

Исследование эффекта захвата канала в сетях Wi-Fi *

Илья Левицкий, Алексей Куреев

Институт Проблем Передачи Информации РАН
levitskiy@iitp.ru, kureev@iitp.ru

Аннотация В плотных сетях интерференция является основной проблемой, которая приводит к снижению пропускной способности. Часто считается, что перекрывающиеся передачи кадров приводят к потере обоих кадров. На самом деле иногда по крайней мере один кадр может быть декодирован, если его мощность приема выше, чем у другого кадра на некоторую predetermined величину. Способность устройства получать более сильный кадр, если он приходит позже слабого, называется эффектом захвата канала. Для различных устройств эффект захвата проявляется по-разному. В частности, мы можем различать эффекты преамбулы и захвата кадра. Основным вкладом в работу является разработанная экспериментальная установка, с помощью которой можно изучать поведение эффекта захвата в обычных устройствах. А также в работе представлена еще одна установка, позволяющая проанализировать эффективность устройств с эффектом захвата в условиях реальной сети. С помощью этих установок показано, что обладают эффектом немногие устройства, но именно такие устройства позволяют поддерживать пропускную способность сети на высоком уровне в условиях сильной интерференции.

Ключевые слова: Эффект захвата канала, Беспроводные сети, Wi-Fi, USRP, SDR, Интерференция

1 Введение

В радиосвязи эффект захвата – это явление, при котором сильнейший из двух одновременно передаваемых на одной частоте сигналов корректно демодулируется приемником. Способность приемника декодировать самый сильный кадр, даже если он приходит позже, является очень полезной при плотном развертывании сетей с десятками точек доступа Wi-Fi, расположенных в одной области пространства и в одном и том же частотном канале. Известными примерами таких сценариев являются жилые здания с точками доступа в каждой квартире, стадионы или торговые центры с тысячами точек доступа, развернутых для обеспечения широкополосного беспроводного доступа в Интернет для множества пользователей.

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10687)

Известно, что чаще всего пользователи подключены к точке доступа с самым высоким качеством принимаемого сигнала. Следовательно, сигнал от данной точки доступа является наиболее мощным. Более того, если разность мощностей между точкой доступа и интерферирующим устройством достаточно велика, то приёмник имеет возможность успешно принять более мощный кадр. Отметим, что в примере конечного автомата, описывающего приём кадра в стандарте IEEE 802.11 [1, раздел 17.3.12], устройство, после получения преамбулы кадра устройство, принимает кадр до его завершения, не пытаясь получить другую преамбулу. Это значит, что любой кадр, передача которого попадает на передачу уже принимаемого сигнала, неизбежно попадает в коллизию и оба кадра будут потеряны. Эффект захвата предназначен для помощи устройству получать мощные кадры корректно независимо от времени их появления.

Многие широко используемые результаты в математическом моделировании сетей Wi-Fi, такие как [2], были основаны на предположении, что устройства принимают кадры в соответствии со стандартом [1]. В связи с этим возникает вопрос, как производители реализуют механизм приёма кадров в устройствах и наблюдается ли в них эффект захвата.

Данный вопрос представляет особый интерес для разработчиков нового стандарта 802.11 ax [3]. Для повышения производительности плотных сетей стандарт предполагает эффективное использование пользователями частотно-временных ресурсов. Поэтому исследования эффекта захвата канала, предотвращающего значительное снижение пропускной способности в некоторых сценариях, являются особенно важными.

Научная новизна данной работы заключается в разработке метода, позволяющего экспериментально определить наличие эффекта захвата в произвольных сетевых картах, а также в исследовании характера его проявления. Простой способ, позволяющий определить, как именно проявляется эффект захвата в любых сетевых картах, предложен впервые.

Работа организована следующим образом. В разделе 2 определяется эффект захвата и объясняются различия между трактовками понятия «эффект захвата канала», используемыми в других работах. Раздел 3 рассматривает предыдущие исследования эффекта захвата. В разделе 4 подробно описывается экспериментальная установка для обнаружения эффекта захвата, приводится методика использования установки, представляются и анализируются экспериментальные результаты. В разделе 5 показано, как эффект захвата повышает пропускную способность соединений в условиях сильной интерференции. Раздел 6 завершает работу.

2 Об эффекте захвата канала

В различных работах термин «эффект захвата» используется для описания разных явлений. Некоторые авторы [4], [5] используют термин «эффект захвата», на самом деле описывая эффект подавления (англ. starvation effect). Эффект подавления проявляется в сценариях с несколькими потоками, где

один поток полностью или частично блокирует другой. По этой причине в беспроводных сетях, в которых устройства используют множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий (англ. Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA), приёмники испытывают серьёзные помехи в сценариях со скрытыми станциями.

Рассмотрим пример, приведённый на рис. 1. Пусть станция 1 и станция 3 находятся вне зоны радиовидимости друг друга. Если станции 1 и 3 передают насыщенные потоки станциям 2 и 4 соответственно, то пропускная способность соединения «1 - 2» ухудшается, поскольку станции 1 и 3 считают, что канал не занят, и почти всегда передают. Тогда с точки зрения станции 2 кадры от обоих передающих станций попадают в коллизию, и нет возможности принять ни один из них. В работе [6] показано, что в сетях Wi-Fi пропускная способность соединения «1 - 2» может быть на порядок ниже, чем пропускная способность соединения «3 - 4». Причина такого явления связана с правилами доступа к каналу и не вызвана принципами приёма кадра.

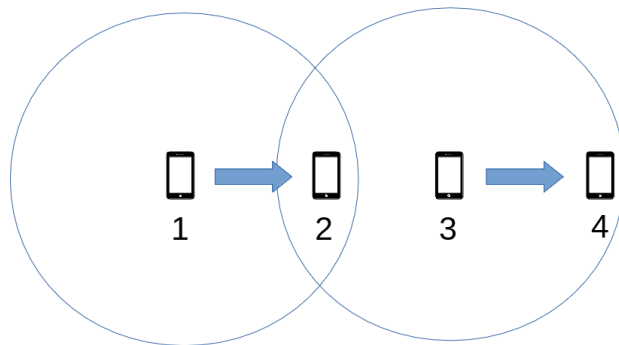


Рис. 1. Сценарий «эффекта подавления»

В данной работе под эффектом захвата понимают следующее: кадр с наибольшей мощностью с точки зрения приёмника может быть правильно декодирован даже при одновременной передаче несколькими станциями. Мощный кадр может начаться во время преамбулы слабого кадра или во время его тела. Для различия этих случаев, в данной работе они определяются как эффект захвата преамбулы и эффект захвата тела кадра, соответственно.

3 Обзор литературы

Влияние эффекта захвата в сети Wi-Fi исследуется 3 способами: с помощью построения аналитических моделей и их анализа, с помощью имитационного

моделирования и проводя эксперименты с реальными устройствами. Однако работ, использующих последний подход исследования, не так много.

В одной из таких работ ([7]) авторы разработали экспериментальную установку с использованием чипсетов Atheros AR5112 и доказали наличие эффекта захвата в этом устройстве. Используемая для изучения установка довольно сложна и состоит из пяти устройств, среди которых один приемник, два передатчика и два сниффера. Снифферы используются для измерения времени передачи кадров от передатчика и от источника помех. В установке также необходимо использовать препятствие между двумя передатчиками для уменьшения их взаимной радиовидимости. Для проведения экспериментов необходимо вносить изменения в драйвера устройства, что исключает массовость эксперимента. Несмотря на то, что в статье представлено исследование с использованием реального устройства, в экспериментах используется только одна модель уже устаревшего чипсета, и неясно, каким образом использовать установку для других чипсетов. Кроме того, наличие препятствия требует довольно сложной корректировки местоположения для достижения требуемой топологии сети.

В экспериментальной установке, разработанной в рамках данной работы, используется только одно программно-конфигурируемое приёмопередающее устройство, которое позволяет исследовать эффект захвата для любого устройства Wi-Fi. Более подробная информация об установке приведена в следующем разделе.

4 Анализ устройств на наличие эффекта захвата канала

4.1 Экспериментальная установка

Для исследования эффекта захвата необходимо создать поток перекрывающихся кадров с заданной мощностью передачи W_1 и W_2 и смещением по времени Δt , относительно начала слабого кадра, как показано на рис. 2. Затем необходимо определить, как такие перекрывающиеся кадры принимаются исследуемыми устройствами.

Для этого была создана экспериментальная установка, состоящая из двухканального передатчика, приемника (исследуемого Wi-Fi устройства), и вспомогательной точки доступа, см. рис. 3. Стоит обратить внимание, что разработанная установка позволяет исследовать несколько устройств Wi-Fi одновременно.

Приёмник В качестве приемника можно использовать, например, ноутбук, для сетевой карты которого необходимо оценить эффект захвата. Чтобы отслеживать пакеты, полученные данным устройством, используется программа Wireshark [8]. Поскольку многие устройства не поддерживают режим отслеживания (англ. monitor mode), передатчик должен генерировать

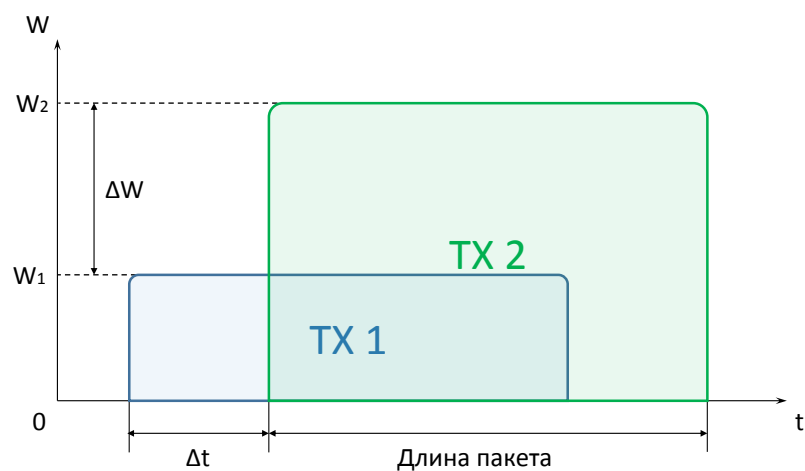


Рис. 2. Перекрывающиеся кадры

пакеты, которые должны быть обработаны на уровне выше канального, чтобы Wireshark обнаружила приём кадра. Чтобы была возможность легко обрабатывать полученные измерения, в каждом кадре указывается мощность передачи и смещение между перекрывающимися кадрами. Подробнее структура кадров описана ниже.

Вспомогательная точка доступа Поскольку без режима отслеживания устройство не может принимать пакеты, полученные из сети, к которой оно не подключено, используется вспомогательная точка доступа. В начале эксперимента устройство подключается к точке доступа. Во время эксперимента точка доступа продолжает отправлять служебную информацию, необходимую для поддержания соединения. Поэтому устройство остается подключенным к точке доступа.

В то же время передатчик генерирует кадры с адресом transmission address, который соответствует адресу точки доступа. Таким образом, устройство рассматривает эти кадры как отправленные точкой доступа.

Передатчик В качестве передатчика используется универсальная программно-определяемая радиосистема (англ. Universal Software Radio Peripheral, USRP). При подключении к компьютеру, USRP позволяет создавать прототипы систем беспроводной связи с использованием языка программирования LabVIEW.

USRP содержит программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), которая является эффективным инструментом для построения

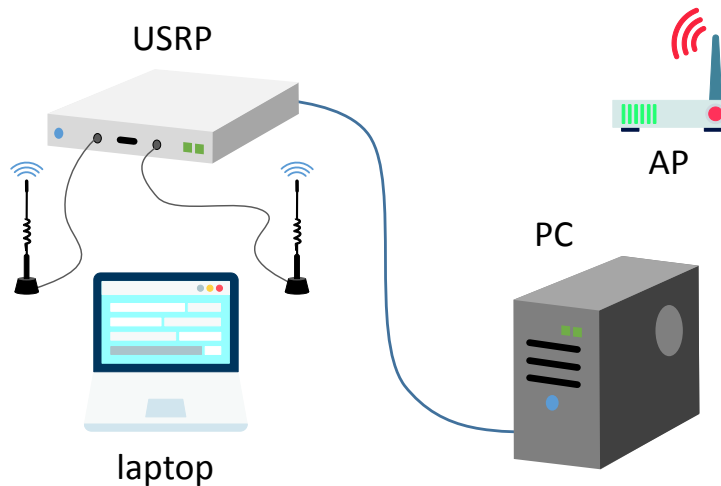


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

цифровых устройств, выполняющих передачу данных на высокой скорости. Поэтому с помощью USRP возможно реализовать функции управления доступом к среде (англ. medium access control, MAC). В частности, в разработанной установке используется NI USRP-2944R [9], которая имеет два отдельных встроенных приёмопередатчика (UBX-160 [10]), работающих в диапазоне от 10 МГц до 6 ГГц с максимальной полосой пропускания 160 МГц.

Для каждого приёмопередатчика имеется возможность варьировать мощность передачи в широком диапазоне. Для 2,4 ГГц аппаратное обеспечение USRP позволяет варьировать уровень мощности в диапазоне от -8 дБм до 20 дБм, а для 5 ГГц - в диапазоне от -20 дБм до 10 дБм. Для увеличения диапазона мощности дополнительно используется аттенюатор на 30 дБ.

Для генерации кадров с заданной мощностью передачи и смещением используется LabVIEW Communications 802.11 Application Framework. С его помощью можно осуществить передачу по стандарту 802.11, которые принимаются обычными устройствами Wi-Fi.

Application Framework был модифицирован в рамках работы, чтобы обеспечить одновременную передачу кадров с двух независимых приёмопередатчиков USRP-2944R. Упрощенная схема двухканального передатчика Wi-Fi показана на рис. 4.

Хост-приложение на стороне компьютера генерирует два независимых потока данных для обоих приёмопередатчиков и помещает данные в очереди FIFO прямого доступа к памяти (англ. direct memory access, DMA). USRP, который подключен к главному компьютеру, получает данные из очередей DMA FIFO и синхронно обрабатывает два потока данных параллельно. Для

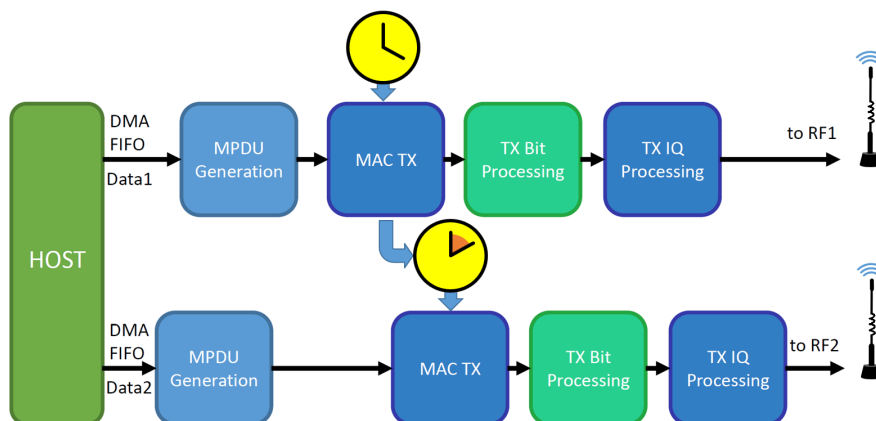


Рис. 4. Схема двухканального передатчика

простоты реализации, в качестве данных используются запросы ARP [11], которые предназначены для определения MAC-адреса, имея IP-адрес другого устройства.

Обработка данных начинается с блока генерации данных протокола MAC (MPDU generation block), который отвечает за формирование кадров согласно стандарту 802.11. В частности, он добавляет MAC заголовок к входящему блоку данных.

Чтобы отличить кадры, принадлежащие различным сериям экспериментов и упростить обработку результатов экспериментов, параметры эксперимента включены в заголовок MAC. А именно, каждый кадр содержит три поля адреса. Первый, адрес получателя, является широковещательным, так как отсылаются ARP-запросы. Второй, адрес передатчика, устанавливается равным адресу AP. Наконец, третий, который является адресом инициатора запроса. В этот адрес и занесена следующая информация. Байты 2-й и 3-й указывают мощность кадров двух передатчиков внутри USRP, 4-й байт используется для различения передатчиков, а 5-й и 6-й байты содержат смещение кадра, выраженное в мкс.

В блоке MAC TX реализованы функции передачи на MAC уровне. Модуль поддерживает отсчет отсрочки, контролирует состояние канала и обеспечивает правильное межкадровое расстояние. Синхронизация обоих передатчиков происходит с частотой 10 МГц. Стандартная процедура по контролю состояния канала, реализованная в 802.11 Application Framework, была отключена с целью обеспечения наилучшей синхронизации между двумя передатчиками. Таким образом, состояние канала не влияет на процесс передачи. Чтобы настроить смещение между кадрами от двух передатчиков, им назначается разное количество и продолжительность слотов отсрочки. На соответствующее время один из потоков будет задержан относительно

другого в блоке MAC TX. При таком подходе можно варьировать смещение с шагом 0.1 мкс.

В блоке обработки передаваемых битов (TX bit processing block) кадр MAC кодируется в соответствии с выбранной MCS.

Блок обработки TX IQ преобразовывает закодированные биты в I/Q отсчеты и посылает их в RF модуль, в котором происходит генерация конечного сигнала и его отправка.

4.2 Методология эксперимента

Описание эксперимента В экспериментах кадры передавались с использованием наиболее надежной сигнално-кодовой конструкции (MCS 0) стандартов 11a или 11g с номинальной скоростью передачи данных 6 Мбит/с. При таком MCS длительность передаваемых кадров равна 136 мкс.

Устройства расположены в пределах 1 м от антенн передатчика. Первоначально, мощность передачи W_{TX2} устанавливается максимальной, а W_{TX1} – минимальной, при которой устройство все еще получает большинство пакетов ($\approx 90\%$).

Смещение по времени Δt варьируется диапазоне $[0, 200]$ мкс. Для каждого смещения, передается 1000 пар перекрывающихся кадров.

Затем, в случае обнаружения эффекта захвата на определенном ноутбуке, эксперимент повторяется с различными уровнями мощности, чтобы выяснить свойства чипа и, в частности, как эффект захвата зависит от уровней мощности обоих пакетов.

Для этого проводятся эксперименты при временных сдвигах 1 мкс и 80 мкс, соответствующие преамбуле PНУ и телу кадра.

Калибровка установки Стоит отметить, что сигналы от двух антенн передатчика могут испытывать разное затухание PL_1 и PL_2 , и фактическая разница мощности передатчиков ΔW_{TX} не равна разнице на приемнике ΔW_{RX} . Для тех устройств, которые не поддерживают режим отслеживания, нет возможности непосредственно получить разницу между мощностью приема сильного и слабого кадров. Чтобы преодолеть эту проблему, применяется следующий метод.

Разница мощностей на приёме ΔW_{RX} определяется как

$$\begin{aligned} W_{RX2} - W_{RX1} &= (W_{TX2} - PL_2) - (W_{TX1} - PL_1) \\ &= \Delta W_{TX} - PL_2 + PL_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где W_{RX1} и W_{RX2} – принимаемые мощности от двух антенн передатчика, W_{TX1} и W_{TX2} – мощности при передаче. Отсюда видно, что если строить графики в зависимости от разницы мощности на приемнике, предполагая $\Delta W_{RX} = \Delta W_{TX}$, то график был бы смещён на величину $PL_2 - PL_1$ по оси абсцисс. Следующий шаг заключается в изменении отображения между антеннами и потоками передачи. Тогда значение ΔW_{RX} равно

$$\widetilde{W}_{RX2} - \widetilde{W}_{RX1} = \Delta\widetilde{W}_{TX} - PL_1 + PL_2. \quad (2)$$

При такой инверсии отображения потоков на антенны смещение графика изменит знак. Таким образом, проведя два идентичных эксперимента, в результате получаются 2 одинаковых графика, один смещённый относительно другого на величину $2|PL_2 - PL_1|$. Для определения действительных значений ΔW_{RX} достаточно взять полусумму выражений 1 и 2 и получить следующее выражение:

$$\Delta W_{RX} = \frac{\Delta W_{TX} + \Delta\widetilde{W}_{TX}}{2}. \quad (3)$$

Это означает, что, если провести 2 идентичных эксперимента, за исключением взаимной замены потоков передачи, то можно определить истинную зависимость доли принятых кадров (англ. Frame Reception Ratio, FRR) от ΔW_{RX} .

4.3 Численные результаты

Следующим этапом проводится анализ полученных результатов для двух случаев: когда наблюдается только эффект захвата преамбулы и когда также наблюдается эффект захвата тела кадра.

Рис. 5 показывает FRR для Intel WiFi Link 5300. Данное устройство может переключиться на более сильный кадр только во время первых 2 мкс, что соответствует участку для обнаружения кадра. Это приводит к почти 100% получению сильных кадров и абсолютным потерям слабых. Если более сильный кадр приходит позже, приемник не может переключиться на этот кадр, что приводит к потере обоих кадров. Оба кадра могут быть получены только при не перекрывающихся по времени передачах.

Результаты для чипсета AR9485, который обладает эффектом захвата тела кадра, изображены на рис. 6. Данный чипсет позволяет получать сильный кадр вне зависимости от начала его передачи. Единственным исключением является промежуток $\Delta t \in [3, 7]$ мкс, когда AGC начинает обрабатывать первый кадр, игнорируя второй, что приводит к низкой FRR в этой области.

В дальнейшем, для краткости, будем использовать термин «эффект захвата», подразумевая именно эффект захвата тела кадра. В противном случае будем говорить, что эффект захвата отсутствует.

В данном разделе определяется порог проявления эффекта захвата для чипсета AR9485. Рис. 7 иллюстрирует FRR кадров TX2 для $\Delta t = 80$ мкс и различных уровней мощности TX1. Видно, что для того, чтобы устройство переключилось на более сильный кадр, разница в силе сигнала должна быть около 8 дБ. Это значение почти не зависит от абсолютных значений мощностей кадров.

Помимо этого также была исследована зависимость величины порога от используемой сигнально-кодовой конструкции. Полученные результаты отражены на рис. 8. Отчетливо видно, что порог, заложенный в чипе, не меняется для различных MCS. При высоких индексах MCS порог смещен, что связано уже не с параметрами эффекта захвата, а с помехоустойчивостью используемого MCS. Значения этих порогов хорошо согласуются с другими проведенными экспериментальными результатами, например [12].

Таблица 1 подводит итоги результатов по обнаружению эффекта захвата в чипах Wi-Fi. Среди протестированных устройств лишь некоторые чипсеты производства Qualcomm имеют такой эффект.

Производитель	Дата релиза	Стандарты	Модель	Наличие эффекта
Broadcom	2012	a/b/g/n/ac	BCM4360	нет
Broadcom	2012	b/g/n	BCM43438	нет
Broadcom	2013	b/g/n	BCM4324A	нет
Intel	2008	a/b/g/n	Link 5300	нет
Intel	2009	b/g/n	Wireless-N 1000	нет
Intel	2009	a/b/g/n	Wireless-N 6205	нет
Intel	2009	a/b/g/n	Advanced-N 6250	нет
Intel	2015	a/b/g/n/ac	Wireless-AC 3165	нет
Intel	2014	a/b/g/n/ac	Wireless-AC 7265	нет
Qualcomm	2008	b/g/n	AR9285	нет
Qualcomm	2008	b/g/n	AR5B95	нет
Qualcomm	2008	b/g/n	AR928X	да
Qualcomm	2011	b/g/n	AR9485	да
Qualcomm	2014	a/b/g/n/ac	QCA9377	да
Qualcomm	2014	a/b/g/n/ac	QCNFA34AC	да

Таблица 1. Эффект захвата на теле кадра в различных устройствах

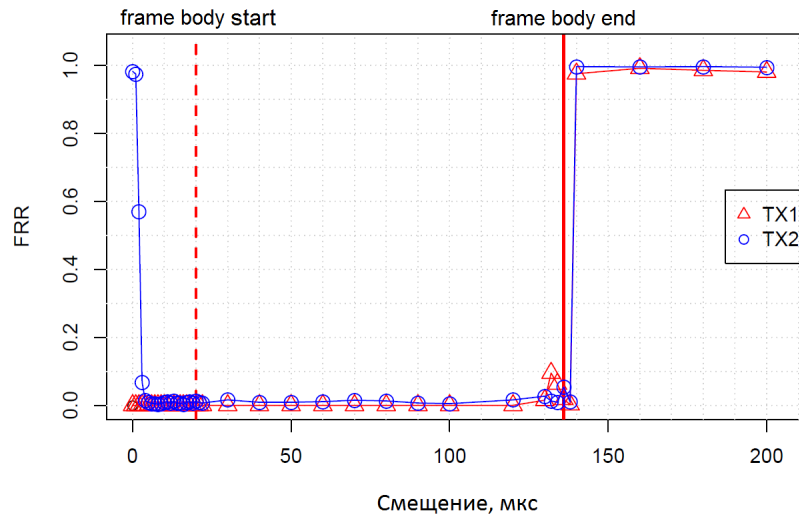


Рис. 5. Эффект захвата преамбулы

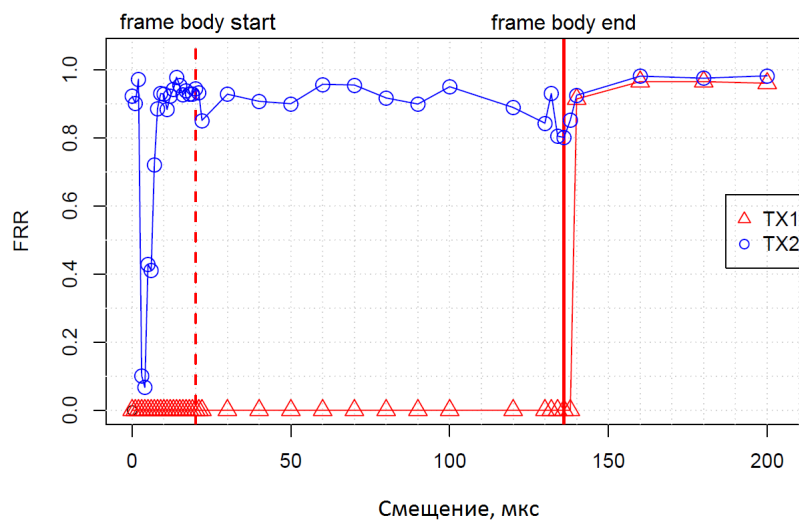


Рис. 6. Эффект захвата на всём кадре

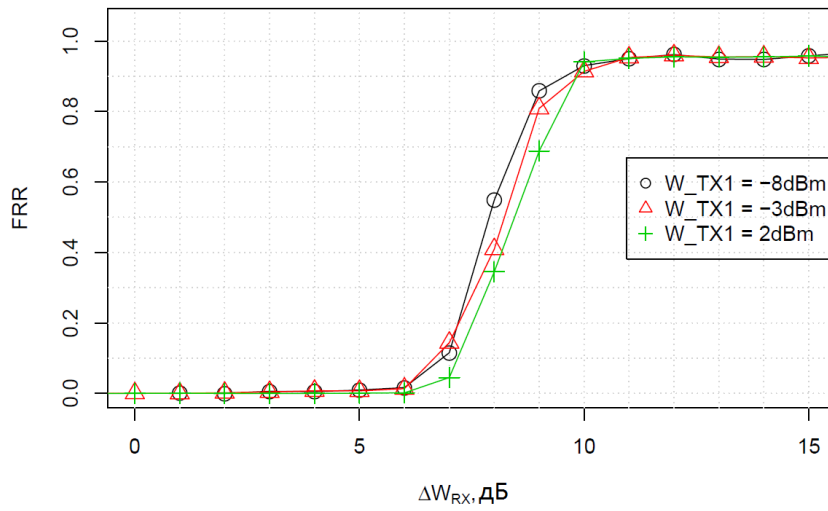


Рис. 7. Зависимость FRR сильного кадра от разницы мощностей, $\Delta t = 80 \mu\text{s}$

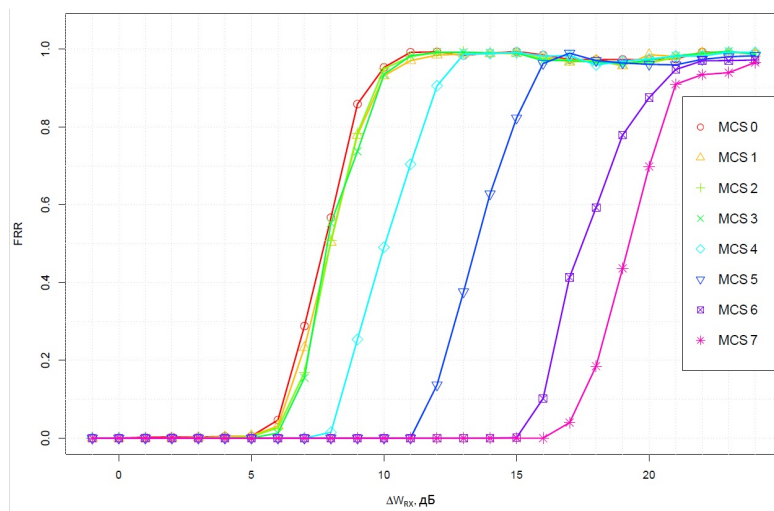


Рис. 8. Зависимость FRR сильного кадра от разницы мощностей, параметр - MCS

5 Анализ эффективности устройств с эффектом захвата в реальных сетях

5.1 Постановка задачи

После обнаружения наличия или отсутствия эффекта захвата в устройствах и его подробного исследования, следующей задачей является анализ эффективности данных устройств в реальных сетях. Схема используемого сценария изображена на рис. 1. Такой сценарий отвечает реальному случаю, например, когда две пары «точка доступа - мобильное устройство» находятся в соседних комнатах. Точки доступа активно отправляют данные своим мобильным устройствам, при этом являясь скрытыми друг от друга.

5.2 Описание проведения эксперимента

Новая схема отличается от предыдущей из раздела 4.1 тем, что теперь необходимо два USRP. Один из них выступает в роли передатчика 1, а второй ведет передачу в соединении «3 – 4». Приёмником 2 выступает тестируемое устройство. Использование именно USRP вместо точек доступа или других компьютеров позволяет гибко управлять мощностью передачи и порогом мощности принимаемого сигнала. Это позволяет поставить необходимый эксперимент в ограниченном пространстве. Для возможности проведения такого эксперимента, используется последняя версия 802.11 Application Framework, в котором корректным образом реализован DCF. Полезная информация в соединении «1 – 2» представляет собой кадры стандарта 802.11a, передающиеся на MCS0. Интерферирующие кадры в соединении «3 – 4» будут посылаться с теми же параметрами. Эксперименты проводились с размерами полезных данных в пакете 36 байт; длительность таких кадров равна 112 мкс.

5.3 Численные результаты

Измерения проводились с сетевой картой (AR9485) с эффектом захвата и с сетевой картой (BCM4324A) без эффекта захвата. На рис. 9 изображена зависимость пропускной способности соединения «1 – 2» от длины интерферирующего кадра в соединении «3 – 4». Графики отражают характерную ситуацию для устройств с наличием (пунктир) и отсутствием эффекта захвата (сплошная линия). Без эффекта захвата пропускная способность соединения «1 – 2» даже при низких мощностях «3 – 4» составляет не более 20% от максимальной, теоретически равной 1,05 Мбит/с.

При наличии эффекта пропускная способность близка к максимальной и снижается только при разнице мощностей близких к порогу приема в 10 дБ. Причина во флуктуации мощности, которые можно пронаблюдать при помощи Wireshark. Статистика мощности приёма при одной серии эксперимента показывает, что значения мощностей колеблются в пределах ± 3 дБ.

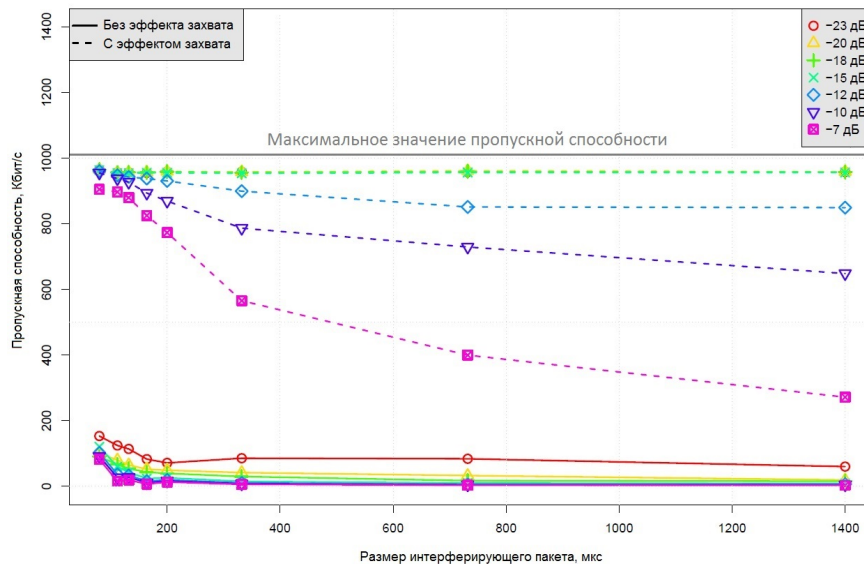


Рис. 9. Зависимость пропускной способности соединения «1 – 2» от длины интерферирующего пакета, объём пакета 36 байт

Из-за этой флуктуации с уменьшением разницы уменьшается и вероятность соблюдения порога, и, следовательно, срабатывания эффекта захвата.

Согласно построенным графикам, при одних и тех же параметрах эксперимента пропускная способность для устройства с эффектом захвата может превосходить пропускную способность устройства без эффекта в 5 раз при минимальных длинах интерферирующих кадров. При разности по мощности -12, -15 и -18 дБ и длинных интерферирующих кадрах первое устройство максимальную пропускную способность соединения, в то время как второе не способно принимать данные на фоне интерференции.

6 Заключение

В данной работе был изучен захват канала в устройствах Wi-Fi. Для этого была разработана и развернута экспериментальная установка, которая позволяет исследовать эффект захвата в произвольных устройствах без внесения изменений в их драйвера. В отличие от существующих установок, она обеспечивает высокую точность по времени и мощности посылки сигнала. Были введены и исследованы два типа эффекта захвата. Первый – эффект захвата преамбулы, второй – эффект захвата тела кадра. Результаты проведенных экспериментов показывают, что эффект захвата тела кадра наблюдается лишь в нескольких устройствах, в то время как эффект захвата преамбулы актуален для всех протестированных устройств.

Хотя эффект захвата тела кадра и не регламентирован стандартом, он довольно полезен для плотного развертывания со многими интерферирующими устройствами. В плотных сетях каждое устройство получает много чужих кадров низкой мощности, что не позволяет ему получать свои собственные кадры. Однако, как показывают результаты, большинство устройств не поддерживают эффект захвата и получают кадры по стандарту Wi-Fi.

В то время как большинство исследований рассматривают только один тип эффекта захвата или вообще не рассматривают эффект захвата, на самом деле в сети могут быть устройства с различными типами эффектов захвата. Это поднимает вопрос об эффективности и справедливости распределения ресурсов в такой сети. Соответствующие исследования имеют большое значение для разработки будущих технологий, работающих в плотных сетях.

Список литературы

1. “802.11-2016 - IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” *ANSI/IEEE Std. 802.11*, pp. 1 – 3534, December 2016.
2. G. Bianchi, “Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function,” *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
3. E. Khorov, A. Kiryanov, and A. Lyakhov, “IEEE 802.11 ax: How to Build High Efficiency WLANs,” in *2015 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, pp. 14–19, IEEE, 2015.
4. W. Wang, B. Leong, and W. T. Ooi, “Mitigating unfairness due to physical layer capture in practical 802.11 mesh networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 1, pp. 99–112, 2015.
5. V. Subramanian, K. Ramakrishnan, S. Kalyanaraman, and L. Ji, “Impact of interference and capture effects in 802.11 wireless networks on tcp,” in *Proceedings of the second international workshop on Wireless traffic measurements and modeling*, p. 2, ACM, 2006.
6. A. Lyakhov, I. Pustogarov, A. Safonov, and M. Yakimov, “Starvation effect study in IEEE 802.11 mesh networks,” in *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2009. MASS’09. IEEE 6th International Conference on*, pp. 651–656, IEEE, 2009.
7. J. Lee, W. Kim, S.-J. Lee, D. Jo, J. Ryu, T. Kwon, and Y. Choi, “An experimental study on the capture effect in 802.11 a networks,” in *Proceedings of the second ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization*, pp. 19–26, ACM, 2007.
8. G. Combs *et al.*, “Wireshark,” *Web page: <http://www.wireshark.org/last modified>*, pp. 12–02, 2007.
9. National Instruments, *Device specifications NI USRP-2944R*, 2016.
10. P. H. Dr., *UBX Daughterboard*. National Instruments.
11. D. C. Plummer, “RFC 826: An ethernet address resolution protocol,” *InterNet Network Working Group*, 1982.
12. G. Pei and T. R. Henderson, “Validation of ofdm error rate model in ns-3,” *Boeing Research and Technology*, 2010.