

Научная статья

УДК 004.725.5

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-29-36



Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замоощения» плоской зоны покрытия регулярными структурами. Часть 1. Модель межканальных помех

Антон Сергеевич Викулов, Asv012016@gmail.com

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

Аннотация: Планирование сетей беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11 невозможно без выбора частотного плана, т. е. набора частотных каналов заданного типа. Это особенно важно ввиду того факта, что частотная конфигурация распределенной сети существенно зависит от решений проектировщика и администратора инфраструктуры. Кроме того, предусмотренные стандартом центральные частоты каналов не гарантируют полного отсутствия их негативного взаимного влияния друг на друга. Рассматривая радиопокрытие двумерной целевой зоны радиопокрытия сети как «замоощение», т. е. наиболее плотное заполнение плоскости зонами покрытия отдельных точек доступа, для конкретной структуры «замоощения» необходимо выбрать наилучшее решение по частотному планированию из числа возможных. Для этого следует рассмотреть практически применимые случаи использования различного числа каналов в свете задачи «замоощения» плоскости, принимая во внимание пересечение спектральных масок в соответствующей полосе частот. В данной работе частотно-территориальное планирование в сетях IEEE 802.11 рассмотрено с позиции «замоощения» плоскости регулярными структурами и предложена модель, которая бы учитывала эффекты межканальных помех, давала бы критерий оценки и была бы применима для выбора лучшей частотной конфигурации для соответствующей регулярной структуры.

Ключевые слова: беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11, межканальные помехи, элементарная единица, «замоощение» плоскости, регулярная структура, частотное планирование, частотная конфигурация, проектирование

Ссылка для цитирования: Викулов А.С. Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замоощения» плоской зоны покрытия регулярными структурами. Часть 1. Модель межканальных помех // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 29–36. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-29-36

Effective Channel Planning of IEEE 802.11 Networks as a Plane Tessellation Problem. Part 1. Adjacent Channel Interference Model

Anton Vikulov, Asv012016@gmail.com

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

Abstract: IEEE 802.11 wireless networks design process is impossible without a correct choice of a channel plan, i.e. a set of channels of a given type. This is especially important because channel planning of a distributed network heavily depends on the network designer's and administrator's decisions. Additionally, the central frequencies of the channels provided by the standard do not mean that the channels are non-overlapping. However, considering the coverage of a flat area as a plane tessellation by coverage areas of access points, for a particular regular structure geometry, it is necessary to choose the best channel planning solution among the possible ones. To do this, it is required to consider practically applicable channel planning cases, which use different numbers of channels, as a plane tessellation problem, also taking into account the overlapping of their spectral masks. This paper considers channel planning of IEEE 802.11 networks as a plane tessellation with regular structures and proposes a model that takes into account the effects of adjacent-channel interference, provides evaluation criteria, and thus is applicable to select the best channel configuration for the corresponding regular structure.

Keywords: wireless access network, IEEE 802.11, adjacent channel interference, cell unit, plane tessellation, regular structure, channel planning, design

For citation: Vikulov A. Effective Channel Planning of IEEE 802.11 Networks as a Plane Tessellation Problem. Part 1. Adjacent Channel Interference Model. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(2):29–36. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-29-36

Введение

Планирование современных беспроводных локальных вычислительных сетей (БЛВС) ячеистой архитектуры трудно представить без решения задачи частотно-территориального планирования. Это в равной мере справедливо для различных БЛВС – как стационарных, так и реализуемых, например, с применением беспилотных летательных аппаратов [1, 2]. В особенности это касается сетей на базе стандарта IEEE 802.11 [3], в которых выбор частотной сетки во многом зависит от администратора инфраструктуры. С целью минимизировать риски неоптимального частотного конфигурирования, а также чтобы обосновать выполнение требований проектного задания, поставленного перед проектировщиком, необходимо корректно осуществить выбор частотно-территориального плана.

Вопросы частотного планирования, актуальные для сотовых сетей стандарта LTE, ранее поднимались в работах [4–6]. В них, в том числе, рассматривался и кластерный принцип частотного планирования. Кроме того, в работе [7] были представлены и иные сетевые технологии, в том числе Bluetooth, Wi-Fi и WiMAX. В данной работе внимание будет акцентировано на решении подобной задачи в приложении к сетям IEEE 802.11 (Wi-Fi).

Под частотным планированием в широком смысле понимается выбор номеров (центральных частот) и типов (ширины) частотных каналов с целью обеспечения радиопокрытия с заданными в задаче характеристиками [8]. Однако на практике в двухмерном случае этого оказывается недостаточно, поскольку конкретная структура «замоещения» (наиболее плотного заполнения) плоскости зонами покрытия точек доступа (ТД) может иметь свои геометрические особенности, и потому при одной и той же частотной сетке назначение конкретных каналов отдельным элементам структуры

«замоещения» (т. е. точкам доступа) может привести к различным результатам с точки зрения взаимного влияния ТД друг на друга.

В рамках такой задачи удобно прибегнуть к методам кристаллографии. Так, будем рассматривать элементарную ячейку (мотивную единицу) [9], задающую структуру «замоещения» плоскости известным числом каналов заданного типа. Поэтому под частотным планом в данной задаче понимается выбор центральных частот (номеров) каналов заданного типа, на которых работают ТД, размещенные в элементах мотивной единицы в заданной регулярной структуре «замоещения». А частотная конфигурация – это отдельные возможные решения задачи выбора частотных каналов для каждой из ТД в мотивной единице «замоещения» плоскости.

Настоящая работа посвящена выработке модели, позволяющей оценить межканальное влияние в различных структурах «замоещения» плоскости с тем, чтобы в дальнейшем было возможно предложить метод выбора наилучших вариантов частотной конфигурации.

Постановка задачи

Сделаем следующие допущения:

- 1) будем рассматривать плоский случай;
- 2) зона радиопокрытия каждой ТД на плоскости, независимо от используемого канала, представляет собой круг радиуса R , т. е. излучение антенн всех ТД в азимутальной плоскости изотропно, а коэффициенты усиления всех антенн равны между собой;
- 3) расстояние между ближайшими ТД равно $2R$;
- 4) прочие смежные, т. е. доступные для приема, БЛВС на целевой территории отсутствуют;
- 5) размер частотного кластера (число доступных для планирования однотипных частотных каналов) равен M ;

6) будем для удобства считать, что смежные зоны покрытия ТД только касаются друг друга;

7) площадь пространства, которую необходимо покрыть сигналом, много больше площади зоны покрытия отдельной ТД;

8) все ТД и клиентские устройства работают в канале HE (802.11ax) одного типа;

9) вероятность занятости (нагрузка) каналов одинакова и не превышает 50 %, т. е. механизмы adjacent channel rejection [10] не задействованы.

В работе [11] были построены «замощения» плоскости и соответствующие им мотивные единицы структуры «замощения». «Замощение» при этом характеризуется следующими основными параметрами: тип решетки; базис решетки; координационное число плоского «слоя» N [12]; мотивная единица для «слоя».

В работе [12] было ранее показано, что допустимые плоские решения задачи, отвечающие максимальному заполнению плоскости, могут быть двух типов:

– тетрагональные решения в плоской проекции объемно-центрированной кубической решетки (два «слоя») с координационным числом в плоскости N , равным 4;

– гексагональные решения (три «слоя») с координационным числом в плоскости N , равным 6.

Зададимся целью предложить модель, позволяющую выбрать наилучшую частотную конфигурацию, т. е. лучший вариант однозначного соответствия центральной частоты канала каждому из элементов мотивной единицы «замощения». Примем критерий, определяющий выбор между теми или иными частотными планами, отношение сигнал/шум, которое будем рассчитывать для каждой ТД с учетом межканальных помех.

Геометрическая модель «замощения»

При рассмотрении «замощения» плоскости удобно воспользоваться аппаратом трансляционной симметрии [13]. Зададим следующий базис. Пусть \mathbf{a} и \mathbf{b} – два вектора, исходящих из точки O , а α – угол между ними. Тогда можно задать плоскую решетку на бесконечной плоскости, в которой векторы задают переходы между возможными узлами. Решетка приведена на рисунке 1. Указанный базис \mathbf{a}, \mathbf{b} также задает косоугольную систему координат, которой удобно пользоваться в дальнейшем для описания взаимосвязей в построенной структуре.

При трансляционной симметрии узел O может быть симметрично отображен вдоль любой алгебраической суммы векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} и совмещен с самим собой. Проассоциируем с узлом O некоторую группу ТД, представляющих мотивную единицу. Мотивная (элементарная) единица структуры – это группа элементов (в данном случае – зон радиопокрытия ТД), связанная с каждым из узлов решетки [9].

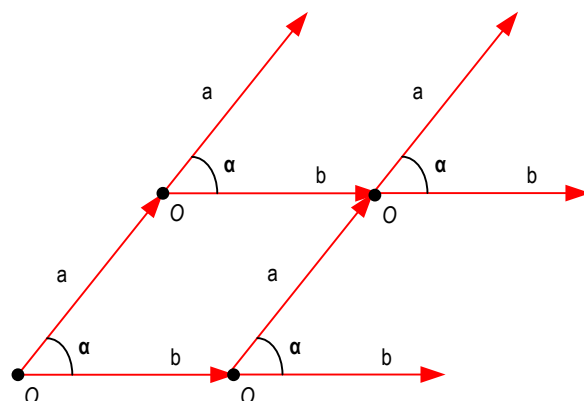


Рис. 1. Трансляционная симметрия в плоской решетке

Fig. 1. Translation Symmetry in Flat Lattice

Теперь путем трансляции (отображения) мотивной единицы вдоль введенных векторов получим «замощение» (в общем случае бесконечной) плоскости группой ТД. В дальнейшем будем рассматривать построения [11] различных конфигураций, соответствующих различным возможным на практике частотным планам [12].

Любой элемент, как следует из сути трансляционной симметрии, будет эквивалентен самому себе, полученному путем трансляционного переноса. В таком случае вся совокупность возможных трансляций может быть описана вектором $i\vec{a} + j\vec{b}$, где i и j – целые числа.

Пусть вектор \vec{r}_n задает переход между вершиной $O(0;0)$ целевой мотивной единицы и местоположением n -й вершины с координатами $(x_n; y_n)$ той же мотивной единицы структуры, влияние которой на целевую вершину (ТД) необходимо учесть:

$$\vec{r}_n = x_n \vec{a} + y_n \vec{b}. \quad (1)$$

Очевидно, что если рассматривается вершина, расположенная непосредственно в вершине $O(0;0)$, то соответствующий ей вектор \vec{r}_n равен нулю. Тогда всю совокупность расстояний до всех таких помехообразующих ячеек можно представить, как совокупность возможных длин вектора:

$$\vec{d}_{ij}(n) = \vec{r}_n + i\vec{a} + j\vec{b}. \quad (2)$$

Тогда в рамках заданного базиса \mathbf{a}, \mathbf{b} косоугольной системы координат формула (2) может быть представлена как:

$$\vec{d}_{ij}(n) = \vec{r}_n + i\vec{a} + j\vec{b} = \begin{cases} \vec{r}_1 + i\vec{a} + j\vec{b} \\ \vec{r}_2 + i\vec{a} + j\vec{b} \\ \vec{r}_3 + i\vec{a} + j\vec{b} \\ \dots \\ \vec{r}_n + i\vec{a} + j\vec{b} \end{cases} = \begin{cases} (x_1 + i)\vec{a} + (y_1 + j)\vec{b} \\ (x_2 + i)\vec{a} + (y_2 + j)\vec{b} \\ (x_3 + i)\vec{a} + (y_3 + j)\vec{b} \\ \dots \\ (x_n + i)\vec{a} + (y_n + j)\vec{b} \end{cases}. \quad (3)$$

Перейдем к ортонормированной системе координат. Пусть начало координат совпадает с одной

из точек O . Пусть дан ортонормированный базис (\vec{e}_x, \vec{e}_y)

Тогда косоугольный базис \mathbf{a}, \mathbf{b} может быть выражен через ортонормированный базис E следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \vec{a} = c_{ax}\vec{e}_x + c_{ay}\vec{e}_y \\ \vec{b} = c_{bx}\vec{e}_x + c_{by}\vec{e}_y \end{cases} \quad (4)$$

где $c_{ax}, c_{ay}, c_{bx}, c_{by}$ – координаты векторов \mathbf{a}, \mathbf{b} в ортонормированном базисе, образующие матрицу перехода C :

$$C = \begin{vmatrix} c_{ax} & c_{bx} \\ c_{ay} & c_{by} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

В таком случае (2) можно иначе записать как:

$$\vec{d}_{ij}(n) = \vec{r}_n + i(c_{ax}\vec{e}_x + c_{ay}\vec{e}_y) + j(c_{bx}\vec{e}_x + c_{by}\vec{e}_y). \quad (6)$$

А в матричной форме:

$$d_{ij}(n) = r_n + i(CE) + j(CE). \quad (7)$$

Таким образом формула (7) дает всю совокупность расстояний до всех помехообразующих ячеек, включая соканальные помехи, т. е. помехи от ТД с тем же номером канала.

Для большего удобства геометрических операций в рассматриваемой модели введем понятие размера сетки D . На рисунке 2 приведена иллюстрация «замощения» плоскости для случая числа частот M в мотивной единице «замощения» равного трем, при координационном числе N в плоскости равно шести [11]. Показана структура из 25 мотивных единиц в плоской решетке, образуемых при размере сетки D , равном 2. При этом исходная мотивная единица находится в узле решетки с координатами $(0;0)$, а остальные 24 являются результатами трансляций по обеим осям решетки в диапазоне $D = [-2; 2]$.

Варьируя величину D , т. е. увеличивая или уменьшая число рассматриваемых ячеек, возможно делать расчет разной точности.

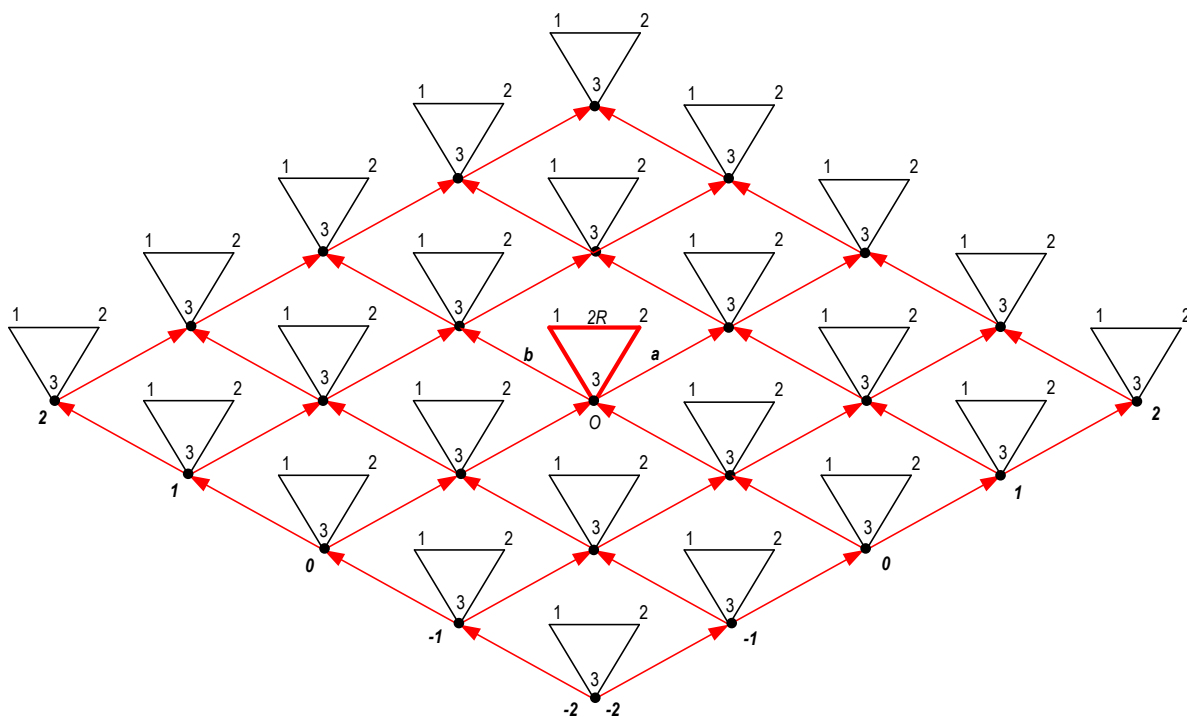


Рис. 2. Трансляционная симметрия для $M = 3, N = 6$ с размером сетки $D = 2$

Fig. 2. Translation Symmetry for $M = 3, N = 6$, and $D = 2$

Частотные конфигурации

В обсуждаемой задаче «замощения» плоскости рассмотрим построение конфигурации для заданного частотного плана как процесс присвоения каждой ТД мотивной единицы – соответствующей центральной частоты канала, задавая таким образом каналы для всех ТД в бесконечной в плоскости структуре «замощения» [12]. Итак, имея частотный кластер размера M , получим $M!$ возможных частотных конфигураций, т. е. возможные конфигурации

определяются общим числом возможных перестановок из M .

Поставим каждому элементу в соответствие некоторую центральную частоту канала F_n наперед заданного типа и зададим матрицу-вектор F , содержащую центральные частоты каналов, заданные условиями задачи.

Длина матрицы-вектора F равна M :

$$F = (F_1 \ F_2 \ \dots \ F_M). \quad (8)$$

Матрица возможных решений H , содержащая все возможные перестановки вектора F , будет иметь $M!$ столбцов и M строк. При построении матрицы перестановок воспользуемся алгоритмом, предложенным в работе [14]:

$$H = \begin{pmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & F_{1,M!} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & \dots & F_{2,M!} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{M,1} & F_{M,2} & \dots & F_{M,M!} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

т. е. каждая возможная частотная конфигурация из их общего числа $M!$ для мотивной единицы будет однозначно задаваться столбцом матрицы H .

Теперь для k -й возможной частотной конфигурации посчитаем набор значений отношения сигнал/шум (ОСШ) для всех ТД из заданной мотивной единицы, получив набор из M значений ОСШ, соответствующих целевой ТД мотивной единицы и определяемых межканальными помехами от всей «замощаемой» плоскости. Таких наборов будет $M!$ штук.

Модель помех в спектре

Будем оценивать эффекты при измерении параметров сигнала на стороне ТД, т. е. принятый сигнал со стороны клиентского устройства, расположенного в формируемой ею зоне покрытия БЛВС, будет испытывать помехи в основном от расположенных рядом зон покрытия других ТД.

Спектральная модель межканальных помех для сетей IEEE 802.11 ранее была предложена в работе [15]. Суть ее состоит в вероятностном учете эффектов перекрытия спектральных масок целевого канала (на котором идет работа) с центральной частотой F_T и канала-помехи, с центральной частотой F_i , где n – номер ТД (в пределах мотивной единицы), создающей помеху. Отличие предлагаемой здесь модели состоит в возможности учета трансляционной симметрии «замощения» плоскости, принимая во внимание геометрию мотивной единицы, и, как следствие, геометрию всей структуры «замощения» плоскости.

Будем рассматривать 802.11ax (HE) режимы с различной шириной канала и 100-процентным использованием RU. Характеристики спектральной маски канала приведены в таблице 1.

Определим $S_T(f)$, как распределение уровня мощности полезного сигнала на участке спектра, а $S_i(f)$ – как спектральную маску канала-помехи.

Влияние эффектов межканальных помех будем оценивать путем расчета площади пересечения спектра мощности целевого сигнала $S_T(f)$ (дБм) и спектра мощности сигнала $S_i(f)$ (дБм), создающего помеху. При этом, для целевого сигнала будем учитывать только интегральную площадь в диапазоне частот $[F_T - A; F_T + A]$, ввиду ограниченности спек-

тра собственно квадратурно-амплитудно-модулированного сигнала. Пересечение площадей спектров приведено на рисунке 3, где:

- $F_T + A$ (МГц) – частота для точки A для целевого канала (см. таблицу 1);
- $F_T - D$ (МГц) – частота для точки D для канала, создающего помеху (см. таблицу 1);
- F_T (МГц) – центральная частота целевого канала, на котором идет передача;
- F_i (МГц) – центральная частота канала, создающего помеху.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики спектральной маски канала

TABLE 1. Transmit Spectrum Mask Characteristics

Параметры каналов различных типов, МГц				
Тип канала	Полуширина участка спектральной маски до точки, МГц.			
	A	B	C	D
HE160 (1992 RU)	79,5	80,5	160	240
HE80 (996 RU)	39,5	40,5	80	120
HE40 (484 RU)	19,5	20,5	40	80
HE20 (242 RU)	9,75	10,5	20	30

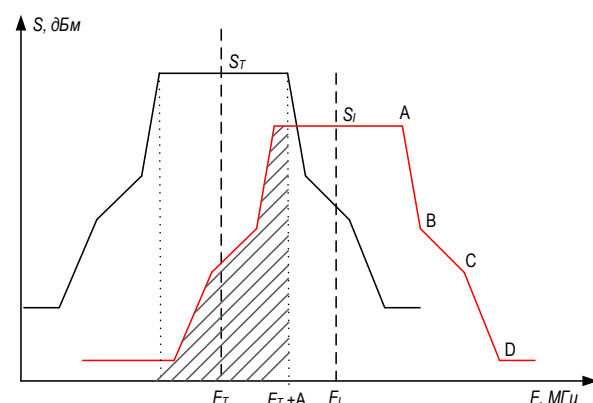


Рис. 3. Модель межканальных помех в спектре

Fig. 3. Adjacent Channel Interference Model in Spectrum

Рисунок 3 иллюстрирует случай для одной помехи при $F_i > F_T$.

Тогда уровень отдельного сигнала-помехи составит:

$$S_i(f) = P_{\text{rad}} + G_t + S(f - F_i) - L(d) \quad (\text{дБм}), \quad (10)$$

а перейдя к мВт:

$$S_{iw}(f) = 10^{\frac{P_{\text{rad}} + G_t + S(f - F_i) - L(d)}{10}} \quad (\text{мВт}), \quad (11)$$

где P_{rad} (дБм) – уровень мощности излучения источника сигнала на выходе радиомодуля, создающего помеху; G_t – коэффициент усиления передающей антенны ТД-помехи в направлении целевой ТД с учетом MRC и TxBF (примем равным 2 дБ); $L(F, d)$ (дБ) – затухание сигнала в зависимости от частоты сигнала F и расстояния о него, определяемого длиной вектора $\vec{d}_{ij}(n)$.

Маска целевого сигнала будет определяться как:

$$S_{Tw}(f) = 10^{\frac{P_T + S(f - F_T)}{10}} \text{ (мВт)}, \quad (12)$$

где P_T (дБм) – требуемый уровень приема сигнала на входе радиомодуля клиентского устройства;

Уровень целевого сигнала в зоне радиопокрытия будем считать отвечающим требованию для наиболее скоростного режима. Так, например, при шумовом пороге, равном –90 дБм, и требованию ОСШ, равном 32 дБ, для QAM-256 при скорости кодирования 5/6, требование уровня приема будет составлять –58 дБм. В зависимости от условий можно выбрать необходимую модель затухания сигнала.

В случае отсутствия препятствий при распространении сигнала на целевой площади, затухание сигнала L на расстоянии $d_{ij}(n)$ можно определить согласно рекомендации МСЭ-R P.525 [13]:

$$L_{525}(d) = 32,4 + 20\log F_{l,n} + 20\log|\vec{d}_{i,j}(n)| \text{ (дБ)}, \quad (13)$$

где $|\vec{d}_{i,j}(n)|$ – расстояние (км), см. (2), а $F_{l,n}$ – центральная частота канала-помехи (МГц).

В случае необходимости учета различных препятствий в зданиях, можно использовать рекомендацию МСЭ-R P.1238 [14]:

$$L_{1238}(d) = 20\log F_{l,n} + N_d \lg(|\vec{d}_{i,j}(n)|) + L_f - 28, \quad (14)$$

где N_d – дистанционный коэффициент потерь мощности ($N = 30$ для частот 2,4 ГГц диапазона и $N_d = 31$ для 5 ГГц [14]); L_f – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через межэтажное перекрытие (дБ) (в рассматриваемом плоском случае $L_f = 0$).

Модель затухания (14) дает усреднение затухания в этажных планировках и может быть использована при оценках затухания в зданиях различного назначения. Существуют и иные модели затухания, принимающие во внимание различные факторы окружающей среды. Так, в рекомендации [15] даются оценки затухания сигнала, принимая во внимания учет газового состава атмосферы. Рекомендация [16] предназначена для расчета распространения сигнала, требующего наличие прямой видимости между приемником и передатчиком. Среди специализированных рекомендаций можно отметить, например, документ [17], предоставляющий возможность расчета затухания сигнала при прохождении через зеленые насаждения, что может быть актуально при развертывании БЛВС в парковых зонах.

Отметим, что для задачи поиска наилучшей частотной конфигурации выбор модели затухания качественно не важен. Но количественно, модель затухания будет одним из факторов, влияющих на значения ОСШ выбранного решения. Таким образом, $S_{lw}(f, L(F_l, d_n))$ – функция, задающая спектр n -го сигнала-помехи (мВт) в зависимости от частоты и расстояния до n -го источника.

Тогда суммарный спектр всех межканальных помех от ячеек той же БЛВС может быть описан следующим образом:

$$W_{lw}(f) = NF + Q \sum_{i=-D}^D \sum_{j=-D}^D \sum_{k=1}^M U S_{lw}(H_{k,m}, d_{i,j}(n), f) \quad (15)$$

$$\text{при} \quad U = \begin{cases} 1, & k \neq n \\ 0, & k = n \end{cases}, \quad (16)$$

где U – функция-индикатор межканальных помех; NF – шумовой порог (мВт); Q – вероятность занятости (нагрузка) частотного канала; D – размер сетки, рассмотренный ранее.

Будем считать, что шумовой порог определяется шумом с равномерной спектральной плотностью в рассматриваемой полосе частот и независимым от частоты средним уровнем амплитуды. Теперь, имея выражение для суммарного спектра от всех межканальных помех, можно получить выражение для ОСШ в зоне покрытия целевой ТД. ОСШ примем за основной параметр, определяющий работоспособность каждой отдельной целевой ТД.

В условиях наличия фоновой (не связанной с другими ТД) шума и межканальных помех ОСШ (от англ. Signal-To-Noise Ratio, SNR) определяется согласно выражению:

$$\text{SNR}_{n,m} = 10\log_{10} \frac{\int_{F_T-A}^{F_T+A} S_{Tw}(f) df}{\int_{F_T-A}^{F_T+A} W_{lw}(f) df} \text{ (дБ)}. \quad (17)$$

Таким образом, получим матрицу SNR, содержащую m строк возможных решений, с n значениями ОСШ для каждой ТД в мотивной единице. Среди полученных подобным способом решений будем далее искать наилучшее, задавая соответствующие критерии оптимальности.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

По результатам проведенной работы можно сделать, следующие выводы.

Распределенная БЛВС может быть описана как «замощение» плоскости регулярной структурой зон покрытия ТД, характеризуемой мотивной единицей «замощения» и базисом, задающим трансляционную симметрию в решетке.

Для учета межканальных помех на целевую ТД необходимо принимать во внимание спектральную маску канала IEEE 802.11 и суммарную маску всех каналов, создающих помеху с учетом их частот и расстояния до них.

Предложенный подход опирается на геометрическую модель, используя заданные мотивные единицы «замощения» плоскости при условии, что определена модель затухания сигналов, создающих помехи.

Предложенная модель позволяет учитывать эффекты межканальных помех, принимая во внимания геометрию всей структуры «замощения» плоскости, имея основным критерием ОСШ на стороне целевой ТД.

В дальнейшей работе в развитии данной модели будет рассмотрен метод нахождения наилучшей частотной конфигурации для частотного кластера заданной геометрии и показаны возможные решения для различного его размера.

Список источников

1. Dinh T.D., Vishnevsky V., Pham V.D., Le D.T., Kirichek R., Koucheryavy A. Determination of Subscribers Coordinates using Flying Network for Emergencies // *Proceedings of the International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT, PyeongChang, South Korea, 07–10 February 2021)*. IEEE, 2021. PP. 1309–1318. DOI:10.23919/ICACT51234.2021.9370476
2. Kirichek R., Dinh T.D., Pham V.D., Zakharov M., Le D.T., Koucheryavy A. Positioning Methods Based on Flying Network for Emergencies // *Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT, Phoenix Park, South Korea, 16–19 February 2020)*. IEEE, 2020. PP. 245–250. DOI:10.23919/ICACT48636.2020.9061217
3. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11-2020. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems. Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE, 2021. 4379 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2021.9363693
4. Бабков В.Ю., Никитина А.В., Стариков В.В. Определение пространственно-технических параметров сотовой сети стандарта LTE // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 1(212). С. 7–15. DOI:10.5862/JCSTCS.212.1
5. Бабков В.Ю., Стариков В.В. Выбор кластерной структуры сети начального приближения стандарта LTE // *Информационные системы и технологии*. 2017. № 5(103). С. 72–80.
6. Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Бабкин А.С., Пыленок А.М., Трофимов А.П. Сети стандарта LTE. Развитие технологий радиодоступа. СПб.: СПбГУТ, 2015. 254 с.
7. Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
8. 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.
9. Греков Ф.Ф., Рябенко Г.Б., Смирнов Ю.П. Кристаллохимия. Структурная кристаллография. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 106 с.
10. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11ax-2021. 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 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. IEEE, 2021. 767 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2021.9442429
11. Викулов А.С., Парамонов А.И. Построение типовых структур для замощения плоскости в задаче частотно-территориального планирования сетей IEEE 802.11 // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2021. № 2(42). С. 17–28.
12. Викулов А.С., Парамонов А.И. Постановка задачи замощения плоскости в применении к частотно-территориальному планированию сетей IEEE 802.11 // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2021. № 1(41). С. 24–32.
13. Nesse D.W. Introduction to Mineralogy. New York: Oxford University Press, 2000. 442 p.
14. Фёдоров Л.И. Генератор перестановок транспозицией соседних элементов в Mathcad // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика*. 2014. № 4. С. 129–136.
15. 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.
16. Рекомендация МСЭ-R P.525-2 (1994) Расчет ослабления в свободном пространстве. (1978-1982-1994).
17. Рекомендация МСЭ-R P.1238-8 (2016) 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.
18. Рекомендация МСЭ-R P.676-6 (2005) Затухание в атмосферных газах.
19. Рекомендация МСЭ-R P.530-12 (2007) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости.
20. Рекомендация МСЭ-R P.833-9 (2016) Ослабление сигналов растительностью.

References

1. Dinh T.D., Vishnevsky V., Pham V.D., Le D.T., Kirichek R., Koucheryavy A. Determination of Subscribers Coordinates using Flying Network for Emergencies. *Proceedings of the International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT, 07–10 February 2021, PyeongChang, South Korea*. IEEE; 2021. p.1309–1318. DOI:10.23919/ICACT51234.2021.9370476
2. Kirichek R., Dinh T.D., Pham V.D., Zakharov M., Le D.T., Koucheryavy A. Positioning Methods Based on Flying Network for Emergencies. *Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT, 16–19 February 2020, Phoenix Park, South Korea*. IEEE; 2020. p.245–250. DOI:10.23919/ICACT48636.2020.9061217

3. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11-2020. *IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems. Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements. Part 11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/IEEESTD.2021.9363693
4. Babkov V.Yu., Nikitina A.V., Starikov V.V. Definition of the Spatial and Technical Parameters LTE Network. *Computing, Telecommunications and Control*. 2015;1(212):7–15. (in Russ.) DOI:10.5862/JCSTCS.212.1
5. Babkov V.Yu., Starikov V.V. Selection of Cluster Structure of Initial Approximation LTE Network. *Information Systems and Technologies*. 2017;5(103):72–80. (in Russ.)
6. Ryzhkov A.E., Sivers M.A., Babkin A.S., Pylenok A.M., Trofimov A.P. *LTE Networks. Development of Radio Access Technologies*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2015. 254 p. (in Russ.)
7. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V. *Broadband Wireless Networks for Information Transmission*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2005. 592 p. (in Russ.)
8. Vikulov A., Paramonov A. Frequency and Distance Planning of High Density Wi-Fi Networks. *Telecom IT*. 2018;6(2):35–48 (in Russ.)
9. Grekov F.F., Ryabenko G.B., Smirnov Yu.P. *Crystal Chemistry. Structural Crystallography*. St. Petersburg: Polytechnic University Publ.; 2006. 106 p. (in Russ.)
10. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.11ax-2021. *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 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/IEEESTD.2021.9442429
11. Vikulov A.S., Paramonov A.I. Arrangement of Standard Structures for Tiling the Plane for Frequency and Area Planning of IEEE 802.11 networks. *Radio and Telecommunication Systems*. 2021;2(41):17–28. (in Russ.)
12. Vikulov A.S., Paramonov A.I. Problem Statement of Tiling the Plane for Frequency and Area Planning of IEEE 802.11 Networks. *Radio and Telecommunication Systems*. 2021;1(41):24–32. (in Russ.)
13. Nesse D.W. *Introduction to Mineralogy*. New York: Oxford University Press; 2000. 442 p.
14. Fedorov L. Generator of Permutations by Transposition of Neighboring Elements in Mathcad. *Bulletin Of The Moscow State Regional University. Series: Physics-Mathematics*. 2014;4:129–136. (in Russ.)
15. Vikulov A.S. Interchannel Interference Model in IEEE 802.11 Networks for the Task of Traffic Capacity Estimation. *Radio and Telecommunication Systems*. 2019;1(33):36–45. (in Russ.)
16. Rec. ITU-R P.525-2 *Calculation of free-space attenuation*. 1994.
17. 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*. 2016.
18. Rec. ITU-R P.676-6 *Attenuation by atmospheric gases*. 2005.
19. Rec. ITU-R P.530-12 *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. 2007.
20. Rec. ITU-R P.833-9 *Attenuation in vegetation*. 2016.


Статья поступила в редакцию 23.05.2022; одобрена после рецензирования 08.06.2022; принята к публикации 15.06.2022.

The article was submitted 23.05.2022; approved after reviewing 08.06.2022; accepted for publication 15.06.2022.

Информация об авторе:

ВИКУЛОВ
Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-6671-9267>