

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ МЕЖКАНАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В СЕТЯХ IEEE 802.11 ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

А.С. Викулов^{1*}, А.И. Парамонов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: asv012016@gmail.ru

Информация о статье

УДК 004.725.5

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Викулов А.С., Парамонов А.И. Исследование модели межканальной интерференции в сетях IEEE 802.11 для оценки пропускной способности // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 43–48. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-43-48

Аннотация: *Статья посвящена исследованию эффектов межканальной интерференции в сетях стандарта IEEE 802.11n/ac. В частности, предложен метод оценки влияния изменения отношения сигнал/шум на скорость модуляции и кодирования в заданных условиях. На примере нескольких практически значимых сценариев работы сети выполнены расчеты, показывающие модельное изменение скорости передачи данных. В частности, проведено сравнение нескольких наиболее распространенных частотных планов для сетей IEEE 802.11n/ac и количественно оценена их эффективность с позиции межканальной интерференции. Дополнительно получена оценка влияния сторонних сетей. Предложенный метод позволяет оценивать эффективность выбранного частотного плана с целью повышения качества функционирования беспроводной сети.*

Ключевые слова: *беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11, межканальная интерференция, отношение сигнал/шум, помехи, затухание сигнала.*

Введение

Влияние межканальной интерференции на целевой канал передачи является одним из наиболее существенных факторов, учитываемых при планировании или анализе современных беспроводных сетей вообще и сетей стандарта IEEE 802.11 в частности [1]. В работах ряда исследователей данная тема поднималась неоднократно. В работе [2] были рассмотрены эффекты межканальной интерференции для сети IEEE 802.11a, а применение моделей межканальной интерференции в сетях VANET рассмотрено в исследовании [3]. Важность корректной оценки значения этих эффектов обусловлена тем, что с ее помощью можно получить представления о работоспособности сети в заданных условиях, а также о характеристиках производительности ее отдельных ячеек.

Ключевым параметром, определяющим выбор режима модуляции и кодирования (MCS, от англ. Modulation and Coding Sequence) является отношение сигнал/шум (ОСШ), включающее в себя результаты эффектов интерференции. Так как основным результатом межканальной интерференции является его ухудшение (деградация) [4], рас-

смотрим в этом свете сигналы, создающие интерференцию. С этой целью мы будем рассматривать типичную корпоративную сеть стандарта IEEE 802.11n/ac, развернутую в большом здании с целью обеспечения сплошного радиопокрытия на целевых площадях. Подобные сети традиционно строятся по ячеистой схеме, при которой каждая ячейка сети образована одной точкой доступа, имеющей два радиомодуля, каждый из которых работает в одном из двух частотных диапазонов: 2,4 и 5 ГГц. В данном случае нас будет интересовать взаимное влияние сигналов от смежных ячеек сети.

Модель межканальной интерференции

Введем следующие предположения:

- 1) излучение всех источников сигналов изотропно, все антенны являются всенаправленными, а их коэффициенты усиления равны между собой;
- 2) отсутствуют помехи посторонней (не Wi-Fi) природы;
- 3) внутриканальная интерференция отсутствует, т.е. частотно-территориальное планирование выполнено идеально;

4) помехообразующие сигналы распределены по целевой площади покрытия равномерно;

5) целевой сигнал принимается на площади с постоянным уровнем P_T (дБм).

При этом ячейки беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС) рассматриваются нами как «черные ящики», т. е. мы не разделяем в них точку доступа (ТД) и клиентское оборудование. Это связано с тем, что использование канала, т. е. вероятность занятости канального ресурса данной ячейки является суперпозицией этих параметров всех ее составляющих (ТД и оборудования клиентов).

В работе [5] было показано, что в свете модели затухания, определяемой в [6], величина затухания $L(d)$ равна:

$$L(d) = \begin{cases} 0 & d < 0 \\ 20\lg(F_{i,n}) + N\lg(d) + L_f(m) - 28 & 0 \leq d \leq R, \\ 0 & d > R \end{cases} \quad (1)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м); f – частота (МГц); N – дистанционный коэффициент потерь мощности; m – количество препятствий; $L_f(m)$ – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через препятствие (дБ).

Тогда среднее затухание сигнала для равномерного распределения источников помехи $M(L)$ (дБ) будет определяться как:

$$M(L) = L_{\max} - \frac{N}{2\ln 10}, \quad (2)$$

где L_{\max} – наибольшее возможное затухание, определяемое чувствительностью приемника (дБ).

Как было показано ранее в [5], спектральная маска сигнала $SI_n(f)$ (дБм), создающего интерференцию, определяется выражением:

$$SI_n(f) = P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - L, \quad (3)$$

где $S(f)$ – спектральная маска канала НТ/ВНТ20; P_{rad} – мощность излучения источника сигнала (дБм); $F_{i,n}$ – центральная частота канала, создающего интерференцию (МГц); n – номер канала, при их общем числе равном k ; L – среднее затухание сигнала (дБ).

Спектральная маска целевого сигнала $S_T(f)$ (дБм) определяется выражением:

$$S_T(f) = P_T + S(f - F_T). \quad (4)$$

Поскольку ключевым параметром, определяющим выбор режима MCS, является ОСШ [7], а также ввиду того, что основным результатом межканальной интерференции является его уменьшение (деградация) [4], рассмотрим сигнал, создающий интерференцию.

Введем следующие обозначения:

m_n – число ТД канала n , чей сигнал доступен для приема;

$F_{i,n}$ – частота канала с номером n ;

Q – вероятность занятости канального ресурса.

Будем полагать, что Q одинакова для всех ТД, создающих помехи и представляет собой фактически долю времени, в течение которого временной ресурс канала занят. Поскольку мы приняли, что внутриканальная интерференция отсутствует, то $m_n = 0$ для n , равного номеру целевого канала. В [5] было показано, что общая спектральная маска всех помех $SI_w(f)$ (мВт) равна:

$$SI_w(f) = NF + Qm_n \sum_{n=1}^k 10^{\frac{P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - L}{10}}, \quad (5)$$

где NF – шумовой порог (мВт).

Спектральная маска целевого сигнала в абсолютных единицах $Sw_T(f)$ (мВт) будет определяться как:

$$Sw_T(f) = 10^{\frac{P_T + S(f - F_T)}{10}}. \quad (6)$$

Тогда, согласно [8], деградация ОСШ, вызванная межканальной интерференцией, составляет:

$$\Delta SNR = SNR_0 - SNR, \quad (7)$$

где SNR – ОСШ для целевого канала (дБ), определяемое как:

$$SNR = 10\lg \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} SI_w(f) df}, \quad (8)$$

а SNR_0 – ОСШ в отсутствие межканальной интерференции, определяемое как:

$$SNR_0 = 10\lg \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{NF \cdot 2A_T}, \quad (9)$$

если A_T – половина ширины основной части спектральной маски целевого канала.

Полученная величина ΔSNR представляет собой модельное значение, на которое уменьшится ОСШ для целевого сигнала, т. е. позволит оценивать уменьшение пиковой пропускной способности канала в связи с необходимостью для ТД работать в режимах, соответствующих меньшим индексам MCS.

Далее рассмотрим типовые сценарии работы, наиболее часто встречающиеся в проектной практике, и оценим расчетные значения ΔSNR для каждого из них.

Модель влияния на скорость передачи

Теперь рассмотрим, как влияет рассмотренное уменьшение ОСШ на фактическую скорость передачи, определяемую индексом MCS.

Введем скорость передачи согласно MCS $PHYRate$ (Мбит/с) [9]:

$$PHYRate = \frac{N_{DBPS}}{T_{SYM}}, \quad (10)$$

где T_{SYM} – длительность передачи символа с учетом межсимвольного защитного интервала (мкс).

При этом зависимость числа бит полезной нагрузки на OFDM-символ, согласно [7], удобно принять как:

$$N_{DBPS}(SNR) = \begin{cases} 0; SNR < 2 \\ 26; 2 \leq SNR < 5 \\ 52; 5 \leq SNR < 9 \\ N_{DBPS_{max}} \left(1 - \exp\left(-\frac{SNR^2}{2a^2}\right) \right); SNR > 9 \end{cases}, \quad (11)$$

где $N_{DBPS_{max}}$ – наибольшее число бит данных на OFDM-символ; a – полуширина гауссоиды, аппроксимирующей целевую дискретную функцию [7]. В рассматриваемых условиях для 802.11ac $N_{DBPS_{max}}$ соответствует 312 и для 802.11n – 260.

Теперь рассмотрим зависимость $PHYRate(SNR)$ для области $SNR > 9$ дБ:

$$PHYRate = \frac{N_{DBPS_{max}} \left(1 - \exp\left(-\frac{SNR^2}{2a^2}\right) \right)}{T_{SYM}}. \quad (12)$$

Поскольку функция (12) является монотонно возрастающей [7], то значение $\Delta PHYRate$, соответствующее величине ΔSNR , будет определяться как:

$$\Delta PHYRate = PHYRate_0 - PHYRate, \quad (13)$$

и после преобразований:

$$\Delta PHYRate = \frac{N_{DBPS_{max}}}{T_{SYM}} \times \left(\exp\left(-\frac{(SNR_0 - \Delta SNR)^2}{2a^2}\right) - \exp\left(-\frac{SNR_0^2}{2a^2}\right) \right), \quad (14)$$

где $PHYRate_0$ – это скорость передачи при ОСШ, равном SNR_0 .

Таким образом, если работа идет при значениях величины ОСШ больших, чем 9 дБ, то удобно воспользоваться формулой (14) для оценки фактического значения деградации скорости модуляции и кодирования как функции от снижения (деградации) значения ОСШ (дБ).

Количественные оценки для различных сценариев работы

Теперь, имея в нашем распоряжении модель, характеризующую уменьшение ОСШ как модельную меру межканальной интерференции, оценим работу сетей IEEE 802.11 для различных сценариев их работы. Рассматриваемые сценарии и их параметры приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры рассматриваемых сценариев работы

№	Стандартные параметры			Частотный план	Сторонние сети	Тип канала-помехи
	Версия стандарта	Диапазон, ГГц	Номер и тип целевого канала			
1.	IEEE 802.11n	2,4	6, HT20	1,6,11	Нет	HT20
2.	IEEE 802.11n	2,4	6, HT20	1,6,11	Да	HT20
3.	IEEE 802.11n	2,4	6, HT20	1,6,11	Да	HT40
4.	IEEE 802.11n	2,4	5, HT20	1,5,9,13	Нет	HT20
5.	IEEE 802.11n	2,4	4, HT20	1,4,8,11	Нет	HT20
6.	IEEE 802.11ac	5	44, VHT20	UNII 1-2	Да	VHT20
7.	IEEE 802.11ac	5	44, VHT20	UNII 1-2	Да	VHT80

Поясним выбор параметров из таблицы 1. Будем учитывать следующие факторы.

1) Стандарты. Так, в каждом из диапазонов мы будем рассматривать только наиболее современный работоспособный режим работы: 802.11n для 2,4 ГГц и 802.11ac для 5 ГГц.

2) Частотный план. Является важнейшей отправной точкой, поэтому для диапазона 2,4 ГГц мы рассмотрим три наиболее популярных частотных плана, обозначив их как «1, 6, 11», «1, 5, 9, 13» и «1, 4, 8, 11». При этом числа через запятую обозначают номера частотных каналов согласно [10]. Первый из них является типовым частотным планом, рекомендуемым для частотно-территориального планирования сетей Wi-Fi во всем мире, поскольку обеспечивает работоспособность ячеистой БЛВС в любом регуляторном домене [11]. Два других часто рассматривают с целью организовать покрытия че-

тырьмя каналами в различных регуляторных условиях. При этом план «1, 5, 9, 13» является предпочтительным при доступности канала 13, а план «1, 4, 8, 11» – при его недоступности [4, 12].

3) Помехи. Т. е. имеются или нет в радиусе действия ячейки сторонних сетей, создающие для целевой ячейки эффекты межканальной интерференции. Будем при этом считать, что в случае существенного их влияния помехи имеются в каждом канале, т. е. соответствующий диапазон зашумлен сторонними сетями равномерно.

4) Тип канала, создающего интерференцию (помехи). Так, для диапазона 2,4 ГГц, будем рассматривать каналы HT20 и HT40. Такой выбор объясняется необходимостью продемонстрировать количественно влияние канала шириной 40 МГц для сети 802.11n в диапазоне 2,4 ГГц, поскольку более широкие каналы в данном случае

недоступны. В диапазоне 5 ГГц для сети 802.11ac, доступны более широкие режимы агрегирования, поэтому будем учитывать влияние каналов VHT20 и VHT80.

В данном случае в первых 5 сценариях (см. таблицу 1) рассматривается работа в диапазоне 2,4 ГГц в различных условиях, а в сценариях 6 и 7 рассматриваем частотный план, в котором используются только поддиапазоны UNII-1 и UNII-2 (8 каналов с номерами от 36 до 64). При этом для сценария 7, будем считать, что агрегированных (VHT80) каналов, создающих помеху, используется три: (36+40+44+48), (44+48+52+56) и (52+56+60+64).

Метод, результаты расчетов и их анализ

В работе [5] было ранее показано, что среднее затухание L из формулы (3) помехообразующего сигнала для диапазона 5 ГГц в соответствии с моделью составляет 89,26 дБ. Что касается диапазона 2,4 ГГц, то это значение отличается незначительно и составляет 89,48 дБ в рамках принятой в работе модели. Будем считать, что уровень приема целевого сигнала стабилен и составляет -60 дБм, а шумовой порог в условиях работы равен -90 дБм, ($SNR_0 = 30$ дБ) – типовое значение для ОСШ в корпоративных сетях [10, 7].

Для описания влияния сторонних сетей на наиболее распространенные частотные планы приведен рисунок 1. Для удобства восприятия, выбран логарифмический масштаб по шкале мощности сигнала S .

В таблице 2 приведены основные результаты расчетов: значения деградации ОСШ, согласно (7), и модельного снижения скорости модуляции и кодирования, согласно (14). Особо отметим практическое отсутствие деградации ОСШ для рекомендуемых частотных планов в типовых внедрениях БЛВС (сценарии 1 и 4).

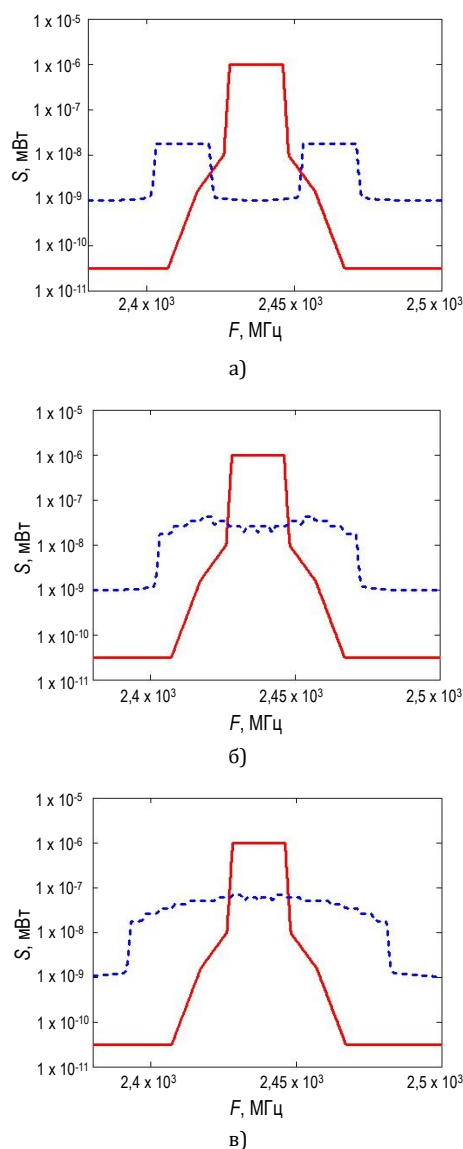


Рис. 1. Энергетический спектр целевого сигнала (красная линия) на фоне суммарной помехи (синяя линия) для сценария 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов

№	Версия стандарта	Сторонние сети	Тип канала-помехи	m_n	Q	ΔSNR , дБ	$\Delta PHYRate$, Мбит/с
1.	IEEE 802.11n	Нет	HT20	2	0,3	0,11	0,08
2.	IEEE 802.11n	Да	HT20	2	0,3	13,98	26,94
3.	IEEE 802.11n	Да	HT40	1	0,3	17,93	40,75
4.	IEEE 802.11n	Нет	HT20	2	0,3	0,35	0,25
5.	IEEE 802.11n	Нет	HT20	2	0,3	6,33	7,45
6.	IEEE 802.11ac	Да	VHT20	1	0,3	0,21	0,18
7.	IEEE 802.11ac	Да	VHT80	1	0,3	12,75	27,63

Из таблицы 2 видно, что частотный план в диапазоне 2,4 ГГц с выбором каналов «1, 4, 8, 11» является нежелательным, поскольку по сравнению со сценариями 1 и 4 дает заметное (на 7,4 Мбит/с) снижение средней скорости модуляции и кодиро-

вания. В то же время частотный план с номерами каналов «1, 5, 9, 13» для диапазона 2,4 ГГц, является приемлемым при условии корректной поддержки абонентскими устройствами работы в канале 13 [13]. Однако стоит отметить, что увеличение числа

доступных каналов с трех до четырех принципиально не решит существующие проблемы недостатка доступной полосы спектра для большинства инсталляций в данном частотном диапазоне; в то же время это расширит проектные возможности для решения конкретной задачи по построению радиопокрытия.

Для работы в диапазоне 5 ГГц видно практическое отсутствие негативного влияния сторонних сетей, поскольку при работе в этом диапазоне центральные частоты каналов имеют шаг, равный 20 МГц, что частично исключает характерную для диапазона 2,4 ГГц ситуацию, когда используют произвольный выбор каналов. В то же время, применение агрегирования каналов в режиме VHT80 (сценарий 7) дает негативный эффект с точки зрения влияния межканальной интерференции в диапазоне 5 ГГц, сравнимый по порядку величины с применением каналов HT40 на частотах 2,4 ГГц (сценарий 3).

Выводы

В результате проведенного исследования разработана модель для количественной оценки влияния межканальной интерференции на скорость модуляции и кодирования, предложен метод рас-

чета и получены количественные оценки работы сети IEEE 802.11n/ac в различных режимах, встречающихся в инженерной практике, а также получена количественная оценка практической возможности использования основных четырехканальных частотных планов для работы в диапазоне 2,4 ГГц, с учетом межканальной интерференции.

С точки зрения дальнейшей работы, развитием данного подхода видится рассмотрение результатов натуральных наблюдений в сетях беспроводного доступа с их оценкой согласно предложенной модели межканальной интерференции.

Интересным представляется рассмотрение сценария 1 для помехообразующих сигналов, которые создаются источниками, находящимися в прямой видимости от целевой ТД. Значимость рассмотрения такого случая состоит в том, что это наиболее часто встречающаяся ситуация покрытия этажной планировки, в случае если планировка является протяженным вдоль одной оси крылом здания с одним длинным коридором. Полученные в работе результаты могут быть использованы в задачах анализа функционирования, а также в инженерных задачах планирования БЛВС.

Список используемых источников

1. Викулов А.С., Парамонов А.И. Анализ основных видов помех в задаче планирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 1. С. 21–31. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/20185/21-31.pdf> (дата обращения: 18.02.2019)
2. Angelakis V., Papadakis S., Siris V., Tragantitis A. Adjacent channel interference in 802.11a: Modeling and testbed validation // Proceedings of the Radio and Wireless Symposium (Orlando, USA, 22–24 January 2008). Piscataway, NJ: IEEE, 2008. PP. 591–594. DOI:10.1109/RWS.2008.4463561
3. Campolo C., Sommer C., Dressler F., Molinaro A. On the impact of adjacent channel interference in multi-channel VANETs // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–27 May 2016). Piscataway, NJ: IEEE, 2016. DOI:10.1109/ICC.2016.7511085
4. Florwick J., Whiteaker J., Amrod A.C., Woodhams J. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education // Cisco Systems Design Guide. 2017. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1250-series/design_guide_c07-693245.pdf. (дата обращения: 18.02.2019)
5. Викулов А.С. Модель межканальной интерференции в сетях IEEE 802.11 в задаче оценки пропускной способности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 1(33). С. 36–45.
6. Рекомендация МСЭ-R P.1238-8 (07/2015). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц–100 ГГц. Серия Р. Распространение радиоволн.
7. Викулов А.С., Парамонов А.И. Модель канала OFDM в задаче оценки эффективности сети IEEE 802.11 // Информационные технологии. 2018. Т. 16. № 3. С. 290–297.
8. Рекомендация МСЭ-R SM.337-5 (2018). Частотный и территориальный разнос.
9. Викулов А.С., Парамонов А.И. Эффективность использования канала и метод оптимизации числа кадров в блоке A-MSDU для сети IEEE 802.11ac // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 4(32). С. 21–31.
10. IEEE Std 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. NY: IEEE, 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7786995
11. IEEE Standard Association. IEEE Std 802.11d-2001. *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 3: Specification for operation in additional regulatory domains*. NY: IEEE; 2001. DOI:10.1109/IEEESTD.2001.93285
12. Outdoor MIMO Wireless Networks // Validated Reference Design. Sunnyvale: Aruba Networks, Inc., 2012.
13. Channel Deployment Issues for 2.4-GHz 802.11 WLANs. San Jose: Cisco Systems, Inc., 2004.

* * *

ADJACENT CHANNEL INTERFERENCE MODEL ANALYSIS FOR THROUGHPUT ESTIMATION OF THE IEEE 802.11 NETWORKS

A. Vikulov¹, A. Paramonov¹

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Vikulov A., Paramonov A. Adjacent Channel Interference Model Analysis for Throughput Estimation of the IEEE 802.11 Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(2):43–48. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-2-43-48>

Abstract: *The article is devoted to the analysis of the adjacent-channel interference effects in the IEEE 802.11n/ac networks. In particular, a method is proposed for estimating the modulation and coding rate change as a function of the signal-to-noise ratio degradation in the adjacent channel interference conditions. A number of work scenarios have been selected, for which calculations have been performed, showing the estimated degradation of the data rate. In particular, a comparison of several common frequency plans for IEEE 802.11n/ac networks was made and their effectiveness was estimated from the perspective of adjacent-channel interference. Thus, the impact of extraneous networks has been estimated. The proposed method provides the opportunity to estimate the efficiency of the channel plan selected in order to improve the network operation.*

Keywords: *wireless access network, IEEE 802.11, adjacent channel interference, signal to noise ratio, interference, signal attenuation.*

References

1. Vikulov A., Paramonov A. Analysis of radio interference influence on the design process of the high density WI-FI Networks. *Telecom IT*. 2018;6(1):21–31. (in Russ.) Available from: <http://www.sut.ru/doci/nauka/review/20185/21-31.pdf> [Accessed 18th February 2019]
2. Angelakis V., Papadakis S., Siris V., Traganitis A. Adjacent channel interference in 802.11a: Modeling and testbed validation. *Proceedings of the Radio and Wireless Symposium, 22–24 January 2008, Orlando, USA*. Piscataway, NJ: IEEE, 2008. p.591–594. Available from: <https://doi.org/10.1109/RWS.2008.4463561>
3. Campolo C., Sommer C., Dressler F., Molinaro A. On the impact of adjacent channel interference in multi-channel VANETs. *Proceedings of the International Conference on Communications (ICC), 22–27 May 2016, Kuala Lumpur, Malaysia*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. Available from: <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511085>
4. Florwick J., Whiteaker J., Amrod A.C., Woodhams J. *Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems Design Guide*. 2017. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1250-series/design_guide_c07-693245.pdf. [Accessed 18th February 2019]
5. Vikulov A.S. Interchannel interference model in IEEE 802.11 networks for the task of traffic capacity estimation. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*. 2019;1(33):36–45. (in Russ.)
6. Rec. ITU-R P.1238-8. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. July 2015.
7. Vikulov A.S., Paramonov A.I. OFDM Channel model in the problem of the IEEE 802.11 network efficiency estimation. *Infokommunikatsionnye tehnologii*. 2018;16(3):290–297. (in Russ.)
8. Rec. ITU-R SM.337-5. Frequency and distance separations. 2018.
9. Vikulov A.S., Paramonov A.I. The Efficiency of Channel Utilization and Optimization Method of Frame Count in A-MSDU Unit for IEEE 802.11ac Network. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*. 2018;4(32):21–31. (in Russ.)
10. IEEE Standard Association. IEEE Std 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*. NY: IEEE; 2016. Available from: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7786995>
11. IEEE Standard Association. IEEE Std 802.11d-2001. *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. Amendment 3: Specification for operation in additional regulatory domains*. NY: IEEE; 2001. DOI:10.1109/IEEESTD.2001.93285
12. Validated Reference Design. Outdoor MIMO Wireless Networks. Sunnyvale: Aruba Networks, Inc.; 2012.
13. Channel Deployment Issues for 2.4-GHz 802.11 WLANs. San Jose: Cisco Systems, Inc.; 2004.