

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 004.725.5

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ МЕЖКАНАЛЬНЫХ ПОМЕХ В СЕТЯХ IEEE 802.11 ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ АНТЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ЗАДАЧЕ РАДИОПОКРЫТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

**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.ru.

**Пармонов Александр Иванович**

доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.  
E-mail: alex-in-spb@yandex.ru.

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

**Аннотация:** При моделировании, проектировании и диагностике сетей Wi-Fi важным является учёт эффектов межканальных помех, возникающих ввиду неидеального частотно-территориального планирования. Данные эффекты в большинстве случаев имеют место, даже если отсутствуют помехи со стороны других сетей IEEE 802.11 и помехи посторонней природы. В данной работе предложен расчёт скоростей передачи для ячейки сети для типовых сценариев использования в случае радиопокрытия в зоне производства или на складе. Такие объекты имеют характерные только для них особенности организации радиопокрытия и требуют отдельного рассмотрения. Основным результатом работы являются оценки, показывающие возможность обоснования выбранной архитектуры с учётом межканальных помех от собственных точек доступа.

**Ключевые слова:** беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11, межканальная помеха, отношение сигнал/шум, помехи, затухание сигнала, антенная конфигурация, проектирование.

### Введение

Как правило, при проектировании беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС) необходимо, с одной стороны, выполнить требования обеспечения должного качества предоставляемых услуг, а с другой — обеспечить разумную стоимость предлагаемого технического решения. Это общий подход, касающийся не только беспроводных, но и проводных ЛВС.

Качество предоставления услуг в ЛВС чаще всего определяется несколькими параметрами, среди которых основными являются: пропускная способность, средняя задержка, доля потерянных кадров, джиттер. Это в равной мере справедливо в частности и для БЛВС стандар-

та IEEE 802.11. Однако при проектировании БЛВС целевые значения этих параметров редко удаётся оценить с достаточной для практики точностью, в результате инженер чаще всего оперирует параметрами физического или канального уровня. К ним относятся:

- уровень приёма сигнала;
- отношение сигнал/шум (ОСШ);
- число доступных клиенту точек доступа (ТД);
- число точек доступа, работающих на одном канале;
- число точек доступа, работающих на пересекающихся каналах;
- предполагаемые (прогнозируемые) параметры трафика;

- данные о возможностях клиентских устройств.

Отметим, что основным результатом такой оценки является расчётная скорость передачи данных в расчёте на ячейку БЛВС, чаще всего выдаваемая в виде модельных карт радиопокрытия. Этот параметр часто дополняется модельными картами распределения уровня приёма сигнала и ОСШ.

На этом этапе возникает несколько трудностей. Первая состоит в том, что далее инженеру очень трудно без внесения значительных допущений, сопряжённых с условностями, оценить пропускную способность в расчёте на клиентское устройство. Определённые, приемлемые для практики рекомендации по данному вопросу встречаются в литературе [1], но о точном расчёте здесь уже говорить не приходится. Поэтому скорость передачи в расчёте на ячейку является основным количественным результатом предиктивной модели радиопокрытия. Вторая трудность заключается в необходимости учёта различных видов помех [2]. Так, например, межканальные помехи от формально (по основной части спектральной маски сигнала) непересекающихся каналов всё существующее на рынке ПО для предиктивного радиомоделирования не считает вносящими негативного влияния на значение ОСШ. На практике же, помехи от других точек доступа нельзя исключать из рассмотрения без существенного влияния на результат проектирования. Что касается других видов радиопомех [3], то их часто удается локализовать на этапе предварительного натурного радиообследования, проводимого на объекте, и учесть при моделировании. Наконец третьей трудностью является необходимость обоснования применения внешних (по отношению к точке доступа) направленных антенн. Причиной тому является более высокая относительно встроенных в точки доступа всенаправленных антенн стоимость такого решения.

В данной работе мы постараемся предложить количественное обоснование для таких типовых задач и показать на конкретных зна-

чениях параметров различия, которые несут в себе подобные подходы.

### Постановка задачи

Зададимся целью сравнить характеристики радиопокрытия для двух основных сценариев работы (с направленными и всенаправленными антеннами) распределённой БЛВС в задаче, где такое сравнение было бы актуальным.

Такой задачей может являться организация БЛВС на логистических терминалах, различного рода производствах, складах, крупных торговых комплексах (гипермаркетах) и других подобных зданиях.

Особенностями таких комплексов обычно являются:

1. Большие геометрические размеры терминала с площадью в десятки тыс. кв. м.
2. Существенная высота монтажа точек доступа, в ряде случаев достигающая 15 метров и даже более.
3. Наличие зоны прямой видимости между местами размещения точек доступа.
4. Невысокая плотность клиентских устройств на единицу площади.
5. Зачастую существенные требования к пропускной способности со стороны клиентских устройств. Так, ТСД на складе часто обладают функционалом голосовой связи.
6. Относительно невысокое использование временного ресурса радиоканала.
7. Сравнительно длительный эксплуатационный срок клиентских устройств, что на практике часто приводит к тому, что по состоянию на 2020 год на современном складе могут широко использоваться ТСД с поддержкой лишь IEEE 802.11g/n.
8. Непостоянная наполненность складских стеллажей, что нередко приводит к трудностям при радиообследовании.
9. Практически полное отсутствие посторонних сетей IEEE 802.11. Это связано с тем, что складской терминал обычно принадлежит одному и тому же собственнику, а потому относительно несложным является обеспечить единственность инфраструктуры БЛВС на объ-



Рис. 1. Разрез стеллажей на логистическом терминале

екте. Кроме того, подобные объекты чаще всего размещаются вдали от других зданий, например, на окраине города, что одновременно с большими их размерами практически обеспечивает отсутствие проникновения сигналов БЛВС извне.

Рассмотрим для примера случай логистического терминала. В этом случае сеть Wi-Fi разворачивается, в основном, для обеспечения связи ручных или стационарных (например, размещаемых на автопогрузчиках) терминалов сбора данных (ТСД) с системой складского учёта.

Для дальнейшей работы особенно важно отметить факт наличия прямой видимости между ТД, поскольку это в данном случае имеет решающее значение. На рис. 1 для примера приведен разрез логистического терминала с высотой полочных ферм порядка 12 м. На нём хорошо видно, что при монтаже точек на данных фермах между ними будет иметь место прямая видимость, что в данном случае является ключевой особенностью и должно быть соответственно учтено при планировании.

Рассмотрим два случая организации радиопокрытия [4]:

Первый сценарий — с применением направленных антенн, ориентированных основным лепестком их диаграммы направленности (ДН) вертикально вниз.

Второй сценарий — с применением дипольных антенн.

При этом, в случае использования направленной антенны, её коэффициент усиления  $Gt$  по оси основного лепестка ДН составляет 7 дБи. Коэффициент усиления  $Gt$  в плоскости, перпендикулярной данной оси равен  $-10$  дБи, т.е. в горизонтальной плоскости

имеет место ослабление сигнала.

В случае использования дипольной антенны, её коэффициент усиления  $Gt$  вдоль оси диполя составляет  $-18$  дБи т.е. по направлению вертикально вниз имеет место ослабление сигнала. С этой особенностью антенн данного типа связана типичная рекомендация о предельной высоте монтажа для дипольных антенн, составляющей обычно порядка 10–12 м [5, 6]. Коэффициент усиления  $Gt$  в плоскости, перпендикулярной данной оси, составляет 3 дБи. Диаграммы направленности используемых антенн для частот диапазона 2,4 ГГц приведены на рис. 2 и рис. 3. При этом для направленной антенны азимутальная ДН показана сплошной линией, а угломестная ДН — пунктирной линией.

Сделаем следующие допущения:

1. 100% клиентских устройств работают в режимах НТ, т.е. IEEE 802.11n [7].
2. Межканальные помехи от посторонних БЛВС отсутствуют на всей площади радиопокрытия.
3. Помехи посторонней природы отсутствуют на всей площади радиопокрытия.
4. Целевой уровень приёма сигнала со-

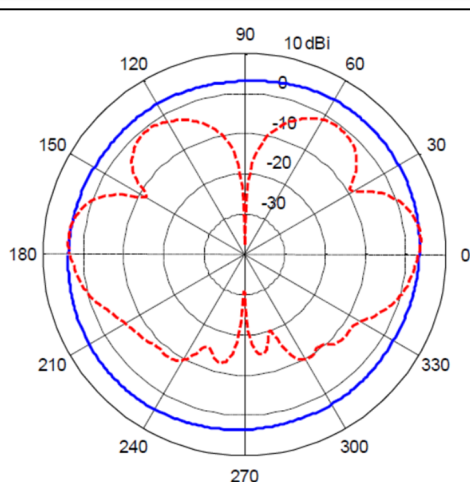


Рис. 2. Диаграмма направленности дипольной антенны

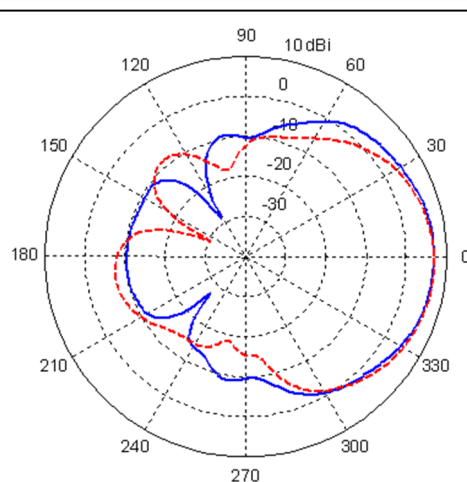


Рис. 3. Диаграмма направленности направленной антенны

ставляет  $-60$  дБм, а уровень радиочастотного шума примем за  $-90$  дБм. Т.е. расчётное отношение сигнал/шум (ОСШ) в отсутствие любых помех  $SNR_0$  составляет 30 дБ.

5. Используются частоты UNII (5 ГГц) и ISM (2,4 ГГц).

6. Тип используемого канала — HT20.

7. 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 канал занят.

8. Высота подвеса точек доступа составляет 12 м. Такой выбор связан с тем, что, как ранее говорилось, на практике подобная высота является предельной для точек доступа со всенаправленными в азимутальной плоскости ДН антеннами.

9. Шаг расстановки точек доступа (радиус ячейки радиопокрытия) в обоих сценариях одинаков и равен  $R$ .

10. Модель является «плоской», т.е. радиопокрытие обеспечивается на одном «этаже» и, кроме учёта высоты подвеса целевых точек доступа, других эффектов, связанных с третьей координатой в модели, нет.

11. Допустим, что затухание сигнала в соединительных элементах антенных трактов равно нулю, т.е. кабельные соединения не вно-

сят затухание сигнала в обоих сценариях.

12. Будем считать, что на приёмнике не превышен пороговый уровень приёма, определяемый в стандарте ( $-30$  дБм для диапазона 5 ГГц и  $-20$  дБм для диапазона 2,4 ГГц).

13. Будем считать, что эффекты внутриканальных помех минимальны и не влияют на рассматриваемый сценарий. Отметим, что ввиду отсутствия внутриканальных помех, в рассматриваемых условиях на канальном уровне не будут задействованы механизмы CCA (Clear Channel Assessment), включение которых определено в стандарте [8] для различных доступных ширин канала через задание пороговых уровней приёма.

14. Примем как допущение, что приёмник обладает идеальной избирательностью, а его амплитудно-частотная характеристика имеет прямоугольную форму и соответствует участку спектра  $F_T$  на заданном промежутке.

15. Будем считать, что ДН антенн клиентских устройств полностью изотропны.

На рис. 4 показана спектральная маска, т.е. максимально допустимая спектральная плотность энергии сигнала передачи, выраженная как функция частоты [9] OFDM-модулированных каналов типа ERP, HT и VHT соответственно стандартов IEEE802.11g/n/ac [8]. В таблице 1 приведены её параметры. Обратим внимание, маска будет также отлична

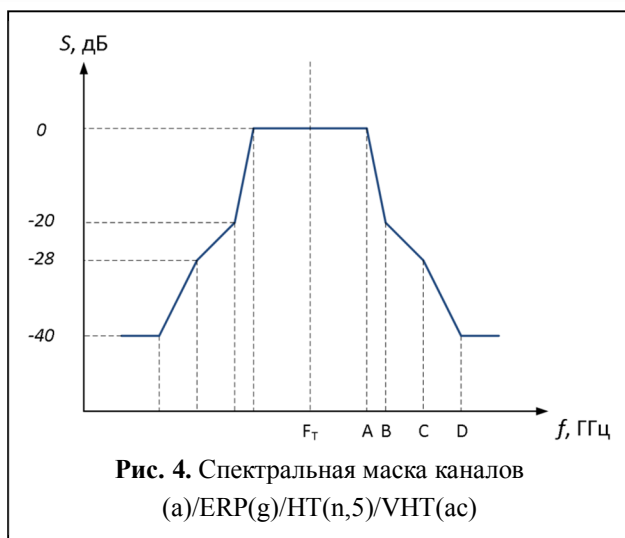


Рис. 4. Спектральная маска каналов (а)/ERP(g)/HT(n,5)/VHT(ac)

для каналов HT в диапазоне 2,4 ГГц, поскольку их спектральная маска при той же форме имеет несколько отличные от приведённой уровни для ключевых точек диаграммы, а также для каналов режима VHT80+80 по той же причине.

Отметим, что ввиду отсутствия внутриканальных помех, в рассматриваемых условиях на канальном уровне не будут задействованы механизмы CCA (Clear Channel Assessment), включение которых определено в стандарте [8] для различных доступных ширин канала через задание пороговых уровней приема.

Будем оценивать эффекты при измерении параметров сигнала на стороне точки доступа, т.е. принятый сигнал со стороны клиентского устройства, расположенного в её формируемой ячейке БЛВС, будет испытывать помехи в основном от рядом расположенных точек доступа.

#### Модель межканальных помех

Модель межканальных помех ранее была предложена в работе [10]. Суть её состоит в учёте эффектов перекрытия спектральных масок целевого канала (на котором идет работа) с

центральной частотой  $F_T$  и канала, создающего помеху, с центральной частотой  $F_{i,n}$ . Здесь  $n$  — число, идентифицирующее канал-помеху.

Определим  $S_T(f)$ , как распределение уровня мощности полезного сигнала на спектре, а  $SI_n(f)$  — как распределение уровня мощности сигнала-помехи. Спектральная маска канала приведена на рис. 4. Спектр сигнала  $S(f)$  для канала соответствующего типа (см. таблицу 1) определим как:

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

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

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

$$S_T(f) = P_T + S(f - F_T), \quad (\text{дБм}), \quad (3)$$

где  $P_n$  (дБм) — измеренный уровень сигнала для  $n$ -го сигнала-помехи;  $P_T$  (дБм) — измеренный уровень целевого сигнала. При этом:

$$P_n = P_{rad} + G_t - L, \quad (\text{дБм}), \quad (4)$$

где  $P_{rad}$  (дБм) — уровень мощности излучения источника сигнала на выходе радиомодуля, создающего помеху;

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



$G_t$  — коэффициент усиления передающей антенны в направлении точки доступа;  $L$  (дБ) — среднее затухание помехообразующего сигнала. Т.е.

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

Влияние эффектов межканальных помех 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. 5, где:

- $A_T$  (МГц) — частота для точки  $A$  для целевого канала (см. таблицу 1, рис. 4);
- $D_{i,n}$  (МГц) — частота для точки  $D$  для канала, создающего помеху (см. таблицу 1, рис. 4);
- $F_T$  (МГц) — центральная частота целевого канала, на котором идет передача;
- $F_{i,n}$  (МГц) — центральная частота канала, создающего помеху.

Рис. 5 иллюстрирует случай для  $F_{i,n} > F_T$ .

В работе [10] рассматривалась модель затухания сигнала, рекомендованная [11] для применения внутри помещений (ITU-R 1238). Однако в нашем случае речь идет о распространении сигнала без препятствий. По этой причине размер ячейки, а, следовательно, и шаг расстановки точек доступа  $R$ , не может быть рассчитан исходя из предельного уровня приёма сигнала клиентским устройством.

Определим радиус ячейки  $R$  следующим образом. Полный угол раскрыва  $\alpha$  основного лепестка ДН направленной антенны равен 60 градусов. Тогда при высоте подвеса ТД  $h = 12$  м радиус ячейки составит:

$$R = h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \text{ (м)}. \quad (6)$$

В выбранных условиях  $R \approx 7$  м (см. рис. 6).

Затухание сигнала  $L$  на расстоянии  $d$  в отсутствие препятствий можно определить

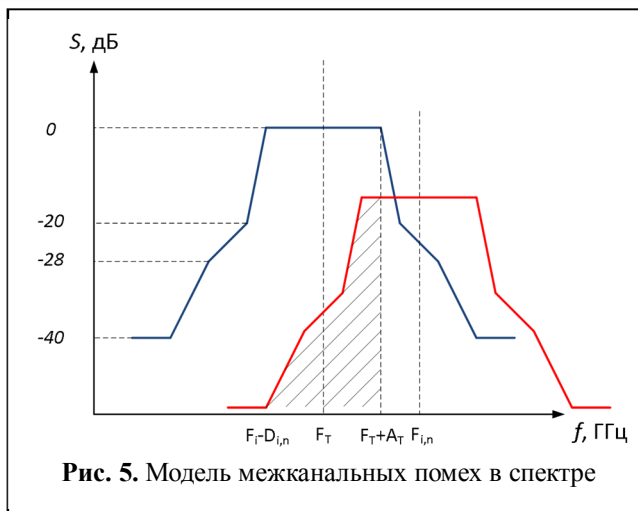


Рис. 5. Модель межканальных помех в спектре

согласно рекомендации [12]:

$$L = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d, \text{ (дБ)}, \quad (7)$$

где  $d$  — расстояние (км);  $f$  — частота (МГц).

Отметим, что для диапазона 5 ГГц нетрудно организовать такое частотно-территориальное планирование [13], что точки доступа, работающие на смежных в спектре каналах НТ20 (например, с номерами 52 и 56), будут находиться на расстоянии друг от друга не ближе чем через ячейку, как показано на рис. 7. Таким образом, минимальное расстояние между точками, работающими на одном канале, будет равно  $6R$ , а между точками, работающими на смежных каналах, —  $4R$ .

Для частотного диапазона 2,4 ГГц картина будет сходная, однако ввиду меньшего числа доступных каналов, равного трём, расстояния между ячейками, работающими на смежных каналах будут меньше. В таблице 2 приведены

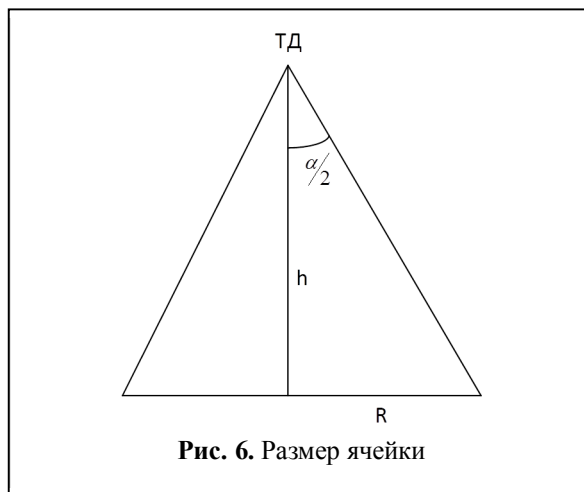


Рис. 6. Размер ячейки

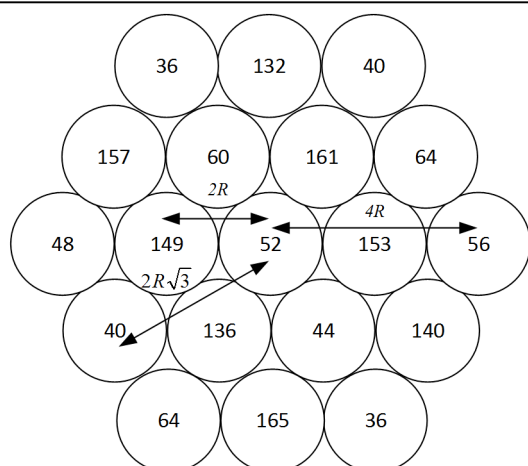


Рис. 7. Частотно-территориальное планирование в диапазоне 5 ГГц

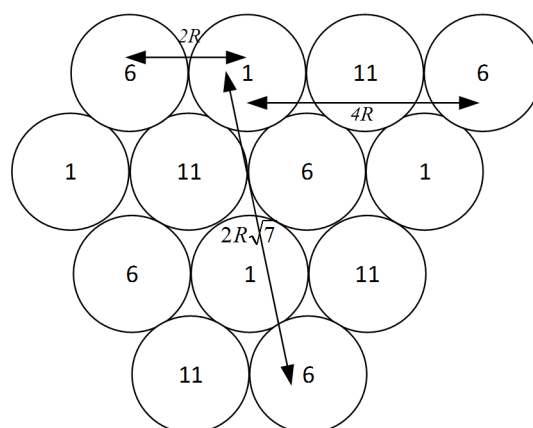


Рис. 8. Частотно-территориальное планирование в диапазоне 2,4 ГГц

значения затухания сигнала для различных расстояний между ТД, выраженных в радиусах ячеек (см. рис. 7 и рис. 8), для двух частотных диапазонов.

В таблице приведены расстояния для ячеек, вносящих максимальный вклад в суммарную межканальную помеху.

### Влияние помех на ОСШ

Теперь рассмотрим влияние данных эффектов на отношение сигнал/шум (ОСШ).

Обозначим за  $n$  номер канала, при их общем числе равном  $k$ , а за  $m_n$  — число ТД канала  $n$ ,

Таблица 2. Основные источники межканальных помех для частот 2,4 ГГц.

Частоты диапазона 5 ГГц (расчёт для 5240 МГц)			
Число ТД-помех	Расстояние до ТД-помехи, R	Частотное разнесение для центрального канала, МГц	Затухание, дБ
2	$2R$	40	75,7
2	$4R$	20	81,7
4	$2R$	>40	75,7
4	$4R$	>40	81,7
6	$2R\sqrt{3}$	>40	80,5
Частоты диапазона 2,4 ГГц (расчёт для 2437 МГц)			
6	$2R$	25	69,1
6	$4R$	25	75,1
12	$2R\sqrt{7}$	25	77,5

чей сигнал доступен для приёма. За  $F_{i,n}$  обозначим частоту канала с номером  $n$ .

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

$$SIw_n(f) = 10^{\frac{P_{rad} + G_t + S(f - F_{i,n}) - L}{10}} \text{ (мВт)}. \quad (8)$$

И аналогично для формулы (3):

$$Sw_T(f) = 10^{\frac{P_T + S(f - F_T)}{10}} \text{ (мВт)}. \quad (9)$$

Общая спектральная маска всех помех будет равна:

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

где  $NF$  — шумовой порог, мВт;  $Q$  — вероятность занятости частотного канала. Примем  $Q = 0,3$ .

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

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} SIw(f) df} \text{ (дБ)}. \quad (11)$$

При этом, соотношение сигнал/шум в отсутствие межканальных помех составляет:

$$SNR_0 = 10 \text{Log}_{10} \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} S w_T(f) df}{NF \cdot 2 A_T} \text{ (дБ)}. \quad (12)$$

И равно  $-90$  дБм для заданного случая.

Тогда ухудшение ОСШ, вызванное межканальными помехами, составляет:

$$\Delta SNR = SNR_0 - SNR, \text{ (дБ)}. \quad (13)$$

Полученная величина  $\Delta SNR$  представляет собой модельное значение, на которое уменьшится ОСШ для целевого сигнала, т.е. позволит оценивать уменьшение скорости передачи в канале в связи с необходимостью для ТД работать в режимах, соответствующих меньшим индексам MCS.

### Влияние ухудшения ОСШ на скорость передачи

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

Введём скорость передачи согласно MCS  $PHYRate$  (Мбит/с):

$$PHYRate = \frac{N_{DBPS}}{T_{SYM}}, \quad (14)$$

где  $T_{SYM}$  — длительность передачи символа с учётом межсимвольного защитного интервала (мкс).

При этом зависимость числа бит полезной нагрузки на OFDM-символ, согласно [14], удобно принять как:

$$N_{DBPS}(SNR) = \begin{cases} 0 & SNR < 2 \\ 26 & 2 \leq SNR < 5 \\ 52 & 5 \leq SNR < 9 \\ N_{DBPS\_MAX} \cdot \left(1 - e^{-\frac{SNR^2}{2a^2}}\right) & SNR > 9, \end{cases} \quad (15)$$

где  $N_{DBPS\_MAX}$  — наибольшее число бит данных на OFDM-символ;  $a$  — полуширина гауссоиды, аппроксимирующей целевую дискретную функцию [14]. В рассматриваемых условиях для  $802.11n$   $N_{DBPS\_MAX} = 260$ . Тогда для области  $SNR > 9$  дБ:

$$PHYRate = \frac{N_{DBPS\_MAX} \left(1 - \exp\left(-\frac{SNR^2}{2a^2}\right)\right)}{T_{SYM}}. \quad (16)$$

Поскольку функция (16) является монотонно возрастающей [14], то значение  $\Delta PHYRate$ , соответствующее величине  $\Delta SNR$ , будет определяться как:

$$\Delta PHYRate = PHYRate_0 - PHYRate \quad (17)$$

и после преобразований:

$$\Delta PHYRate = \frac{N_{DBPS\_MAX}}{T_{SYM}} \times \left( \exp\left(-\frac{(SNR_0 - \Delta SNR)^2}{2a^2}\right) - \exp\left(-\frac{SNR_0^2}{2a^2}\right) \right), \quad (18)$$

где  $PHYRate_0$  — это скорость передачи при ОСШ, равном  $SNR_0$ . В нашем случае  $PHYRate_0 = 72,2$  Мбит/с [15].

### Расчёты

Теперь мы можем рассчитать  $\Delta PHYRate$  для двух рассматриваемых случаев. При этом, основное различие между сценариями 1 и 2 будет заключаться в разнице между значениями  $Gt$  и связанными с ними различиями в излучаемой радиомодулями мощностью (см. таблицу 3, в которой приведены и результаты расчётов для обоих сценариев в двух частотных диапазонах.

Отметим, что мощность излучения для сценария 2 близка к практическому пределу. Такое решение мы вынуждены применять ввиду большой удаленности клиентских устройств от точки доступа, размещенной на существенной высоте.

Из результатов расчётов видно, что при расположении всенаправленных в горизонтальной плоскости дипольных антенн на существенной высоте в прямой видимости друг друга межка-



Таблица 3. Основные параметры сценариев и результаты расчётов

	$Prad$ , дБм	Коэффициент усиления антенны		Центральная частота целевого канала $Ft$ , МГц	$\Delta SNR$ , дБ	$\Delta PHYRate$ , Мбит/с
		$Gt$ вдоль оси ДН оси, дБи	$Gt$ нормально оси ДН, дБи			
Сценарий 1	7	7	-10	5240 (48 канал)	0,04	0,03
Сценарий 2	20	-18	3	5240 (48 канал)	6,3	7,3
Сценарий 1	7	7	-10	2437 (6 канал)	0,6	0,5
Сценарий 2	23	-18	3	2437 (6 канал)	21,0	51,1

нальные помехи в обоих частотных диапазонах несут в себе существенное снижение скоростей передачи, что особенно хорошо видно на частотах диапазона 2,4 ГГц, где снижение скорости передачи составляет 51,1 Мбит/с при максимальной скорости в канале равной 72,2 Мбит/с, т.е. почти в 3,5 раза.

Расчётные спектры приведены на рис. 9–12. Сплошной линией показан целевой канал, а пунктиром — суммарный спектр помехи.

Из графиков отметим, что для сценария 2 для целевой точки доступа характерна спектральная картина с уровнем приёма сигнала от соседних точек доступа большим, чем уровень приёма сигнала от собственных клиентских устройств. Отметим, что негативное влияние будет несколько снижаться в случае меньшего значения  $Q$ , однако различие между обозначенными сценариями носит принципиальный характер.

Отметим, что единственным на практике способом снизить данный эффект в случае ис-

пользования дипольных антенн является горизонтальная ориентация диполей с целью несколько снизить мощность излучения в сторону других ТД. Однако свести негативный эффект к минимуму таким образом невозможно.

### Выводы

В результате проведённой работы:

1. Продемонстрирована применимость ранее предложенной [10] модели для решения задач частотно-территориального планирования.
2. Получена сравнительная оценка достижимой скорости передачи в канале IEEE 802.11 для случая выбора антенных конфигураций в практически актуальной задаче построения БЛВС на логистическом терминале.
3. Количественно подтверждены существующие в литературе рекомендации по предельной высоте монтажа дипольных антенн.
4. Показано, что применение точек доступа с дипольными антеннами в прямой видимо-

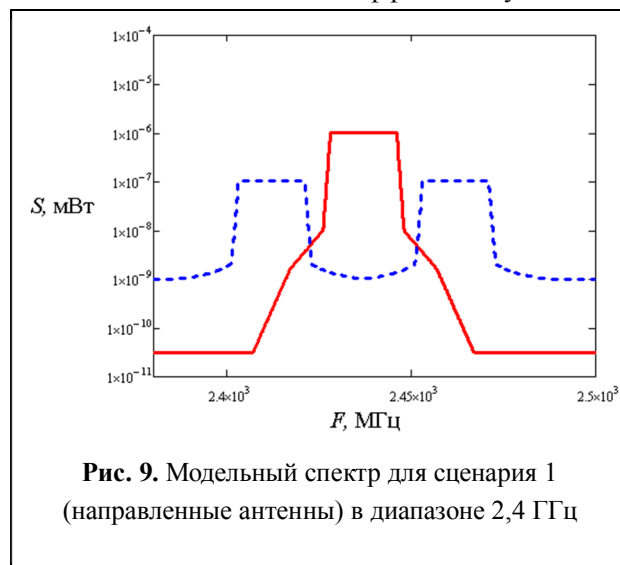


Рис. 9. Модельный спектр для сценария 1 (направленные антенны) в диапазоне 2,4 ГГц

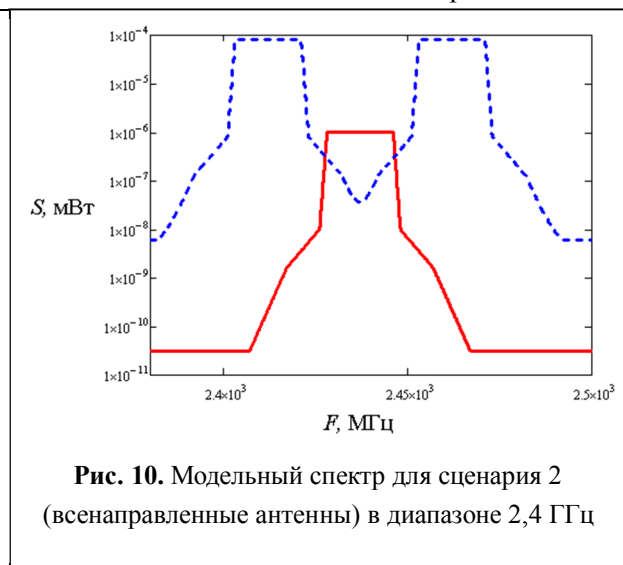


Рис. 10. Модельный спектр для сценария 2 (всенаправленные антенны) в диапазоне 2,4 ГГц

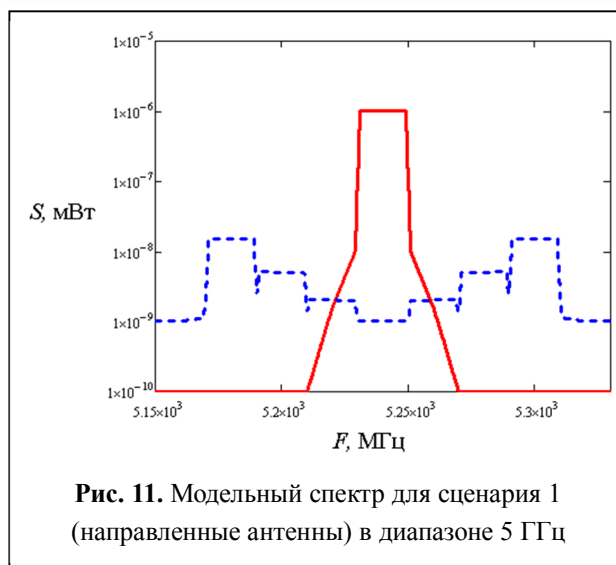


Рис. 11. Модельный спектр для сценария 1 (направленные антенны) в диапазоне 5 ГГц

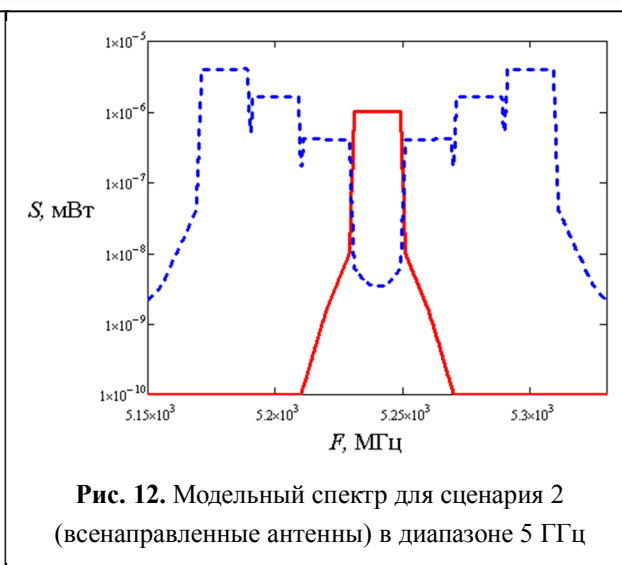


Рис. 12. Модельный спектр для сценария 2 (всенаправленные антенны) в диапазоне 5 ГГц

сти друг друга ведёт к существенному росту негативного влияния межканальных помех, вызывающего снижение средней скорости передачи в 3 раза и более.

#### Литература

1. *Lukaszewski C.* Aruba VHD 802.11ac Networks Validated Reference Design. Theory Guide, Vol. 1. Aruba Networks. 2015. 62 p.
2. *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.
3. *Vikulov A., Paramonov A.* Practical Analysis of IEEE 802.11N Coexistence with UMTS Network In 2.4 GHz ISM Band For Indoor Applications // 2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2019. Pp. 897–925.
4. *Викулов А.С., Парамонов А.И.* Анализ подходов к организации радиопокрытия в сетях Wi-Fi с высокой плотностью пользователей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 3. С. 38–51.
5. *Aerohive Networks.* High Density Wi-Fi Design Principles. / Aerohive Networks White Paper. 2012. 23 p.
6. *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.
7. *Викулов А.С., Парамонов А.И.* Исследование клиентского состава в сети беспроводного доступа // Сборник научных статей VI Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. «Актуальные проблемы

инфотелекоммуникаций в науке и образовании» Под редакцией С.В. Бачевского. Санкт–Петербург, 2017. Том 2. С. 136–139.

8. 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.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-4-2011: Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Часть 4. Общие термины в области радиосвязи. Введен приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 мая 2011 г. N 109-ст. Москва: Стандартинформ. 2012. 32 с.
10. *Викулов А.С.* Модель межканальной интерференции в сетях IEEE 802.11 в задаче оценки пропускной способности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 1. С. 36–45.
11. 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. Принята ассамблеей радиосвязи МСЭ в июле 2015 г. 2016. 25 с.
12. Рекомендация МСЭ-R P.525-2 Расчет ослабления в свободном пространстве. (1978-1982-1994). 1994. 3 с.
13. *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.

14. Викулов А.С., Парамонов А.И. Модель канала OFDM в задаче оценки эффективности сети IEEE 802.11 // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Том 16. № 3. С. 290–297.

15. Викулов А.С., Парамонов А.И. Исследование модели межканальной интерференции в сетях IEEE 802.11 для оценки пропускной способности // Труды учебных заведений связи. 2019. № 2. С. 43–48.

Поступила 18 августа 2020 г.

English

## EVALUATION OF INTERCHANNEL INTERFERENCE EFFECTS IN IEEE 802.11 NETWORKS FOR VARIOUS ANTENNA CONFIGURATIONS FOR THE TASK OF RADIO COVERAGE OF INDUSTRIAL FACILITIES

**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.ru.

**Alexander Ivanovich Paramonov** — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

*E-mail:* alex-in-spb@yandex.ru.

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

*Abstract:* It is important to consider interchannel interference effects that occur due to imperfect frequency and area planning in modeling, designing, and diagnosing Wi-Fi networks. These effects occur in most cases, even if there is no interference from other IEEE 802.11 networks or interference of an extraneous nature. Let's set out to compare the characteristics of radio coverage for two main scenarios of operation (with directional and omni-directional antennas) in distributed wireless local area network for the task where such a comparison would be relevant. This task can be the organization of wireless network radio coverage at logistics terminals, various manufacturing plants, warehouses, large shopping centers (hypermarkets), and other buildings alike. Such facilities have their own peculiar features of radio coverage organization and need separate consideration. It is highly significant to note the necessity of optical visibility between the locations of access points for these facilities, since this is decisive in this case. The common difficulty here is the need to justify using external, in regard to access point, directional antennas. It is due to the higher cost of such a solution compared to omni-directional antennas built into access points. The research work offers a quantitative reasoning for such common tasks and shows the differences that such approaches involve with specific values of parameters. In particular, the calculation of transmission rates for a network cell for common use scenarios in case of radio coverage in a manufacturing area or in a warehouse is proposed. The main result of the research work are estimates demonstrating the possibility of justifying the chosen architecture taking into account interchannel interference from its own access points.

*Keywords:* wireless access network, IEEE 802.11, interchannel interference, signal-to-noise ratio, interference, signal attenuation, antenna configuration, design.

### References

1. *Lukaszewski C.* Aruba VHD 802.11ac Networks Validated Reference Design. Theory Guide, Vol. 1. Aruba Networks. 2015. 62 p.
2. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Analysis of the main types of interference in the problem of planning Wi-Fi networks with high user density. Information technologies and telecommunications. 2018. Vol. 6. No. 1. Pp. 21–31.
3. *Vikulov A., Paramonov A.* Practical Analysis of IEEE 802.11N Coherence With UMTS Network In 2.4 GHz ISM Band For Indoor Applications. 2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2019. Pp. 897–925.
4. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Analysis of approaches to the organization of radio coverage in Wi-Fi networks with high user density. Information technologies and telecommunications. 2018. Vol. 6. No. 3. Pp. 38–51.
5. *Aerohive Networks.* High Density Wi-Fi Design Principles. Aerohive Networks White Paper. 2012. 23 p.
6. *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.

7. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Research of the client structure in the wireless access network. Collection of Scientific Articles of the VI International scientific-technical and scientific-methodical conference. In 4 volumes. "Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education» Edited by S.V. Bachevsky. Saint Petersburg, 2017. Vol. 2. Pp. 136–139.

8. 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 of IEEE Std. 802.11-2012. Entered. 2016. New York: IEEE Institute. 3534 p.

9. GOST R ISO/IEC 19762-4-2011: Information technologies. Automatic identification and data collection (AISD) technologies. The harmonized dictionary. Part 4. General terms in the field of radio communication. Introduced by order of the Federal Agency for technical regulation and Metrology of May 30, 2011 N 109-art. Moscow: Standardinform. 2012. 32 p

10. *Vikulov A.S.* Model of interchannel interference in IEEE 802.11 networks in the problem of pass-through capability estimation. Radio and telecommunication systems. 2019. No. 1. Pp. 36–45.

11. Recommendation ITU-R P. 1238-8 (ITU-R P. 1238-8), radio wave propagation data and forecasting methods for planning indoor radio systems and local area radio networks in the frequency range 300 MHz – 100 GHz. Series R. Propagation of radio waves. Adopted by the ITU Radiocommunication Assembly in July 2015. 2016. 25 p.

12. Recommendation ITU-R P. 525-2 Calculation of attenuation in free space. (1978-1982-1994). 1994. 3 p.

13. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Frequency-territorial planning of Wi-Fi networks with high user density. Information technologies and telecommunications. 2018. Vol. 6. No. 2. Pp. 35–48.

14. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* OFDM channel Model in the problem of evaluating the efficiency of the IEEE 802.11 network. Information and communication technology. 2018. Vol. 16. No. 3. Pp. 290–297.

15. *Vikulov A.S., Paramonov A.I.* Investigation of the interchannel interference model in IEEE 802.11 networks for bandwidth estimation. Proceedings of educational institutions of communication. 2019. No. 2. Pp. 43–48.