

## Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 004.725.5

### МОДЕЛЬ МЕЖКАНАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В СЕТЯХ IEEE 802.11 В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

**Викулов Антон Сергеевич**

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

*E-mail:* asv012016@gmail.com.

*Адрес:* 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22/1.

*Аннотация:* В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем при моделировании, проектировании и диагностике сетей Wi-Fi различного назначения является межканальная интерференция со стороны посторонних сетей той же технологии, ввиду её негативного влияния на целевую ячейку сети. В данной работе рассмотрена одна из моделей затухания помехообразующих сигналов и предложен метод расчёта среднего затухания посторонних сигналов. Далее предлагается модель межканальной интерференции для сети Wi-Fi с целью дальнейшего её применения для оценки работоспособности, что является актуальной для современной проектной практики задачей. Основным результатом работы является модель деградации соотношения сигнал/шум как следствие межканальной интерференции.

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

#### Введение

Как правило, целью инженера-проектировщика беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС) является получение технического решения, отвечающего требованиям заказчика. Чаще всего такое решение является компромиссом между объёмом (и ценой) ресурсов и качеством услуг для ожидаемого спроса на услуги (абонентского трафика). Поскольку в решении фигурирует качество и абонентский трафик, то должны быть определены параметры, которыми они оцениваются. Для получения конкретных решений существует ряд методик, предлагаемых производителями оборудования БЛВС [1–4]. Как правило, эти методики основаны на некоторых упрощённых моделях и позволяют получить приближённые решения при ряде допущений. Поскольку конкретные условия не всегда соответствуют тем допущениям, которые приняты в данных методиках, проектировщик не всегда может достичь целевых параметров. Так, например, может возникнуть задача выяснения причин низкого качества

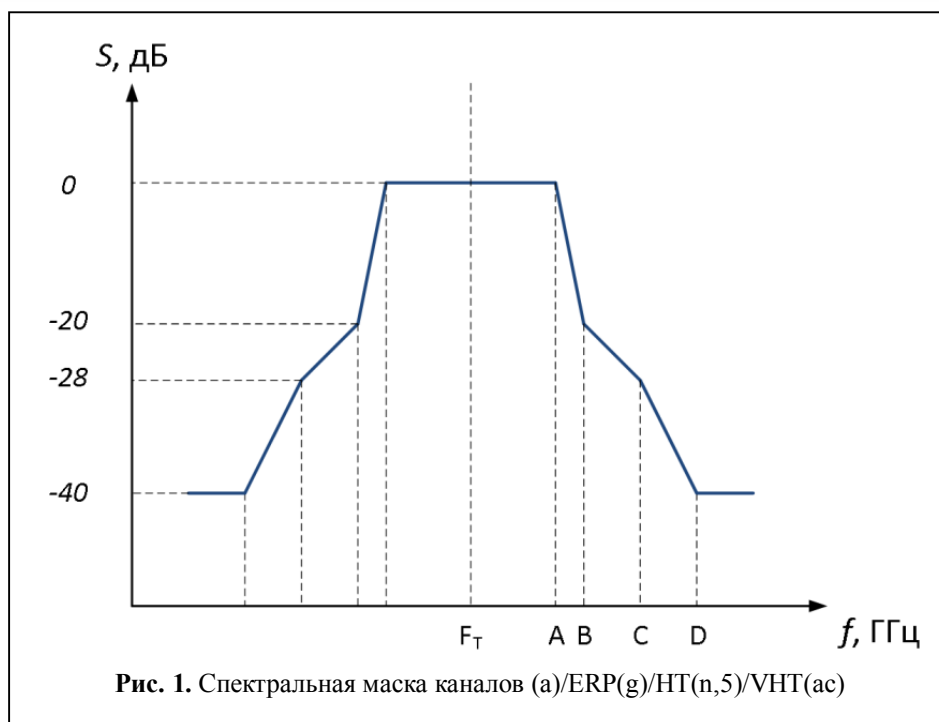
БЛВС на конкретной площадке.

Тому может быть множество причин, наиболее распространёнными из которых являются:

- смешанный клиентский состав в ячейке БЛВС [5–6];
- интенсивность трафика, занятость эфира [7–8];
- условия распространения сигнала (препятствия, зашумленность эфира);
- помехи от сторонних сетей Wi-Fi [9];
- помехи посторонней (не-Wi-Fi) природы [9].

Современные БЛВС [10] всё чаще являются сетями высокой плотности в двух смыслах. Это с одной стороны – БЛВС с высокой плотностью пользователей, порядка 1 клиентского устройства на 1 кв. м. площади радиопокрытия [11]. С другой стороны, это плотное размещение частотных каналов в спектре, вызванное двумя факторами:

- плотное размещение БЛВС в городской среде;



– неидеальное частотно-территориальное планирование в БЛВС, вызванное чисто геометрическими факторами с одной стороны и неоптимальной настройкой оборудования с другой.

Это создает условия для роста эффектов межканальной интерференции (Adjacent Channel Interference – ACI), которые необходимо учитывать как при радиопланировании, так и при диагностике БЛВС. Нередко даже при корректном частотно-территориальном планировании [12] и настройке оборудования, помехи от смежных БЛВС вносят наибольший вклад в снижение качества работы. Ниже рассмотрим этот фактор более детально. Отметим, что в общем случае влияние геометрически смежных ячеек той же БЛВС и аналогичных ячеек посторонней БЛВС строго говоря различно. Происходит это потому, что контроллер,

управляющий своими точками доступа, иногда в состоянии глобально управлять эфиром в смежных ячейках для минимизации подобного влияния. Однако в дальнейшем допустим, что данный механизм в сети не задействован, или его влияние на работу минимально.

Из инженерной практики известно, что для оценки занятости эфира и спектра нужно проводить

### Постановка задачи

продолжительный мониторинг с применением специализированного ПО, которое в полевых условиях трудно развернуть немедленно [7]. Поэтому для немедленной оценки с приемлемым для практики приближением нужно иметь несколько более простой инструмент.

Зададимся целью получить модель влияния помех, создающих межканальную интерференцию на целевой сигнал стандарта IEEE 802.11 [13].

На рис. 1 показана спектральная маска, т. е. максимально допустимая спектральная плотность энергии сигнала передачи, выраженная как функция частоты [14] OFDM-модулированных каналов типа ERP, HT и VHT соответственно, стандартов IEEE 802.11g/n/ac [13]. В таблице 1 приведены её параметры. Обратим внимание, что сюда не относятся сигналы стандарта IEEE 802.11b, поскольку на их физическом уровне OFDM модуляция не используется. Маска будет также отлична для каналов HT в диапазоне 2,4 ГГц, поскольку их спектральная

**Таблица 1.** Характеристики спектральной маски канала

Параметры каналов различных типов, МГц				
Тип канала	A	B	C	D
ERP/HT/VHT 20	9	11	20	30
HT/VHT 40	19	21	40	60
VHT 80	39	41	80	120
VHT 160	79	81	160	240

маска при той же форме имеет несколько отличные от приведённой уровни для ключевых точек диаграммы, а также, по той же причине, для каналов режима VHT80+80.

Будем считать, что из вводных данных мы обладаем сведениями об уровне приёма целевого сигнала (дБм), его частоте (МГц), а также аналогичными характеристиками всех прочих доступных в данной точке пространства сигналов от ячеек сетей IEEE 802.11. Допустим, что мы оперируем только сигналами в диапазоне 5 ГГц.

Допустим, что горизонтальные (азимутальные) проекции диаграмм направленности всех источников сигнала говорят об изотропности излучения, т. е. антенны являются «всенаправленными», а коэффициенты усиления антенн всех устройств равны между собой. Будем также считать, что на приёмнике не превышен пороговый уровень приёма, определяемый в стандарте (-30 дБм для диапазона 5 ГГц). Отметим, что ввиду отсутствия внутриканальной интерференции, в рассматриваемых условиях на канальном уровне не будут задействованы механизмы CCA (Clear Channel Assessment), включение которых определено в стандарте [13] для различных доступных ширин канала через задание пороговых уровней приёма.

#### Модель межканальной интерференции

Найдём параметр, который будет количественно учитывать эффекты ACI. Наиболее строгий подход требует смоделировать воздействие на приёмник всех участвующих в интерференции сигналов с их гармониками, с учётом многих частных характеристик, например избирательности приёмника. Но такая задача потребует детального рассмотрения частотных характеристик модулированного сигнала с глубоким рассмотрением интерференционной картины с позиций радиофизики. В рамках текущей работы, посвящённой верхним относительно физического уровням модели ВОС (взаимодействия открытых систем), будем, где это возможно, упрощать взгляд на физический уровень БЛВС.

Поэтому в рамках данной работы ограничимся рассмотрением спектральных плотностей мощности для всех сигналов, взаимодействующих в рассматриваемой полосе частот.

В рекомендации МСЭ-R SM.337-5 «Частотный и территориальный разнос» в рамках методики определения частотно/территориального разноса для радиосистем при расчёте помехи целевого сигнала вводится понятие спектрального фактора, который зависит от степени перекрытия площадей спектров полосой пропускания приёмника и спектром мощности мешающего сигнала. С большим разнесением по частоте степень такого перекрытия уменьшается, что приводит к уменьшению мощности помехи, с учётом амплитудно-частотной характеристики приёмника (АЧХ) [15].

Такой параметр зависит от спектральных характеристик помехи и приёмника, испытывающего помеху, и для практических расчетов необходимо иметь точные сведения относительно спектральной плотности мощности мешающего сигнала, которая зависит от таких факторов, как используемый метод модуляции и ширина полосы информационного сигнала для аналоговых систем, и скорость передачи данных в случае цифровых систем. Однако, поскольку спектральная маска сигнала для нас определена изначально, мы можем сразу учитывать эффекты перекрытия спектральных масок целевого канала (на котором идет работа) с центральной частотой  $F_T$  и канала, создающего интерференцию, с центральной частотой  $F_{i,n}$ , где  $n$  – число, идентифицирующее канал, создающий ACI.

Определим  $S_T(f)$ , как распределение уровня мощности полезного сигнала на спектре, а  $S_{I_n}(f)$  – как распределение уровня мощности сигнала, создающего ACI. Спектральная маска канала приведена на рис. 1. Аналитически функцию распределения уровня сигнала  $S(f)$  для канала соответствующего типа (см. таблицу 1) определим как:

$$S(f) = \begin{cases} -40; & f \leq -D \\ \frac{12}{D-C} \cdot f + \frac{12 \cdot D}{D-C} - 40; & -D < f \leq -C \\ \frac{8}{C-B} \cdot f + \frac{8 \cdot C}{C-B} - 28; & -C < f \leq -B \\ \frac{20}{B-A} \cdot f + \frac{20 \cdot A}{B-A}; & -B < f \leq -A \\ 0; & -A < f \leq A \\ -\frac{20}{B-A} \cdot f + \frac{20 \cdot A}{B-A}; & A < f \leq B \\ -\frac{8}{C-B} \cdot f + \frac{8 \cdot C}{C-B} - 28; & B < f \leq C \\ -\frac{12}{D-C} \cdot f + \frac{12 \cdot D}{D-C} - 40; & C < f \leq D \\ -40 & f > D \end{cases} \quad (1)$$

Получив, таким образом, аналитический вид для маски канала в относительных величинах (дБ), сделаем абсолютную привязку к реальному значению измеренного уровня для канала, создающего межканальную интерференцию

$$SI_n(f) = P_n + S(f - F_{i,n}), \quad (2)$$

$$S_T(f) = P_T + S(f - F_T), \quad (3)$$

где  $P_n$  (дБм) – измеренный уровень сигнала для  $n$ -го сигнала, создающего АСИ;

$P_T$  (дБм) – измеренный уровень целевого сигнала.

При этом:

$$P_n = P_{rad} - M(L), \quad (4)$$

где  $P_{rad}$  – уровень мощности излучения источника сигнала, создающего помеху;  $M(L)$  – среднее затухание помехообразующего сигнала, т. е.

$$SI_n(f) = P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L). \quad (5)$$

Количественно пересечение каналов будем оценивать путём расчёта площади пересечения спектра мощности целевого сигнала  $S_T(f)$  (дБм) и спектра мощности сигнала  $SI_n(f)$  (дБм), создающего помеху. При этом, ввиду ограниченности спектра собственно QAM-модулированного сигнала (OFDM), для целевого сигнала будем учитывать только площадь симметричной фигуры, ограниченной по оси абсцисс отметкой  $A$ . Пересечение площадей спектров приведено на рис. 2, где

–  $A_T$  (МГц) – частота для точки  $A$  для целевого канала (см. таблицу 1, рис. 1);

–  $D_{i,n}$  (МГц) – частота для точки  $D$  для канала, создающего интерференцию (см. таблицу 1, рис. 1);

–  $F_T$  (МГц) – центральная частота целевого канала, на котором идет передача;

–  $F_{i,n}$  (МГц) – центральная частота канала, создающего интерференцию.

Рис. 2 иллюстрирует случай для  $F_{i,n} > F_T$ .

Примем как допущение, что приёмник обладает идеальной избирательностью, а его АЧХ имеет прямоугольную форму и соответствует участку спектра  $F_T$  на промежутке  $[F_T - A_T; F_T + A_T]$ .

Таким образом, мы рассматриваем площадь пересечения спектральных масок, как количественную характеристику радиочастотного влияния каналов, создающих АСИ на целевой канал Wi-Fi в данной точке пространства.

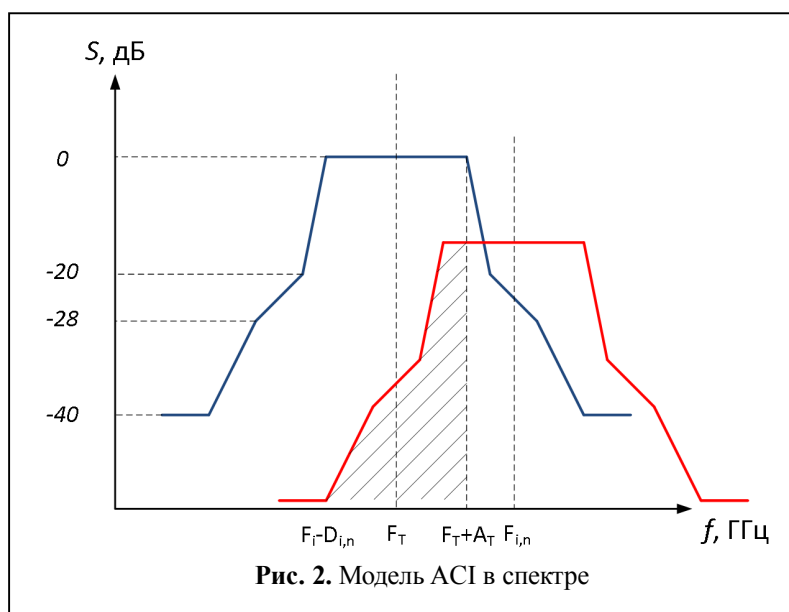


Рис. 2. Модель АСИ в спектре

Каналы, создающие внутриканальную интерференцию (Co-Channel Interference – CCI), в рамках данного приближения учитывать не будем, поскольку алгоритм работы функции доступа к среде для сети стандарта IEEE 802.11 принципиально отличается для случая CCI (преамбула кадра демодулирована) и ACI (сигнал фактически не опознан как сигнал IEEE 802.11). Т. е. будем считать, что частотное планирование БЛВС выполнено идеально и внутриканальная интерференция отсутствует.

Нужно помнить, что данный параметр сам по себе не учитывает фактическую занятость эфирного времени, а лишь отмечает влияние зарегистрированных смежных БЛВС (создающих ACI), однако в рамках предполагаемого набора инструментов факт регистрации смежной БЛВС сам по себе обозначает наличие передачи.

#### Модель затухания помехообразующего сигнала

Опишем затухание сигнала моделью, рекомендованной [15] для применения внутри помещений (ITU-R 1238):

$$L(d) = 20 \lg(f) + N \lg(d) + L_f(m) - 28, \quad (6)$$

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

Таким образом, уровень приёма помехообразующего сигнала на его центральной частоте определяется как:

$$P_n = P_{rad} - (20 \lg(F_{i,n}) + N \lg(d) + L_f(m) - 28). \quad (7)$$

Применим подход авторов работы [17]: «В общем случае, источники помехообразующего сигнала распределены по обслуживаемой территории случайным образом, следовательно, величина расстояния  $d$  и затухания  $L(d)$  сигнала между ними также является случайной величиной. В данном случае мы не учитываем замирания сигнала, который также отражаются

на характере случайной величины затухания. В данном анализе будем учитывать лишь фактор взаимного расположения источников помех и приемника».

Переформулируем (6):

$$L(d) = \begin{cases} 0 & d < 0 \\ 20 \lg(F_{i,n}) + N \lg(d) + \\ + L_f(m) - 28 & 0 \leq d \leq R \\ 0 & d > R \end{cases} \quad (8)$$

где  $d$  – расстояние (м);  $n$  – номер источника помехи.

Так как уровень приёма является функцией от случайной величины (координат), то функция распределения  $L$  может быть определена как:

$$F(L) = \iint_{D_L} f(x, y) dx dy, \quad (9)$$

где  $D_L$  – область значений  $L$ ;  $f(x, y)$  – функция распределения пользователей на круге радиуса  $R$ . Плотность вероятности  $L$  определяется как:

$$f(L) = \frac{dF(L)}{dL}. \quad (10)$$

Математическое ожидание  $L$  определяется как:

$$M(L) = \int_{L_{MIN}}^{L_{MAX}} L \cdot f(L) dL. \quad (11)$$

Рассмотрим равномерное распределение вероятности распределения источников помех по территории.

Полагаем, что равномерное распределение задано на круге, площадь которого равна  $S$ , радиус  $R$ , на интервале  $0 \leq r \leq R$ . Радиус зоны  $R$  определяется как  $R = \arg\{P_{rad} - L_{MAX} = -82 \text{ дБм}\}$  (м), где  $L_{MAX}$  – максимальное затухание сигнала до уровня предельной чувствительности приёмника  $-82$  дБм, определяемой стандартом [13], т. е.  $L_{MAX} = L(R)$ , а  $P_{rad}$  – уровень мощности излучения источника сигнала.

Функция плотности вероятности для равномерного распределения внутри круга является константой  $f(x, y) = const$ :

$$f(x, y) = \frac{1}{S} = \frac{1}{\pi R^2}.$$

Если функция, выражающая зависимость затухания сигнала  $L$  от расстояния до источника помехи имеет вид (8), то выразим из модели затухания:

$$L(r) = 20 \lg(F_{i,n}) + N \lg(r) + L_f(m) - 28.$$

Обозначим

$$-20 \lg(F_{i,n}) - L_f(m) + 28 = G,$$

где  $G = const$ .

Тогда после преобразований получим:

$$r = 10^{\frac{G+L(r)}{N}}.$$

Функция распределения затухания сигнала  $L$  на круге  $R$ , в соответствии с (9):

$$\begin{aligned} F(L) &= \int_0^{2\pi} \int_{\frac{G+L(r)}{N}}^R \frac{1}{S} r dr d\theta = \\ &= 1 - \frac{1}{R^2} \cdot 10^{\frac{2G}{N}} \cdot 10^{\frac{2L(r)}{N}}. \end{aligned} \quad (12)$$

График функции распределения затухания представлен на рис. 3.

Функция плотности вероятности, в соответствии с (10):

$$f(L) = \frac{dF(L)}{dL} = \frac{2 \ln 10}{N \cdot R^2} \cdot 10^{\frac{2G}{N}} \cdot 10^{\frac{2L(r)}{N}}. \quad (13)$$

График функции распределения затухания представлен на рис. 4.

Определим область значений величины затухания сигнала  $L$ . Максимальному  $L$  соответствует минимальный уровень приёма, являющийся предельным с точки зрения чувствительности принимающей стороны. В стандарте [12] он принимается за  $-82$  дБм. Если  $P_{rad} = 14$  дБм, то  $L_{MAX} = 14 - (-82) = 96$  дБ. Минимальному  $L$  соответствует уровень приёма, являющийся максимальным с точки зрения стандарта [12]. Для диапазона 5 ГГц, наибольшим уровнем приёма является величина  $-30$  дБм. Поэтому

$$L_{MIN} = 14 - (-30) = 44 \text{ дБ.}$$

Аналогично, для диапазона 2,4 ГГц:

$$L_{MIN} = 14 - (-20) = 34 \text{ дБ.}$$

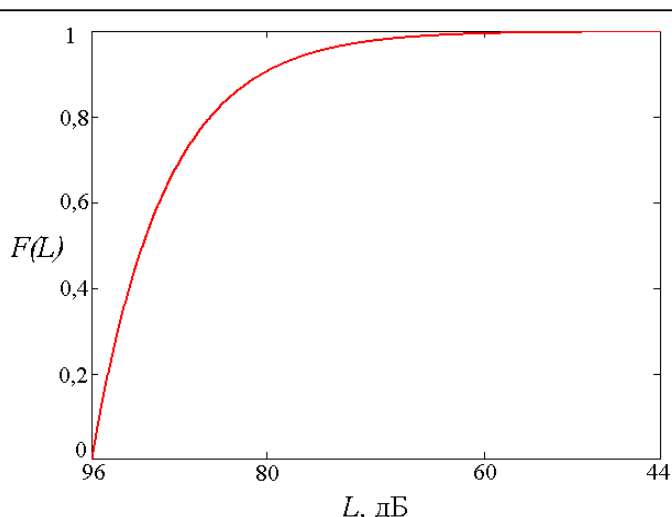


Рис 3. График функции распределения затухания

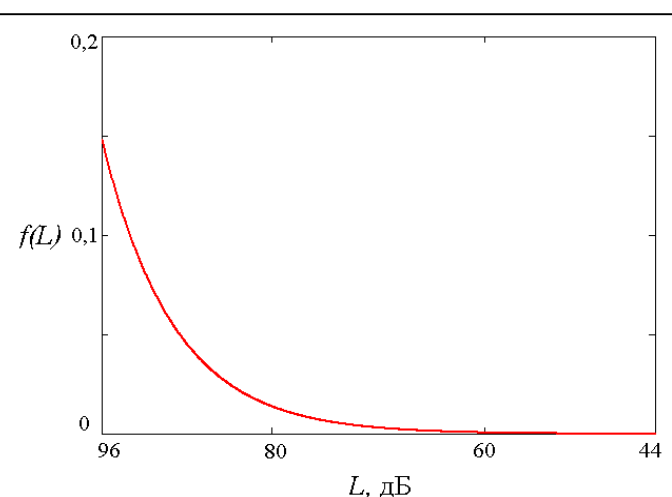


Рис 4. График функции плотности вероятности распределения затухания

Математическое ожидание затухания  $M(L)$  помехообразующего сигнала в зоне связи (на круге  $R$ ), в соответствии с (11) будет определяться как:

$$M(L) = \int_{L_{MIN}}^{L_{MAX}} L \cdot \frac{2 \ln 10}{N \cdot R^2} \cdot 10^{\frac{2G}{N}} \cdot 10^{\frac{2L(r)}{N}} \cdot dL, \text{ дБ.} \quad (14)$$

Из рис. 3 видно, что поскольку  $f(L_{MIN}) \approx f(0)$ , удобно принять  $L_{MIN} = 0$ , что даст возможность упростить выражение. Тогда после интегрирования и преобразований:

$$M(L) = L_{MAX} + \frac{N}{2 \ln 10} \left( 10^{\frac{-2L_{MAX}}{N}} - 1 \right).$$

А поскольку  $10^{\frac{-2L_{MAX}}{N}} = 6,4 \cdot 10^{-7} \approx 0$ , то:

$$M(L) \approx L_{MAX} - \frac{N}{2 \ln 10}. \quad (15)$$

Т. е. среднее затухание определяется только выбранным в модели (6) дистанционным коэффициентом потерь мощности  $N$ . Корректность принятого допущения о равенстве нулю величины  $L_{MIN}$  удобно проверить численным расчётом в пакете MathCAD согласно формуле (14):

$$M(L) = \int_0^{44} L \cdot f(L) dL = 0,016 \text{ дБ}.$$

Таким образом, принятое допущение вносит дополнительную ошибку в 0,016 дБ, что является допустимым в рамках данного подхода.

Теперь проведём расчёт для полученной аналитической формы (15). В части параметра  $N$  отметим, что для офисных помещений для частот 5 ГГц  $N = 31$ . В части параметра, характеризующего затухание в межэтажном перекрытии, поскольку мы рассматриваем плоскую зону покрытия, данный коэффициент в нашем случае равен нулю,  $L_f(m) = 0$ . Поскольку уровень излучения  $P_{rad} = 14$  дБм, соответствующий мощности, равной 25 мВт является типовым для корпоративных сетей [2], оценим предельный радиус целевой ячейки. Так, ранее было получено:

$$r = 10^{\frac{L(r) - 20 \lg(F_{i,n}) - L_f(m) + 28}{N}}.$$

Поскольку  $L_{MAX} = 96$  дБ, а  $L_f(m) = 0$ , то:

$$R = 10^{\frac{124 - 20 \lg(F_{i,n})}{N}};$$

$$G = -20 \lg(F_{i,n}) + 28.$$

Так, для частоты 5,2 ГГц,  $R = 40,048$  м. Это предельное расстояние, на котором ТД может создавать помеху для работы других ячеек сети. Однако, размер самой ячейки, т. е. радиус целевой области покрытия, качество сигнала в которой отвечает заданным требованиям,

на практике [1, 2, 4] представляет собой несколько меньшую величину и составляет порядка 9–12 м. Это нетрудно объяснить с точки зрения затухания целевого сигнала: так  $R$  для уровня приёма равного –60 дБм составляет 7,8 м [16], что говорит даже о некоторой небольшой избыточности выбранной модели затухания сигнала для практики. Тем не менее, подобный взгляд представляется неплохим приближением в рамках поставленной задачи.

Таким образом, для выбранных условий, согласно (15)  $M(L) = 89,268$  дБ.

### Имитационная модель затухания

Проверим полученный результат путём имитационного моделирования распределения источников сигнала. Для этого смоделируем случайное распределение источников помех по целевой площади радиуса  $R = 40$  м. После этого рассчитаем затухания помех для полученных отрезков и построим гистограмму для полученного распределения. На рис. 5 приведены результаты для расчёта по имитационной и аналитической (15) моделям.

При этом среднее значение затухания по имитационной модели составляет 89,263 дБ, т. е. ошибка составляет порядка 0,012%, что



Рис. 5. Сравнение плотностей вероятности распределения затухания для имитационной и аналитической моделей

находится в пределах погрешности имитационной модели.

**Модель деградации отношения сигнал/шум**

Поскольку, ключевым параметром, определяющим выбор режима модуляции и кодирования (MCS) является соотношение сигнал/шум (ОСШ), а также ввиду того, что основным результатом межканальной интерференции является его ухудшение (деградация) [2], рассмотрим в этом свете сигнал, создающий помеху. Как было показано ранее в (5), спектральная маска этого сигнала в дБм определяется как:

$$SI_n(f) = P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L), \text{ дБ.}$$

Обозначим за  $n$  – номер канала, при их общем числе равном  $k$ , а за  $m_n$  – число ТД канала  $n$ , чей сигнал доступен для приёма. За  $F_{i,n}$  примем частоту канала с номером  $n$ . Обозначим за  $Q$  – вероятность занятости канального ресурса и будем считать её одинаковой для всех ТД, создающих помехи. Отметим, что  $Q$  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.

Выразим спектры мощности в мВт. Тогда формула (5) примет вид:

$$SI_n(f) = 10^{\frac{P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L)}{10}}. \quad (16)$$

И аналогично для формулы (3):

$$Sw_T(f) = 10^{\frac{P_T + S(f - F_T)}{10}}. \quad (17)$$

Ввиду аддитивности мощности помех в спектре, общая спектральная маска всех помех будет равна:

$$SIw(f) = NF + Qm_n \sum_{n=1}^k 10^{\frac{P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L)}{10}}, \quad (18)$$

где  $NF$  – шумовой порог, мВт.

Определим соотношение сигнал/шум для целевого канала как отношение площадей спектральных масок

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} SIw(f) df}. \quad (19)$$

При этом, соотношение сигнал/шум в отсутствие межканальной интерференции составляет:

$$SNR_0 = 10 \log_{10} \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{NF \cdot 2A_T}, \quad (20)$$

откуда деградация ОСШ, вызванная межканальной интерференцией, составляет:

$$\Delta SNR = SNR_0 - SNR. \quad (21)$$

Полученная величина  $\Delta SNR$  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.

**Выводы и дальнейшая работа**

В результате проведённой работы:

1. Получена аналитическая модель, позволяющая оценить среднее затухание сигналов, создающих помехи на целевой площади радиопокрытия при равномерном распределении источников.
2. Аналитическая модель затухания сигнала с учётом всех допущений проверена имитационной моделью, что подтвердило её с точностью до 0,012%.
3. Предложен подход, позволяющий оценивать эффекты межканальной интерференции с учётом полной формы спектральной маски как целевого сигнала, так и помехообразующих сигналов смежных сетей.
4. Предложена методика оценки ухудшения соотношения сигнал/шум в условиях реального беспроводного сетевого окружения для современных сетей IEEE 802.11.

В дальнейшем предполагается провести исследование модели (21) для различных условий



работы с целью получения количественных характеристик и дальнейшего уточнения данного подхода.

### Литература

1. Aerohive Networks. High Density Wi-Fi Design Principles. / Aerohive Networks White Paper. 2012. 23 p.
2. 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. 41 p.
3. Meru Networks. Best Practices Guide for High-Density Design and Deployment. / Meru Networks. 2012. 103 p.
4. Ruckus Wireless. Deploying very High Density Wi-Fi. Design and Configuration Guide for Stadiums. / Ruckus Wireless Best Practices. 2012. 51 p.
5. Викулов А.С., Парамонов А.И. Исследование клиентского состава в сети беспроводного доступа // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сб. материалов в 4 томах. Санкт-Петербург. 2017. Т. 2. С. 136–139.
6. Викулов А.С., Парамонов А.И. Анализ трафика в сети беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11 // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. №3. С. 21–27.
7. Paramonov A., Vikulov A., Scherbakov S. Practical Results of WLAN Traffic Analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10531. Pp. 721–733.
8. Викулов А.С., Парамонов А.И. Исследование нагрузки в сети стандарта IEEE 802.11 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 4. С. 1–7.
9. 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.
10. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 312 с.
11. Викулов А.С., Парамонов А.И. Введение в сети Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 1. С. 12–20.
12. Викулов А.С., Парамонов А.И. Частотно-территориальное планирование сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 2. С. 35–48.
13. 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. Взамен IEEE Std. 802.11-2012. Введ. 2016. Нью Йорк: Институт IEEE. 3534 с.
14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-4-2011: Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Часть 4. Общие термины в области радиосвязи. М.: Стандартинформ. 2012. 32 с.
15. Рекомендации МСЭ-R SM.337-5. Частотный и территориальный разнос. 2008. 12 с.
16. Рекомендация МСЭ-R P.1238-8 (ITU-R P.1238-8), 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. 2016. 25 с.
17. Paramonov A., Hussain O., Samouylov K., Koucheryavy A., Kirichek R., Koucheryavy Y. Clustering Optimization For Out-Of-Band D2D Communications // Wireless Communications and Mobile Computing, 2017. Vol. 2017. DOI: 10.1155/2017/6747052.

Поступила 16 января 2019 г.

English

## INTERCHANNEL INTERFERENCE MODEL IN IEEE 802.11 NETWORKS FOR THE TASK OF TRAFFIC CAPACITY ESTIMATION

**Anton Sergeevich Vikulov** – Post-graduate student, Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

*E-mail:* asv012016@gmail.com.

*Address:* 193232, St. Petersburg, Bolshhevikov Ave., 22/1.

*Abstract:* Wi-Fi networks now increasingly represent high-density networks in two senses. On the one hand, they are a high-density user deployment, and on the other hand, they are a large number of networks them-

selves deployed in the confined area. Therefore, one of the most pressing problems in the simulation, engineering and diagnosis of Wi-Fi networks for various purposes is the interchannel interference from foreign networks of the same technology, due to its negative impact on the network target cell. The reason for this is the inability of the receiver to identify the interference as an 802.11 network signal, which results in the degradation of the signal to noise ratio for the network target cell. One of models for noise-generating signals' attenuation is examined in this paper and a calculation method is proposed for the average attenuation of extraneous signals depending on the distribution type of the noise source in the coverage area. Further, the author proposes the interchannel interference model that enables to obtain the total noise spectrum and to assess the amount of its impact on the target channel. The main result of the research work is the model of signal-to-noise ratio degradation because of interchannel interference, assuming that the frequency and area planning of the target network is performed perfectly, i.e. there is no channel interference. The proposed quantitative estimates enable to solve the estimation problem of objectively accessible signal-to-noise ratio for the target network, which is relevant to the current design practice. As a result, it becomes possible to make a more accurate calculation of the estimated performance of the designed network at the predictive modeling stage.

*Keywords:* Wireless access network, IEEE 802.11 ac, frame aggregation, A-MSDU, channel efficiency utilization, modulation and coding scheme, frame transmission time.

### References

1. Aerohive Networks. High Density Wi-Fi Design Principles. Aerohive Networks White Paper. 2012. 23 p.
2. Florwick J., Whitaker J., Amrod A.C., Woodhams J. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems Design Guide. 2017. 41 p.
3. Meru Networks. Best Practices Guide for High-Density Design and Deployment. Meru Networks. 2012. 103 p.
4. Ruckus Wireless. Deploying very High Density Wi-Fi. Design and Configuration Guide for Stadiums. Ruckus Wireless Best Practices. 2012. 51p.
5. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Investigation of the customer's composition in wireless access network. Vital problems of information telecommunication in science and education. The VI International scientific-technological and scientific-methodological conference. Conference Information package in 4 volumes. Saint-Petersburg. 2017. Vol. 2. Pp. 136–139.
6. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Traffic analysis in IEEE 802.11 wireless access network. Trudy uchebnykh zavedenij svyazi. 2017. Vol. 3. No. 3. Pp. 21–27.
7. *Paramonov A., Vikulov A., Scherbakov S.* Practical Results of WLAN Traffic Analysis. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10531. Pp. 721–733.
8. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Traffic amount research in IEEE 802.11 network. Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2017. Vol. 5. No. 4. Pp. 1–7.
9. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Analysis of the noise main types in the task of planning Wi-Fi networks with users' high density. Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2018. Vol. 6. No. 1. Pp. 21–31.
10. *Kucheryavy A.E., Prokopiev A.V., Kucheryavy E.A.* Self-organizing network. Saint-Petersburg: Lubavich, 2011. 312 p.
11. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Introduction to Wi-Fi network with users' high density. Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2018. Vol. 6. No. 1. Pp. 12–20.
12. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Frequency and area planning of Wi-Fi networks with users' high density. Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii. 2018. Vol. 6. No. 2. Pp. 35–48.
13. 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. Instead IEEE Std. 802.11-2012. Entrod. 2016. New York: IEEE Institute. 3534 p.
14. GOST R ISO/IEC 19762-4-2011: Information technologies. Technologies of automatic identification for data collection (AIDC). Harmonized dictionary. Part 4. General terms in the field of radio communication. Moscow: Standartinform. 2012. 32 p.
15. ITU-R. SM.337-5. Frequency and area separation 2008. 12 p.
16. 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. 2016. 25 p.
17. *Paramonov A., Hussain O., Samouylov K., Koucheryavy A., Kirichek R., Koucheryavy Y.* Clustering Optimization For Out-Of-Band D2D Communications. Wireless Communications and Mobile Computing. 2017. Vol. 2017. DOI: 10.1155/2017/6747052.