

Исследование скорости передачи данных и поведения устройств Wi-Fi в условиях сильной интерференции

Пойда А.И.^{1,2}, Ендовицкий Е.О.^{1,2}, Куреев А.А.^{1,2}

{poyda, endovitskiy, kureev}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

Аннотация Постоянно растет количество устройств, использующих технологию Wi-Fi, вследствие этого усиливается интерференция. Чтобы избежать ошибок из-за интерференции, стандарт IEEE 802.11 предусматривает правила передачи в условиях занятого канала. Например, канал считается занятым, если мощность шума выше порогового значения (англ.: Energy Detection, ED). Однако, как показано в нескольких исследованиях, несоответствие этим правилам может существенно сказаться на пропускной способности сети в сценариях с высокой интерференцией. В работе исследуется поведение устройств в условиях интерференции в канале. Для проведения измерений был собран экспериментальный стенд. Основой стенда служила программно-определяемая радиосистема, с помощью которой генерировался шум. Полученные данные показали, что в сценарии с сильной интерференцией поведение заметно отличается от описанного в стандарте, на который опираются аналитические и имитационные исследования. Выявленные отклонения могут существенно сказаться на скорости передачи данных при наличии сильной интерференции.

1 Введение

С каждым годом растет количество Wi-Fi устройств. Это приводит к усилению интерференции, что может сказываться на скорости передачи данных между этими устройствами.

Для снижения влияния интерференции в стандарте IEEE 802.11 [1] присутствует механизм прослушивания среды (англ.: Clear Channel Assessment, CCA). Когда на приемник поступает сигнал мощностью выше порога минимальной чувствительности приемника (англ.: Carrier Sensing Threshold,

Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00788, <https://rscf.ru/project/20-19-00788/>

CST), то начинается проверка на его соответствие преамбуле кадра Wi-Fi. В случае совпадения происходит прием кадра. Иначе, если мощность сигнала выше порога Energy Detection (ED) (-62 дБм), то среда считается занятой и устройство должно воздержаться от отправки кадров.

Механизм CCA используется в распределенной функции координации (англ.: Distributed coordination function, DCF) для измерения состояния канала. В DCF станция, имеющая кадры в очереди на передачу, не должна передавать кадры, пока канал занят. После освобождения канала станция ждёт интервал времени DIFS и случайный интервал, определяемый счётчиком отсрочки (англ.: Backoff). Счетчик Backoff генерируется случайным образом в интервале от 0 до $CW - 1$, где CW — размер конкурентного окна. Станция слушает канал в течение слота и, если канал был свободен, уменьшает счётчик отсрочки на единицу. При первой попытке передачи размер окна принимает минимальное значение $CW = CW_{min}$. Если передача оказалась unsuccessful, то станция снова генерирует счетчик Backoff, но уже с увеличенным в два раза размером окна $CW_i = 2CW_{i-1}$. Так повторяется до тех пор, пока кадр успешно не передается, либо окно не достигнет максимального значения CW_{max} . Дальнейшие попытки передачи будут производиться с окном равным CW_{max} , пока не будет достигнут предел количества попыток передач.

В сценариях с плотным развертыванием сети интерференция приводит к снижению пропускной способности, что наблюдается в исследовании [2]. Однако отклонения от протокола DCF могут существенно сказаться на скорости передачи данных в сценариях с сильной интерференцией. Так в работе [3] предлагается использовать динамический CST. В работе [4] помимо динамического CST также рассматривается и изменение параметров вектора распределения сети (англ.: Network Allocation Vector). Оба исследования с помощью имитационного моделирования показали значительное увеличение скорости передачи данных в сети по сравнению с сетями, работающими по стандарту IEEE 802.11.

Помимо CST существуют и другие модификации стандарта IEEE 802.11. Так, работы [5, 6] показали, что некоторые производители внедряют в свои устройства эффект захвата, который заключается в способности устройства начать прием кадра во время приема другого кадра меньшей мощности. В работе [7] проводится аналитическое исследование влияния эффекта захвата на работу беспроводной сети, и результаты показывают, что в некоторых сценариях наблюдается заметный прирост пропускной способности.

В работе [8] предлагается метод измерения порога ED у устройств Wi-Fi. По результатам измерений обнаружено, что при достижении шумом порогового значения, передача не прекращается полностью, что не соответствует протоколу DCF. В данной работе дается объяснение этому эффекту и исследуется поведение устройств при наличии в канале интерференции. С помощью программно-определяемой радиосистемы (англ.: Software Defined Radio, SDR) была собрана экспериментальная установка. Установка передавала шумоподобный сигнал, образованный с помощью кадров Wi-Fi с изме-

ненной преамбулой. Таким образом устройство воспринимало полученный сигнал как шум.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описаны установка и проведение эксперимента. Раздел 3 посвящен полученным результатам и их объяснению. В разделе 4 представлены выводы.

2 Эксперимент

Экспериментальная установка полностью повторяет установку из работы [8]. Оборудование, примененное в эксперименте:

- *USRP* – универсальная программно-определяемая радиосистема [9];
- *Монитор* – устройство, захватывающее кадры Wi-Fi;
- *Тестируемое устройство* – устройство, поведение которого требуется изучить;
- *ТД* – беспроводная точка доступа.



Рис. 1: Измерение интенсивности отправки пакетов с Тестируемого устройства.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. На первом этапе определяется мощность шума. Для этого USRP отправляет кадры Wi-Fi, и с помощью программы WireShark [10] на Тестируемом устройстве определяется мощность принятого сигнала.

На втором этапе Тестируемое устройство ведет передачу кадров на ТД в условиях шума. Шум генерируется при помощи USRP, которое отправляет кадры Wi-Fi с измененной преамбулой (*шумовой кадр*). Таким образом Тестируемое устройство не может распознать полученный сигнал как кадр

Wi-Fi и воспринимает его как шум, мощность которого определяется на первом этапе. Монитор захватывает переданные с Тестируемого устройства кадры с помощью WireShark для дальнейшего анализа.

Измерение проводится с фиксированными длительностями *межшумовых интервалов* (англ.: *Inter Noise Space, INS*). Длительность *шумовых кадров* составляет 4 мс. Тестируемое устройство генерирует пакеты с задержкой 1 мс.

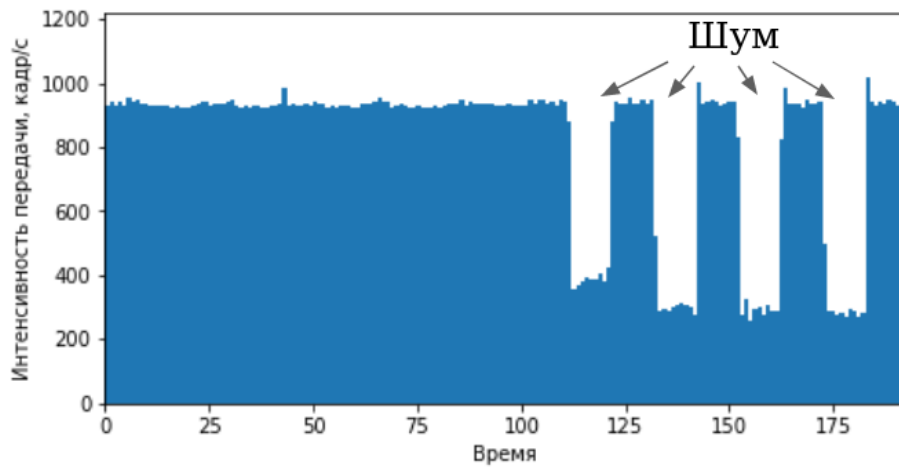
3 Обработка экспериментальных данных

По результатам измерений было установлено, что устройства могут передать кадр, даже если интервал между шумом был меньше DIFS. На рис. 2а предствалена зависимость интенсивности передачи кадров с Тестируемого устройства на ТД. Снижение интенсивности на графике обусловлено наличием в канале шума мощностью выше порога ED. Но согласно стандарту условиях шума в канале передача должна прекратиться полностью, и интенсивность должна понизиться до нуля.

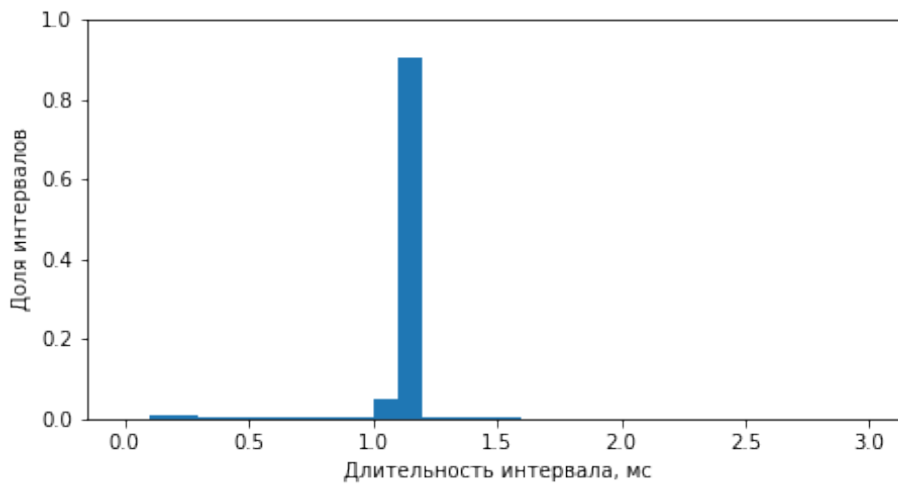
На основе захваченных с Тестируемого устройства кадров проводился анализ в несколько шагов. Сначала рассчитывались временные интервалы между соседними кадрами. Затем на основе интервалов строился график распределения интервалов: по оси абцисс отложена длительность интервалов, по оси ординат отложена доля интервалов. На рис. 2б представлено распределение для передачи кадров в свободный канал. На графике наблюдается единственный пик, который соответствует тому, что сгенерированный кадр сразу отправляется. На рис. 2в представлено распределение интервалов при наличии в канале шума. В отличие от передачи в свободный канал здесь наблюдается геометрическое распределение с шагом 4 мс, что соответствует длительности *шумовых кадров*.

3.1 Описание работы устройств Wi-Fi во время шума

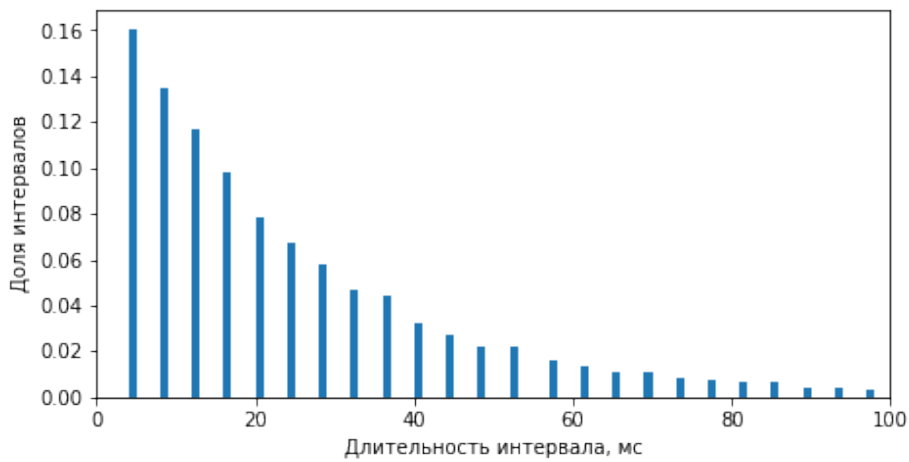
Полученную на рис. 2в картину можно объяснить следующим поведением: Тестируемое устройство непрерывно прослушивает канал, и пока в канале присутствует шум он считается занятым. После окончания шума Тестируемое устройство определяет канал как свободный, но не начинает отсчитывать DIFS. Вместо этого генерируется счетчик Backoff в диапазоне от 0 до $CW_n - 1$, где CW_n — размер окна, который используется при наличии шума. После того, как счетчик был сгенерирован, он сразу начинает отсчитываться. На рис. 3 представлена схема межшумового интервала. Пусть между *шумовыми кадрами* умещается N слотов (длительность межшумового интервала составляет N слотов), тогда, если Backoff $\leq N$, то кадр будет отправлен. Если же Backoff $> N$, то в канале возникает шум до того, и устройство начинает ожидать следующий межшумовой интервал, чтобы снова сгенерировать счетчик. Если предположить, что счетчик не генерируется заново, а замораживается, то на рис. 2в наблюдалось бы равномерное распределение.



(а) Интенсивность передачи в зависимости от наличия шума



(б) Распределение интервалов между кадрами (канал свободен)



(в) Распределение интервалов между кадрами (шум в канале)

Рис. 2: Передача кадров при наличии интерференции в канале.

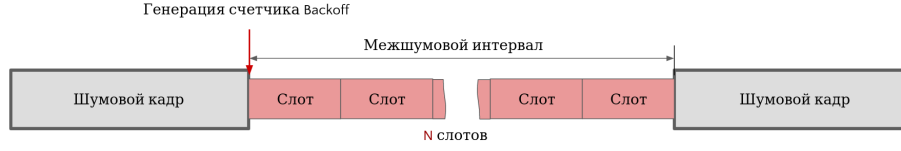


Рис. 3: Схема межшумового интервала.

Таким образом устройство может отправить кадр в данный межшумовой интервал с некоторой вероятностью. Введем вероятности отправить \mathbf{q} и отложить отправку \mathbf{p} . Тогда

$$\mathbf{q} = \frac{N}{CW_n}, \quad (1)$$

$$\mathbf{p} = 1 - \mathbf{q} = 1 - \frac{N}{CW_n}. \quad (2)$$

Данные величины являются параметрами для геометрического распределения, которое наблюдалось ранее. Величина m -го столбца на графике равна $H(m) = q \cdot p^{m-1}$. Дальнейший анализ посвящен вычислению параметра CW_n .

3.2 Определение величины окна CW_n

На рис. 4 представлены распределения интервалов для различных длительностей *межшумовых интервалов*. Для различных INS вычисляется параметр \mathbf{p} . Для этого строится распределение в логарифмическом масштабе, в следствие чего получается линейная зависимость:

$$\ln H(m) = \ln \mathbf{q} + (m - 1) \ln \mathbf{p}.$$

Затем с помощью линейной регрессии определяется наклон $k = \ln \mathbf{p}$, через который выражается \mathbf{p} : $\mathbf{p} = e^k$.

На основе полученных значений для каждого Тестируемого устройства строится зависимость $\mathbf{p}(INS)$, пример которой изображен на рис. 5. Она приближается прямой $\mathbf{p} = i + s \cdot INS$, где i — свободный коэффициент, s — коэффициент наклона. Чтобы определить размер окна, используем модель из раздела 3.1, где количество слотов N заменено на $\frac{INS}{9}$ (9 мкс — длительность слота [1]). Таким образом модель имеет вид:

$$\mathbf{p} = 1 - \frac{INS}{9 \cdot CW_n},$$

и применив её к экспериментальным данным, получим, что $s = -\frac{1}{9 \cdot CW_n}$, и тогда $CW_n = -\frac{1}{9 \cdot s}$.

Однако при проведении измерений наблюдалась зависимость параметра \mathbf{p} не только от INS , но и от мощности шума. Это может быть вызвано тем,

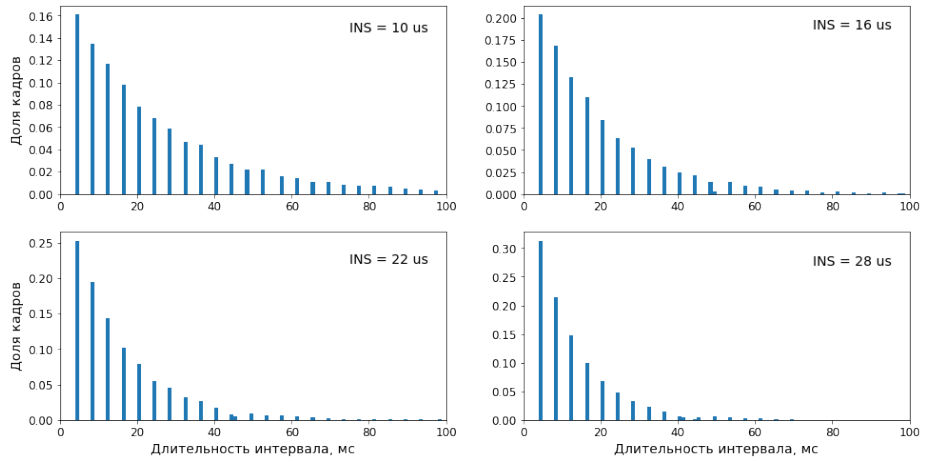


Рис. 4: Распределения интервалов для различных *INS*.

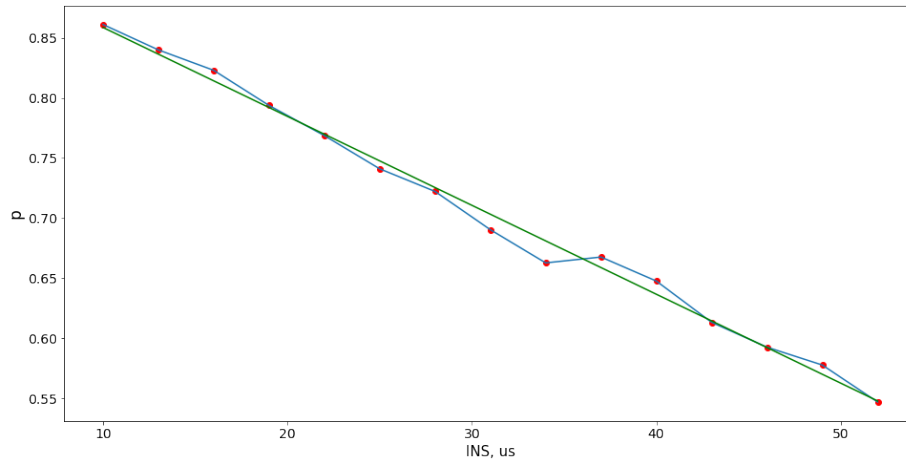


Рис. 5: Зависимость ρ от *INS*.

что при более сильном шуме Тестируемое устройство точнее определяет начало *шумового пакета* и занятость канала. Это приводит к уменьшению числа свободных слотов и, как следствие, вероятности отправки. На рис. 6 представлена зависимость $\mathbf{p} = i + s \cdot INS$ при различных уровнях мощности шума. Так, i и s зависят от мощности шума, причем, при увеличении этой мощности i стремится к 1. Если считать, что $s = -\frac{1}{9 \cdot CW_n}$, то при увеличении мощности шума экспериментальные данные хорошо приближаются описанной выше моделью.

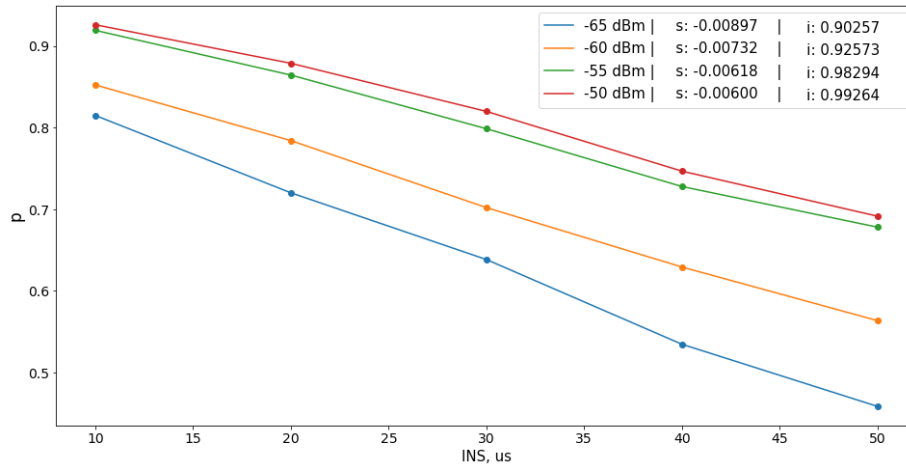


Рис. 6: Зависимость \mathbf{p} от INS при различных уровнях мощности шума.

3.3 Результаты

Поведение, описанное в разделе 3.1 наблюдается у всех протестированных устройств. Для них получены значения CW_n , ΔCW_n , s , i , которые приведены в табл. 1. Данные значения рассчитаны по трем значениям \mathbf{p} при $INS = 16, 25, 34$ мкс. Выявленные отклонения могут привести к неравномерному распределению ресурсов сети между устройствами. Так, если в канале присутствует сильная интерференция, то устройство, которое не ожидает DIFS, имеет приоритет доступа к среде, тем самым повышая свою скорость передачи данных.

4 Заключение

В данной работе изучалось поведение устройств Wi-Fi при наличии в канале интерференции. По результатам эксперимента было выявлено, что при

Таблица 1: Значения CW_n устройств Wi-Fi.

Сетевой адаптер	CW_n	Δ_{CW_n}	s	i
Intel Wireless - AC 9260	18.5	0.7337	-0.0060	0.9926
Intel Wireless - AC 9260	17.9	0.1841	-0.0062	1.0012
Intel Dual Band Wireless - AC 7265	4.7	0.3230	-0.0237	1.1581
Intel Dual Band Wireless - AC 3165	4.3	0.2074	-0.0256	1.1266
Intel Centrino Advanced - N 6235	11.0	0.5287	-0.0101	0.9844
Intel Dual Band Wireless - AC 8265	9.0	0.9840	-0.0123	1.0003
Intel Dual Band Wireless - AC 8265	9.0	0.0	-0.0123	1.0023
Intel Dual Band Wireless - AC 8265	9.4	0.4111	-0.0118	0.9878

освобождении канала после шума все протестированные устройства не ожидают DIFS, а сразу начинают отсчитывать Backoff. Причем наблюдения показали, что вероятность не отправить кадр в промежутке между шумом линейно убывает с увеличением этого промежутка. Для описания данной зависимости была предложена альтернативная стандарту модель поведения устройств при наличии в канале сильной интерференции. На основе этой модели был рассчитан набор соответствующих характеристик, которые совпали с результатами экспериментов. Также были даны оценки параметров предложенной модели, на основе экспериментальных данных. Наличие в устройстве Wi-Fi подобного поведения может привести к повышению скорости передачи данных этого устройства в сценариях с сильной интерференцией в канале.

Список литературы

1. IEEE 802.11-2020 - 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, 2020.
2. Syed Ikram, Roh Byeong-hee. Adaptive backoff algorithm for contention window for dense IEEE 802.11 WLANs // Mobile Information Systems. — 2016. — Vol. 2016.
3. Dynamic sensitivity control of access points for IEEE 802.11ax / M. Shahwaiz Afaqui, Eduard Garcia-Villegas, Elena Lopez-Aguilera, Daniel Camps-Mur // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). — 2016. — P. 1–7.
4. Merlin Simone, Abraham Santosh. Methods for Improving Medium Reuse in IEEE 802.11 Networks // 2009 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. — 2009. — P. 1–5.
5. Testbed to Study the Capture Effect: Can We Rely on this Effect in Modern Wi-Fi Networks / Evgeny Khorov, Aleksey Kureev, Ilya Levitsky, Andrey Lyakhov // 2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). — 2018. — P. 1–5.
6. Demo: Experimental Study of Capture Effect in Smartphones and Wi-Fi Access Points / Egor Endovitskiy, Evgeny Khorov, Aleksey Kureev, Ilya Levitsky //

- 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). — 2020. — P. 1–2.
7. Patras Paul, Qi Hanghang, Malone David. Exploiting the capture effect to improve WLAN throughput // 2012 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). — 2012. — P. 1–9.
 8. А. И. Пойда, Е. О. Ендовицкий, А. А. Куреев. Экспериментальное определение порогов Energy Detection в Wi-Fi устройствах. — Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (Москва), 2020.
 9. National Instruments. — Device specifications NI USRP-2944R : 10 MHz to 6 GHz Tunable RF Transceiver, 2016.
 10. The Wireshark team. — Wireshark Documentation, 2021. — Access mode: <https://www.wireshark.org/docs/> (online; accessed: 2021-08-31).