  следующим образом:

$$TI = \min \{2 \times TI, TI_{max}\}.$$

В контексте описанного выше сценария для протокола распределенного управления процессом присоединения ставится следующая задача: *при фиксированной длительности бикон-интервала определить параметры протокола, минимизирующие среднее время подключения появляющихся в сети станций к данной точке доступа.*

Также необходимо определить, какой из протоколов управления процессом присоединения является наиболее эффективным.

### 3 Обзор литературы

Протокол централизованного управления присоединением был широко исследован в большом количестве научных работ, к примеру в [1], [2] и [3]. В данных работах предложены различные алгоритмы управления порогом присоединения, но авторы этих статей основываются на устаревшей версии дополнения к стандарту Wi-Fi. Соответственно, предложенные в них решения не работоспособны в рамках итоговой версии дополнения.

Работа [4] изучает протокол централизованного управления присоединением в контексте финальной версии дополнения. В ней представлены алгоритмы адаптивного управления порогом присоединения, позволяющие достигнуть линейной зависимости среднего времени подключения станций к сети от числа подключающихся станций, один из которых оказывается устойчивым к наличию в сети скрытых станций.

Все вышеупомянутые работы, затрагивающие процесс присоединения в сетях Wi-Fi, рассматривают только протокол централизованного управления процессом присоединения, в то время как работа [5] исследует протокол распределенного управления процессом присоединения. В данной работе авторы делают следующее предположение: если время передачи запроса и его

подтверждения больше оставшегося до окончания слота присоединения времени, то станция не передает запрос, считая его отправленным неуспешно. Авторы представили математическую модель данного протокола, построенную на основе модели передачи данных внутри окна ограниченного доступа [6]. Но данная математическая модель не согласуется с дополнением к стандарту [7]. В дополнении сказано, что станция в выбранном слоте присоединения инициирует процедуру случайного доступа к каналу для отправки запроса на присоединение, то есть начинает прослушивание канала и т.д. Соответственно, станция не может отправить запрос на присоединение до выбранного ею слота присоединения, а, начиная с него, отправит запрос в тот момент, когда канал освободится.

В аналогичном предположении строится математическая модель, предложенная в работе [8]. Эта модель является более простой и легкой в реализации, чем модель из статьи [5]. Также в данной работе предложена модель бесконкурентного доступа к каналу для отправки кадров, необходимых для завершения процесса присоединения, после получения точкой доступа запроса на присоединение при использовании протокола распределенного управления процессом присоединения.

#### **4 Исследование протокола распределенного управления присоединением**

Для того, чтобы исследовать эффективность протокола распределенного управления присоединением, был проведён ряд экспериментов, в которых моделировался описанный в разделе 2 сценарий. Моделирование проводилось при помощи комплекса имитационного моделирования ns-3 [?]. Считалось, что точка доступа и все станции передают в канале шириной 1 МГц с использованием самой надёжной сигнально-кодовой конструкции MCS0. Станции, передающие в насыщении, передают кадры данных размером 100 байт. Подключающиеся и работающие в режиме насыщения станции размещались случайным образом в квадратах 20x20 метров в противоположных сторонах от точки доступа на одинаковом расстоянии от нее, равном:

- 1) 20 метров в случае, когда станции находятся в зоне слышимости друг друга или работающие в режиме насыщения станции отсутствуют;
- 2) 190 метров в случае, когда станции, работающие в режиме насыщения, являются скрытыми для подключающихся станций.

Длительность бикон-интервала равнялась 512 мс. В процессе моделирования каждого из описанных ниже экспериментов для каждого рассматриваемого количества станций было проведено 10 запусков имитационной модели.

Для того, чтобы определить параметры протокола распределенного управления процессом присоединения, минимизирующие среднее время присоединения группы станций, проанализируем влияние изменения каждого из параметров протокола. Для этого проварьируем каждый из параметров при фиксированных остальных. Рассмотрим сценарий, в котором сеть состоит

только из точки доступа и подключающихся станций. Обратим внимание на диапазон изменения параметров протокола. В явном виде в стандарте не представлено никаких граничных значений параметров, но если обратить внимание на размер полей в биконе, отведенных под параметры протокола, становится ясно, что максимальное значение параметров  $TI_{max}$  и  $TI_{min}$  равно 255, а параметра  $T_{ac}$  — 127, так как размер каждого из полей параметров  $TI_{max}$  и  $TI_{min}$  равен 8 бит, а параметра  $T_{ac}$  — 7 бит. На рис. 2 представлена структура поля с параметрами данного протокола.

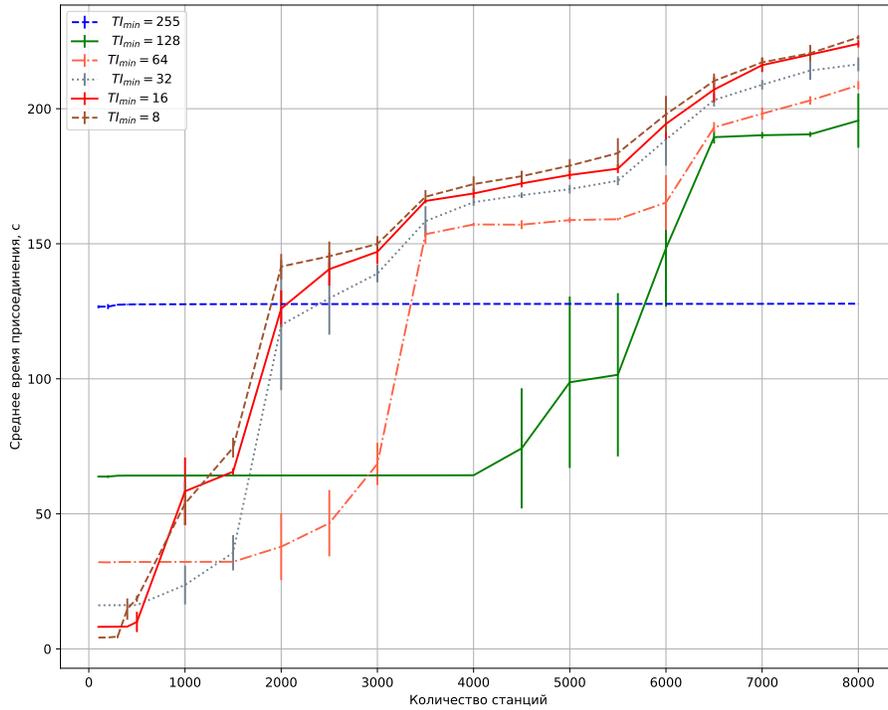
Контрольный, (1)	Длительность слота присоединения, $T_{ac}$	Максимальный интервал передачи, $T_{lmax}$	Минимальный интервал передачи, $T_{lmin}$
Биты 1	7	8	8

**Рис. 2.** Структура поля с параметрами протокола распределенного управления процессом присоединения

Максимизация параметра  $TI_{max}$  приводит к уменьшению среднего времени присоединения станций, так как при малом значении этого параметра значительно увеличивается вероятность коллизии.

Исследуем влияние параметра  $TI_{min}$  на время присоединения при фиксированных параметрах  $TI_{max} = 255$  и  $T_{ac} = 60$ , представленное на рис. 3. При максимально возможном значении  $TI_{min} = 255$  среднее время присоединения одинаково для групп станций любого размера. Это объясняется тем, что изначально для присоединения станций выделяется большой интервал времени. Равномерно распределяясь по этому временному интервалу, они подключаются без повторных запросов на присоединение. Но из-за равномерности распределения станций по данному временному промежутку даже для маленького числа станций получается большое среднее время присоединения. Если значение  $TI_{min}$  выбрано наоборот малым, то появляется эффект «накопления» коллизий для большого числа подключающихся станций. Этот эффект выражается в следующем: если  $TI_{min}$  мал, то мал и начальный временной интервал, по которому распределяются подключающиеся станции. Это приводит к увеличению вероятности того, что запросы всех станций попадут в коллизии. После коллизии станция увеличивает временной интервал в 2 раза, но он частично захватывает начальный коллизийный интервал, поэтому хотя вероятность коллизии запроса и уменьшается, она все еще велика. Именно поэтому, как можно видеть на графике, для небольшого значения параметра  $TI_{min}$  среднее время присоединения выше, чем для большего значения этого параметра.

Также отметим тот факт, что графики имеют ступенчатую форму, а переход между «ступеньками» происходит в тот момент, когда станций стано-

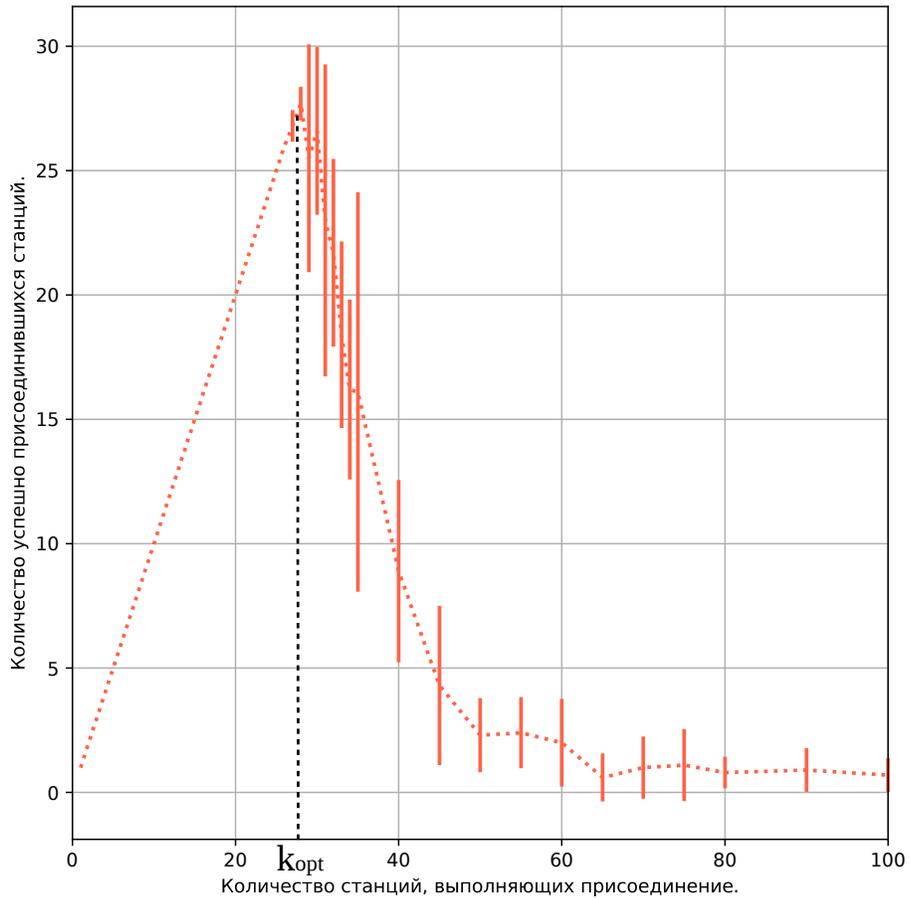


**Рис. 3.** Зависимость среднего времени присоединения группы станций от количества подключающихся станций при фиксированных параметрах  $TI_{max} = 255$  и  $T_{ac} = 60$

вится столько, что из-за коллизий появляются станции, увеличивающие значение  $TI$  по сравнению со значением, которого было достаточно для успешного подключения при меньшем числе присоединяющихся станций. Чтобы обосновать расположение «ступенек», проведем некоторый анализ процесса присоединения в одном бикон-интервале.

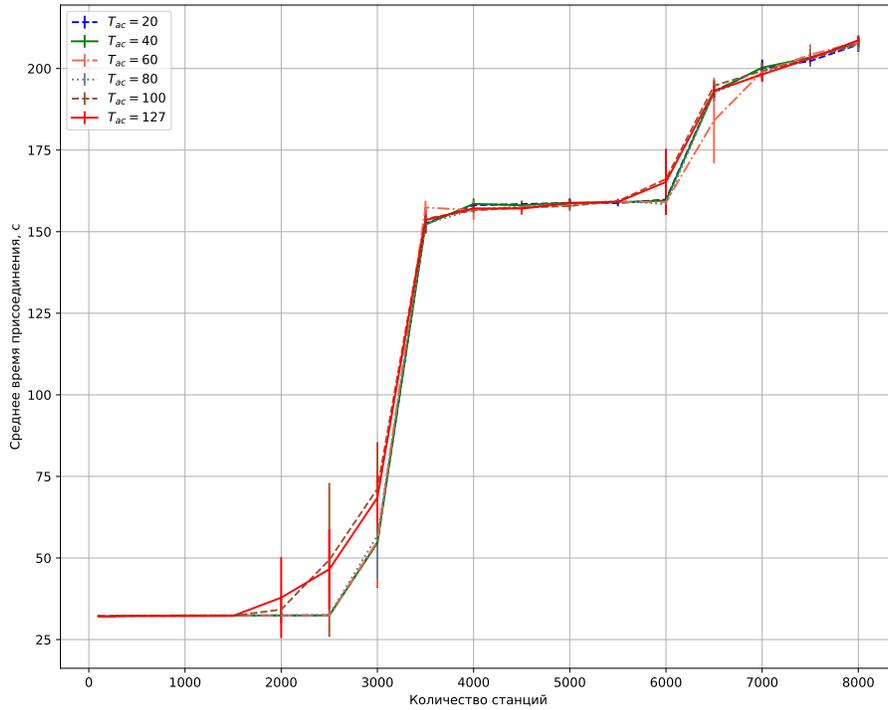
Рассмотрим бикон-интервал, в котором  $k$  станциям разрешено выполнять присоединение, то есть отправлять запрос на присоединение. Если число  $k$  невелико, все станции в течение бикон-интервала успевают отправить запрос на присоединение и получить на него ответ. Если же станций много, то значительная часть запросов попадает в коллизии. Кроме запросов, в коллизии попадут также ответы на них, из-за чего точка доступа не успеет в течение бикон-интервала отправить ответы на все запросы присоединения, пришедшие от станций. Существует некоторое максимальное количество станций  $k_{opt}$ , зависящее от состояния среды и канала, которое, будучи допущенным к запросу присоединения, успеет отправить запросы и получить на них ответы от шлюза. На рис. 4 представлена зависимость числа

устройств, завершивших процесс присоединения в течении бикон-интервала, от числа устройств, которым позволено его начать.



**Рис. 4.** Зависимость числа подключившихся в бикон-интервале станций от числа станций, которым разрешено начать в нем подключение.

Теперь предметно обоснуем расположение «ступенек» для значения параметра  $TI_{min} = 64$ . Из рис. 4, можно заметить, что  $k_{opt} = 28$ . Так как параметр  $TI_{min} = 64$ , на отправку первого запроса на присоединение станциям выделено 64 бикон-интервала, на всем протяжении которых они распределяются равномерно. Поэтому наибольшая группа станций, выполнившая подключение к точке доступа отправляя один запрос на присоединение, состоит из  $k_{opt} * TI_{min} = 64 * 28 = 1792$  станции. Именно с этого количества станций начинается подъем на первую «ступеньку». При отправке второго

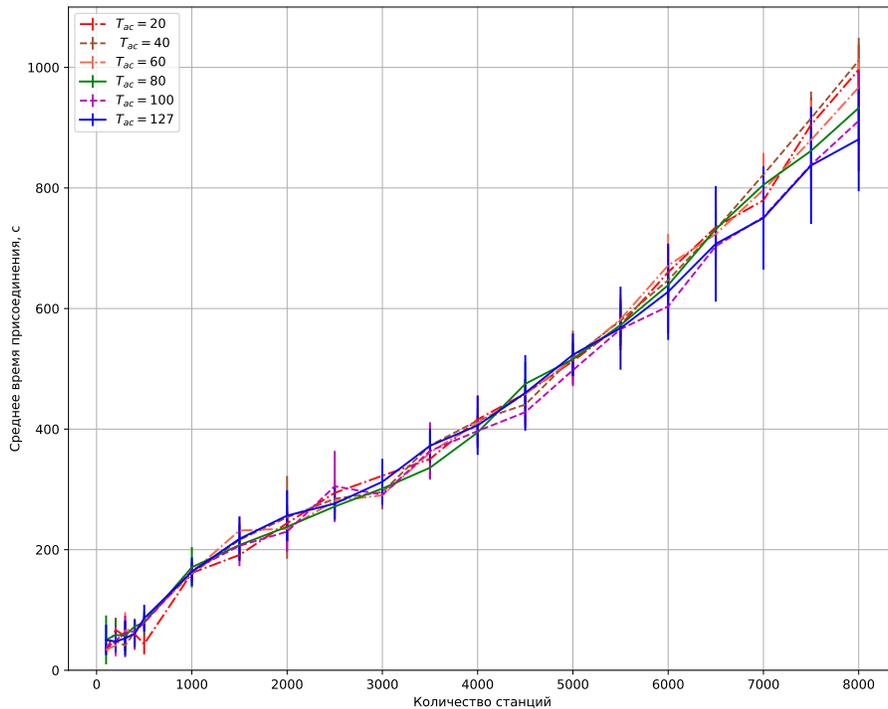


**Рис. 5.** Зависимость среднего времени присоединения группы станций от количества подключаемых станций при фиксированных  $TI_{min} = 64$  и  $TI_{max} = 255$

запроса параметр  $TI = 2 * TI_{min} = 128$ , а учитывая число биконов, потраченных на отправку первого запроса на присоединение, получим, что вторая «ступенька» начинается с  $k_{opt} * (TI + TI_{min}) = 28 * 192 = 5376$ .

Рассмотрим варьирование параметра  $T_{ac}$  при фиксированных параметрах  $TI_{min} = 64$  и  $TI_{max} = 255$ , представленное на рис. 5. Как можно заметить, значение  $T_{ac}$  практически не влияет на среднее время присоединения для группы станций. Это связано с тем, что в выбранном слоте присоединения станция лишь инициирует процедуру случайного доступа *EDCA*, а выполнить попытку передачи запроса она может как в выбранном слоте аутентификации, так и в любом другом, быть может принадлежащем другому бикон-интервалу.

Если в сети помимо подключающихся станций есть станции, работающие в насыщении, то характер зависимостей принимает вид, представленный на рис. 6. Можно заметить, что из-за появления насыщенного трафика теряется некоторая «ступенчатость» представленных зависимостей. Это связано с увеличением вероятности коллизии из-за наличия в сети насыщенного трафика. В рассматриваемой ситуации станции увеличивают параметр  $TI$  не только из-за коллизий, связанных с большим числом подключающихся



**Рис. 6.** Зависимость среднего времени присоединения группы станций от количества подключающихся станций при наличии станций, работающих в режиме насыщения

ся станций, но и из-за коллизий с кадрами, которые передают работающие в режиме насыщения станции. Поэтому среднее время присоединения группы станций, распределение которой по бикон-интервалам соответствует подключению в одном бикон-интервале некоторого числа станций, близкого снизу к оптимальному числу, значительно увеличивается. Также насыщенный трафик отбирает у подключающихся станций каналные ресурсы. Все вышперечисленное влечет за собой увеличение среднего времени присоединения и сглаживание «ступенек».

Если же насыщенные станции скрыты от подключающихся, то зависимость среднего времени подключения группы станций от числа станций в группе принимает вид, представленный на рис. 7. Можно заметить, что при наличии скрытых станций варьирование параметра  $TI_{min}$  оказывает незначительное влияние на среднее время присоединения группы станций к точке доступа. Также оказывается, что присутствие скрытых станций сильнее всего влияет на время присоединения небольшого числа станций. Это связано с тем, что из-за коллизий станции вынуждены увеличивать параметр  $TI$ , в то время как без дополнительных коллизий они могли бы подключиться и при

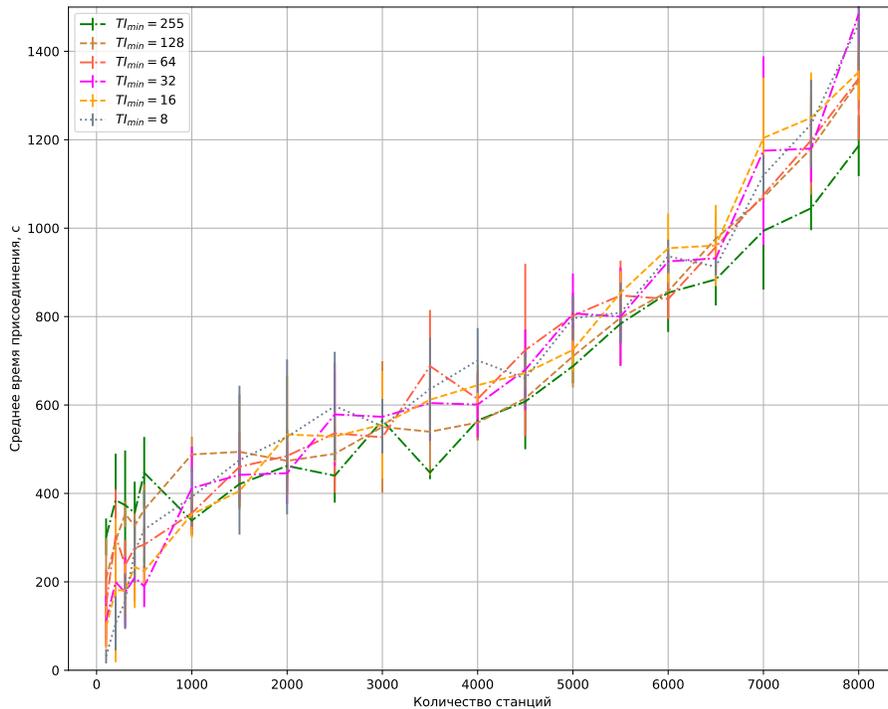
меньшем значении  $TI$ . Решить эту проблему можно с помощью параметра  $TI_{max}$ , если установить его значение в соответствии с числом подключающихся станций. Но это возможно лишь в случае, когда число подключающихся станций заранее известно, что не предусматривается рассматриваемым сценарием. Также следует обратить внимание на то, что занижение значения параметра  $TI_{max}$  может привести к значительно большему увеличению среднего времени присоединения для большого числа подключающихся станций по сравнению с его уменьшением для малого числа подключающихся станций. Это связано с тем, что при малом значении  $TI_{max}$  и большом количестве подключающихся станций может возникнуть ситуация, в которой выделенного для подключения временного интервала не достаточно для разрешения всех коллизий запросов на присоединение. При использовании же максимально возможного значения параметра  $TI_{max}$  небольшое число станций сможет выполнить присоединение за конечное время, чего нельзя гарантировать в рассмотренной до этого ситуации. Из всего вышесказанного можно сделать следующий вывод: не существует параметров протокола распределенного управления процессом аутентификации, минимизирующих среднее время присоединения группы станций от числа станций в группе для любого числа подключающихся станций и любого сценария.

## 5 Сравнение протоколов управления присоединением

Протокол централизованного управления присоединением был подробно исследован в работе [4]. В данной статье были предложены алгоритмы «Вверх» и «Вниз», адаптивно подбирающие шаг увеличения порога и показано, что они лишь в незначительной мере проигрывают оракульному решению, используемому оптимальные параметры подключения. Также было показано, что при их использовании точка доступа должна постоянно следить за процессом присоединения, в то время как при использовании протокола распределенного управления процессом присоединения параметры протокола настраиваются единожды, а процесс присоединения происходит без дополнительного вмешательства точки доступа. Поэтому представляет большой интерес сравнение эффективности протоколов управления процессом присоединения в различных сценариях.

На рис. 8 представлена зависимость среднего времени подключения группы станций от числа станций в этой группе при наличии насыщенных станций, находящихся в зоне слышимости подключающихся станций, для протоколов централизованного и распределенного управления процессом присоединения.

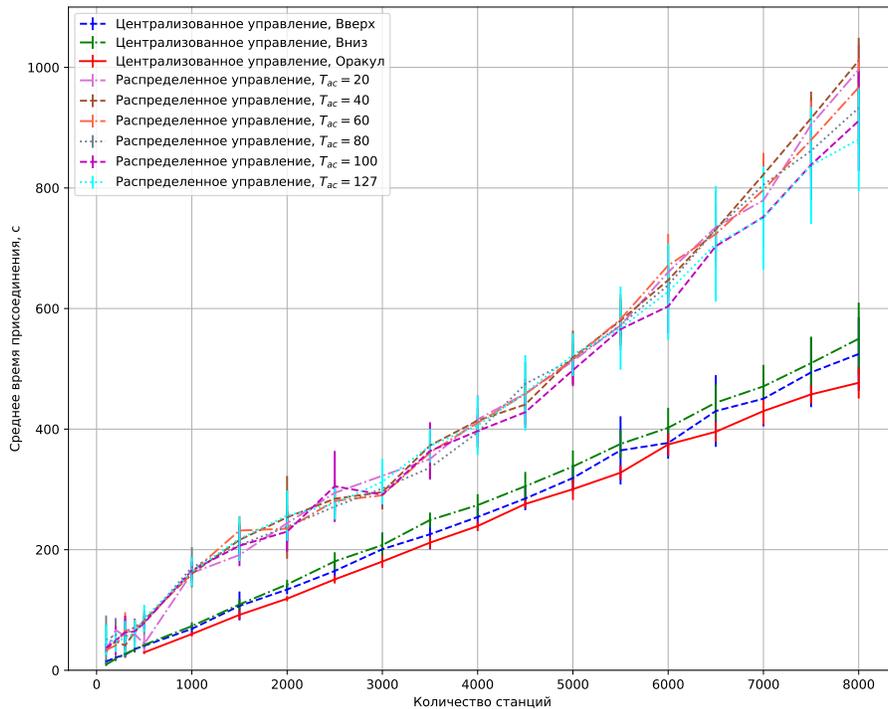
Как видно из представленного графика, использование любого из предложенных в статье [4] алгоритмов для протокола централизованного управления процессом присоединения приводит к существенному выигрышу во времени присоединения по сравнению с использованием протокола распределенного управления процессом присоединения.



**Рис. 7.** Зависимость среднего времени присоединения группы станций от количества подключающихся станций при наличии скрытых станций

Если же рассматривать сценарий, в котором насыщенные станции являются скрытыми для подключающихся, то аналогичная зависимость представлена на рис. 9. Поэтому можно сказать, что при наличии скрытых станций предложенный в статье [4] алгоритм дает еще большее преимущество во времени подключения чем распределенного управления процессом присоединения по сравнению с предыдущим рассмотренным сценарием.

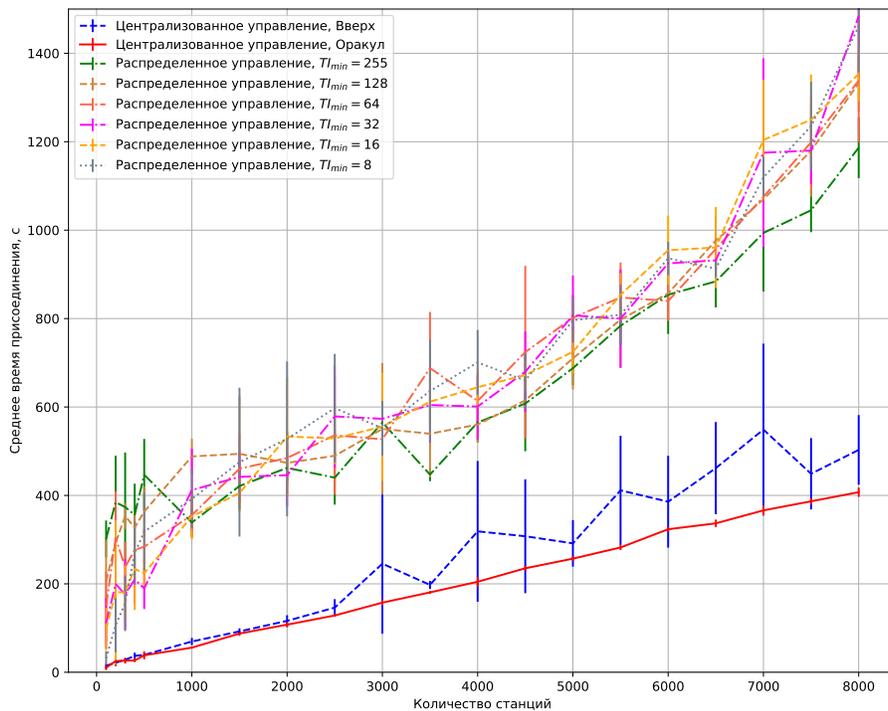
Объясним, почему протокол централизованного управления процессом присоединения при использовании предложенного в статье [4] алгоритма работает лучше, чем протокол распределенного управления процессом присоединения. Главной причиной является то, что параметр  $TI$  в протоколе распределенного управления процессом присоединения в случае коллизии изменяется в 2 раза, то есть временной интервал, отводимый для подключения станций, также увеличивается вдвое после каждой коллизии, а не подбирается адаптивно в зависимости от числа подключающихся станций. Соответственно появляются скачки в зависимости среднего времени подключения группы станций от числа станций в группе. При использовании же разработанного в статье [4] алгоритма для протокола централизованного управления процессом присоединения при поиске оптимального шага



**Рис. 8.** Зависимость среднего времени присоединения группы станций от количества подключающихся станций при наличии станций, работающих в режиме насыщения

изменения порога находятся параметры протокола, соответствующие числу подключающихся станций. Поэтому, в отличие от протокола распределенного управления процессом присоединения, получается получить время присоединения близкое к оптимальному. Другой проблемой протокола распределенного управления процессом присоединения является уже описанный ранее эффект накопления коллизий, из-за которого увеличивается число коллизионных бикон-интервалов и, как следствие, среднее время подключения для группы станций.

Подводя итог проведенному сравнению протоколов управления процессом присоединения, можно сказать, что при использовании предложенного в статье [4] алгоритма управления порогом присоединения время присоединения группы станций растет линейно от числа станций в группе и оно значительно меньше, чем при использовании протокола распределенного управления процессом присоединения. Но использование протокола распределенного управления процессом присоединения не требует наличия дополнительных алгоритмов и при выборе параметров протокола, предложенных в стандарте по-умолчанию ( $TI_{min} = 8$ ,  $TI_{max} = 255$ ,  $T_{ac} = 10$ ), гарантирует



**Рис. 9.** Зависимость среднего времени присоединения группы станций от количества подключающихся станций при наличии скрытых станций

конечное время присоединения станций, которое не более чем в 3 раза превышает аналогичное время при использовании предложенного в статье [4] алгоритма для протокола централизованного управления процессом присоединения.

## 6 Заключение

В данной работе представлено исследование протокола распределенного управления процессом присоединения и сравнение эффективности протоколов управления присоединением в сетях межмашинного взаимодействия на основе технологии Wi-Fi.

Эффективность протокола распределенного управления процессом присоединения зависит от его параметров, значения по-умолчанию которых предоставляются стандартом. Было показано, что изменение параметра  $T_{ac}$  в незначительной степени влияет на производительность этого протокола, параметр  $TI_{max}$  лучше устанавливать максимальным, в то время как в сценарии без скрытых станций в зависимости от величины параметра  $TI_{min}$

время подключения группы станций может сильно разниться. Причем, чем большее число станций предполагается подключать, тем большее значение параметра  $TI_{min}$  следует устанавливать.

Протокол распределенного управления процессом присоединения, как и предложенные в статье [4] решения, был реализован в комплексе имитационного моделирования ns-3 и были проведены эксперименты в сценарии, когда сеть нагружена не только подключающимися станциями, но и другими станциями, передающими насыщенные потоки данных. Согласно результатам моделирования для протокола распределенного управления процессом присоединения при использовании значений параметров протокола по-умолчанию, предложенных в стандарте, за конечное время подключится группа станций любого допустимого стандартом размера. Также было выполнено сравнение производительности протоколов управления процессом присоединения, в результате которого было выявлено, что при использовании предложенного в статье [4] алгоритма протокол централизованного управления процессом присоединения работает значительно эффективнее протокола распределенного управления процессом присоединения. Исходя из всего вышесказанного можно сделать следующий вывод: если есть точка доступа, имеющая возможность следить за процессом присоединения и адаптивно изменять порог присоединения, то следует использовать предложенный в статье [4] алгоритм для протокола централизованного управления присоединением; если же точка доступа не имеет такой возможности, следует использовать протокол распределенного управления присоединением с параметрами, предложенными в дополнении по-умолчанию.

## Список литературы

1. Sthapit Pranesh, Pyun Jae-Young. Station Grouping Strategy for Minimizing Association Delay in IEEE 802.11 ah // IEICE Transactions on Communications. — 2017.
2. Shahin Nurullah, Tann Libea, Kim Young-Tak. Enhanced registration procedure with NAV for mitigated contentions in M2M communications // Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2016 18th Asia-Pacific / IEEE. — 2016. — P. 1–6.
3. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. The Study of the Centralized Control Method to Hasten Link Set-up in IEEE 802.11 ah Networks // European Wireless 2015; 21th European Wireless Conference; Proceedings of / VDE. — 2015. — P. 1–6.
4. Fast Centralized Authentication in Wi-Fi HaLow Networks / Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Ekaterina Stepanova // Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on / IEEE. — 2017.
5. Красавина Татьяна Алексеевна, Банков Дмитрий Викторович, Хоров Евгений Михайлович. Исследование протокола распределенного управления процессом присоединения устройств при отсутствии помех в канале // Информационные технологии и системы, 2015 39-я междисциплинарная школа-конференция / Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН. — 2015. — P. 1074–1085.

6. Khorov Evgeny, Krotov Alexander, Lyakhov Andrey. Modelling machine type communication in IEEE 802.11 ah networks // Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on / IEEE. — 2015. — P. 1149–1154.
7. IEEE P802.11ah™ 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. — April.
8. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. The study of the distributed control method to hasten link set-up in IEEE 802.11 ah networks // Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), 2016 XV International Symposium / IEEE. — 2016. — P. 13–17.