

Научная статья

УДК 004.725.5

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-41-51



Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замощения» плоской зоны покрытия регулярными структурами. Часть 3. Решения задачи выбора частотной конфигурации для случая с 8 каналами

Антон Сергеевич Викулов, vikulov.as@sut.ru

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

Аннотация: При решении задачи частотно-территориального планирования сетей беспроводного доступа сети стандарта IEEE 802.11 необходимо выбрать частотные каналы для точек доступа таким образом, чтоб выбранная конфигурация соответствовала их минимальному негативному взаимному влиянию. В работе рассмотрено покрытие плоскости как ее «замощение», т. е. максимально плотное заполнение, группами зон покрытия точек доступа, которые в спектральном смысле соответствуют частотным кластерам. Задавая каждой из точек доступа частотный канал, можно получить множество возможных конфигураций, каждая из которых соответствует возможному решению задачи частотно-территориального планирования. При решении актуальных проектных задач в диапазоне 5 ГГц, наиболее часто необходимо принимать во внимание частотные планы с использованием 8 и более каналов. Основываясь на ранее предложенных модели и методе, в данной работе получены решения задачи поиска наилучшей конфигурации в частотных кластерах, состоящих из 8 точек доступа, а также показаны их характеристики в привязке к их геометрии.

Ключевые слова: беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11, помеха, мотивная единица, «замощение» плоскости, частотный кластер, частотное планирование, проектирование, частотная конфигурация

Ссылка для цитирования: Викулов А.С. Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замощения» плоской зоны покрытия регулярными структурами. Часть 3. Решения задачи выбора частотной конфигурации для случая с 8 каналами // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 41–51. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-41-51

Effective Channel Planning of IEEE 802.11 Networks as a Plane Tessellation Problem. Part 3. Solutions of Best Channel Configuration Selection Problem for Eight-Channel Case

Anton Vikulov, vikulov.as@sut.ru

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

Abstract: When solving the problem of channel planning of IEEE 802.11 wireless access networks, it is necessary to allocate channels for access points so that the selected channel configuration provides minimum negative mutual influence. We will consider the covering of the plane "tessellation", i.e. the densest filling, by coverage areas of access points groups, which in the spectral sense correspond to channel clusters. By assigning a channel to each of the access points, we obtain a set of possible configurations, each of which corresponds to a possible solution of the channel planning problem. When solving actual design problems in the 5 GHz band, it is often necessary to take into account channel plans that include 8 or more channels. Based on the previously proposed model and method, in this paper, solutions to the problem of finding the best channel configuration for clusters consisting of 8 access points are obtained, and their characteristics are shown in relation to their geometry.

Keywords: wireless access network, IEEE 802.11, interference, cluster, cell unit, plane tessellation, channel planning, channel configuration

For citation: Vikulov A. Effective Channel Planning of IEEE 802.11 Networks as a Plane Tessellation Problem. Part 3. Solutions of Best Channel Configuration Selection Problem for Eight-Channel Case. *Proc. of Telecom. Universities*. 2023;9(1):41–51. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-41-51

Введение

Без решения задачи частотно-территориального планирования сетей IEEE 802.11 [1], включая последнее дополнение [2], невозможен процесс проектирования сколько-нибудь сложной распределенной беспроводной инфраструктуры. Среди подходов к проектированию можно отметить как руководства («мануалы») компаний-производителей оборудования [3–7], так и монографии [8–10]. Среди них интерес представляет подход, при котором рассматривается «замоещение» [11] плоскости зонами покрытия точек доступа (ТД), формирующих регулярную структуру [12].

Такая регулярная структура может быть описана путем задания мотивной (элементарной) единицы «замоещения» и в общем случае косоугольного базиса, задающего трансляционную симметрию в плоской решетке. Мотивная единица в плоском случае – группа зон покрытия ТД, связанная с каждым из узлов решетки. Путем трансляционного переноса мотивной единицы может быть получена вся структура «замоещения» плоскости [12]. В спектральном смысле частотно-территориального планирования мотивная единица соответствует частотному кластеру [13], понятию, широко используемому в планировании сотовых сетей. Отметим, что, говоря о мотивной единице, мы акцентируем внимание на геометрии структуры «замоещения».

Располагая в мотивной единице ТД стандарта IEEE 802.11, работающие на различных каналах, мы можем изучить взаимное влияние между ТД таким образом, что получим возможность учитывать эффекты межканальных помех, и, следовательно, выбирать наилучшие частотные конфигурации. Под последней будем понимать отдельные возможные решения задачи выбора частотных каналов для каждой из ТД в мотивной единице.

Ранее были предложены модель [14] учета межканальных помех для такого подхода, а также метод [15] выбора наилучшей частотной конфигура-

ции для выбранной мотивной единицы «замоещения». Кроме того, в работе [15] были выполнены расчеты для задачи частотного планирования при размере частотного кластера, равного 3 и 4. Случаи для малого числа каналов характеризуются в целом отсутствием в явном виде лучших решений (кроме нескольких вырожденных сценариев), поскольку все возможные частотные конфигурации являются эквивалентными с точки зрения их характеристик. В случае же большего размера частотного кластера M , становится возможен выбор предпочтительных конфигураций (или групп конфигураций), а потому такая задача представляет практический интерес.

В работе [11] были рассмотрены наиболее актуальные для современных сетей IEEE 802.11 частотные планы и показано, что случай с числом каналов M , равным восьми, имеет особое значение. Это связано с тем, что при «замоещении» плоскости зонами покрытия ТД с координационным числом N , равным 4, возможно построить структуру из двух «слоев» [12]. При этом мотивная единица каждого из «слоев» будет содержать 8 ТД. Поскольку это хорошо соотносится с размещением в спектре доступных в РФ каналов частотного диапазона 5 ГГц (две группы по 8 каналов), случай с $M = 8$ представляет особый интерес.

Данная работа в развитие исследований [14] и [15] посвящена рассмотрению частотных планов, предполагающих использование 8 каналов IEEE 802.11ах, шириной 20 МГц (каналы типа HE20), что является особенно актуальным для планирования радиопокрытия в частотном диапазоне 5 ГГц.

Модель оценки межканальных помех и метод выбора наилучшей частотной конфигурации

Применим модель межканальных помех, подробно изложенную в работе [14] ранее. Имея в мотивной единице «замоещения» плоскости M точек доступа, работающих каждая на своем канале, получим $M!$ возможных частотных конфигураций, т. е.

их число определяется возможными перестановками из M . Поставим каждой ТД в соответствие некоторую центральную частоту канала наперед заданного типа и определим через матрицу-вектор F_n , где n – номер ТД в мотивной единице.

Матрица возможных частотных конфигураций H , будет содержать все возможные перестановки вектора F :

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

При построении матрицы воспользуемся алгоритмом генерации перестановок, предложенным в работе [16]. При необходимости будем также пользоваться порядковыми номерами перестановок, генерируемыми согласно данному алгоритму. Т.е. каждая возможная частотная конфигурация из их общего числа $M!$ для мотивной единицы будет однозначно задаваться столбцом матрицы H . Схема выбора решения [15] имеет вид: исходные данные → расчет матрицы возможных решений → вариационный ряд решений → поиск оптимального решения → экстраполяция решения.

Исходными данными для этой задачи являются следующие параметры: радиус R (м) ячейки покрытия, формируемой ТД беспроводной локальной вычислительной сети (БЛВС); модель затухания сигнала $L(f, d)$, определяющая затухание распространяемого сигнала L (дБ) как функцию от частоты сигнала f (МГц) и расстояния до источника d (м); тип решетки «замощения» и ее базис; мотивная единица структуры; координационное число структуры «замощения» N ; размер частотного кластера M , равный числу ТД в мотивной единице; матрица H возможных частотных конфигураций общим числом $M!$; вероятность занятости канала Q ; шумовой порог NF (аббр. от англ. Noise Floor), равный 10^{-9} мВт (–90 дБм); требуемый уровень мощности принимаемого сигнала в ячейке P_T ; уровень мощности излучения всех ТД P_{rad} .

На втором шаге при расчете матрицы SNR (аббр. от англ. Signal-to-Noise Ratio, отношения сигнал/шум), содержащей множество m возможных частотных конфигураций, будем следовать модели, предложенной в работе [14]. Расчет выполняется для всех возможных частотных конфигураций мотивной единицы заданной структуры и размера для нескольких различных размеров сетки D . Параметр D в модели определяет размер рассматриваемой области. С его ростом свойства рассматриваемой области последовательно приближаются к свойствам бесконечной плоскости.

При этом сами значения SNR рассчитываются согласно формуле:

$$SNR_{n,m} = 10 \log_{10} \frac{\int_{F_T-A}^{F_T+A} S_{Tw}(f) df}{\int_{F_T-A}^{F_T+A} W_{Iw}(f) df} \text{ (дБ)}, \quad (2)$$

где n – номер вершины; m – номер решения; A – полуширина центральной части спектральной максимума сигнала, МГц; F_T – центральная частота рассматриваемого канала, МГц.

Суммарный спектр всех межканальных помех W_{Iw} (мВт) от ячеек той же БЛВС рассчитывается согласно выражению [14]:

$$W_{Iw}(f) = NF + Q \sum_{i=-D}^D \sum_{j=-D}^D \sum_{k=1}^M U \times S_{Iw}(H_{k,m}, d_{ij}(n), f) \quad (3)$$

при

$$U = \begin{cases} 1, & k \neq n \\ 0, & k = n \end{cases}$$

где U – функция-индикатор межканальных помех; NF – шумовой порог (мВт); Q – вероятность занятости частотного канала; i, j – координаты в системе трансляционной симметрии; D – размер сетки; S_{Iw} – спектральная маска канала заданного типа; H – матрица возможных $m \in [0, M!]$ частотных конфигураций для заданной мотивной единицы, содержащей n ТД; $\vec{d}_{ij}(n)$ – расстояние до отдельной ТД, создающей помеху; f – частота.

Маска сигнала задается согласно:

$$S_{Tw}(f) = 10^{\frac{P_T + S(f-F_T)}{10}} \text{ (мВт)}, \quad (4)$$

где P_T – требуемый уровень приема сигнала на входе радиомодуля клиентского устройства (дБм); примем его равным –60 дБм.

Маска канала помехи задается в виде:

$$S_{Iw}(f) = 10^{\frac{P_{rad} + G_t + S(f-F_l) - L(H,d)}{10}} \text{ (мВт)}, \quad (5)$$

где $S(f - F_l)$ – спектральная маска сигнала-помехи (дБм); $S(f - F_T)$ – спектральная маска полезного сигнала (дБм); P_{rad} – уровень мощности излучения источника сигнала на выходе радиомодуля, создающего помеху (дБм), примем его равным 14 дБм; G_t – коэффициент усиления передающей антенны ТД-помехи в направлении целевой ТД; F_l – центральная частота канала-помехи (МГц); $L(F, d)$ – среднее затухание мощности сигнала в зависимости от частоты сигнала F и расстояния от его источника, определяемого длиной вектора $\vec{d}_{ij}(n)$.

После построения вариационных рядов, при выборе наилучшего решения будем руководствоваться следующими требованиями к такой частотной конфигурации мотивной единицы с позиции значения SNR для состоящих в ней ТД:

- среднее SNR для всех ТД – максимальное;
- условие для SNR – максимум;

- третье по величине SNR – максимальное (для случая равномерного размещения каналов на непрерывном участке спектра);
- минимальное SNR – не ниже допустимого.

Для найденного на пятом шаге решения выполним экстраполяцию на большие D с целью найти значения параметров лучшего замощения на бесконечной плоскости.

Экстраполяцию (в данном случае для среднего SNR в отдельном решении) выполним экспоненциальной функцией вида:

$$\max\langle SNR_{n,m} \rangle = z_1 \cdot e^{-(D-z_2)} + \langle SNR_{n,m} \rangle_{\infty} \text{ (дБ)}, \quad (6)$$

где z_1 и z_2 – некоторые определяемые подбором коэффициенты, $\langle SNR_{n,m} \rangle_{\infty}$ – горизонтальная асимптота функции (6) при больших D .

Рассматриваемыми параметрами возможных решений являются: среднее и минимальное SNR для всех ТД мотивной единицы. Кроме того, справочно приведем значение для третьей по величине SNR точки доступа в мотивной единице.

Постановка задачи

В работе [12] ранее были построены некоторые возможные регулярные структуры, возникающие при «замощении» плоскости. Поскольку в данной работе мы рассматриваем случай с 8-канальными частотными планами, то здесь нас будут интересовать три случая: одна структура с числом элементов на минимальном расстоянии от заданного (координационным числом) $N = 4$ и две структуры с $N = 6$. С позиции выбора частотного плана, в данном случае мы рассмотрим только один вариант с 8 каналами HE20, соответствующих поддиапазонам UNII-1 и UNII-2, т. е. каналы с номерами: 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64. Обратим внимание, что в данном частотном плане каналы расположены последовательно, а расстояния в спектре между центральными частотами смежных каналов идентичны.

Матрица-вектор F , содержащая центральные частоты каналов частотного плана:

$$F = (5180 \ 5200 \ 5220 \ 5240 \ 5260 \ 5280 \ 5320).$$

Матрицу H , содержащую все $M! = 40320$ возможных решений, приводить далее не будем ввиду ее большого размера.

С целью проверить, что лучшее решение не зависит от выбранной модели затухания, рассмотрим две модели затухания сигнала: в случае наличия препятствий [10] и в случае их отсутствия [11]. Отметим, что расстояние между двумя ближайшими ТД равно $2R$, где R – радиус зоны покрытия ТД. Примем R равным 10 м.

Кроме того, с целью сравнить значения выполним расчеты также для двух различных значений

вероятности занятости Q в БЛВС: 0,1 – для умеренно нагруженной БЛВС и 0,5 для случая высокой нагрузки трафиком.

SNR для всех случаев, рассмотренных ниже, равен 30 дБ (при требуемом уровне приема равном –60 дБм и шумовом пороге равном –90 дБм). Примем коэффициент усиления всех антенн равным 2 дБ. Отклонения в меньшую сторону от указанного значения и будут в нашем случае определяться частотной конфигурацией и геометрией решения.

Далее рассмотрим подробно результаты расчетов для трех структур «замощения».

Решения для случая $M = 8, N = 4$

Для случая «замощения» с координационным числом 4 «замощение» плоскости, базис и мотивная единица приведены на рисунке 1, где здесь и далее: красным показана мотивная единица и векторы трансляционной симметрии в косоугольной системе координат; зеленым – ортонормированная система координат.

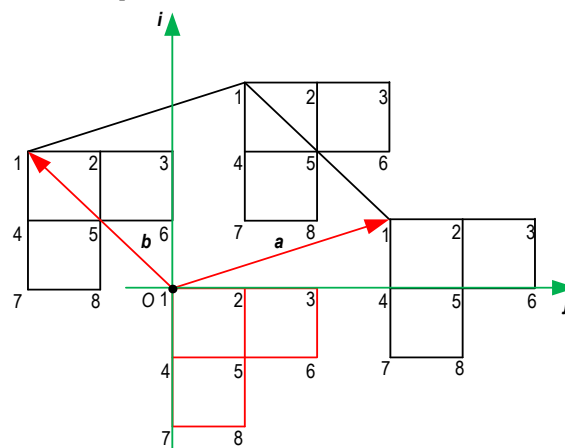


Рис. 1. Трансляционная симметрия и мотивная единица для случая $M = 8, N = 4$

Fig. 1. Translation Symmetry and Cell Unit for $M = 8, N = 4$

Матрица перехода между системами координат имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 6R & -4R \\ 2R & 4R \end{pmatrix}.$$

Матрицу, содержащую все множество трансляций, т. е. задающую координаты вершин мотивной единицы в косоугольной системе координат, можно записать в виде (7).

С целью большей иллюстративности приведем вариационные ряды решений для двух моделей затухания сигнала – ITU-R P.1238 и ITU-R P.525 при высокой нагрузке ($Q = 0,5$), поскольку в этом случае ввиду большего взаимного влияния смежных каналов, преимущество наилучшего решения будет более заметным. Они приведены на рисунке 2.

$$d = \begin{pmatrix} 0+i & \frac{1}{4}+i & \frac{1}{2}+i & -\frac{1}{4}+i & 0+i & \frac{1}{4}+i & -\frac{1}{2}+i & -\frac{1}{4}+i \\ 0+j & -\frac{1}{8}+j & -\frac{1}{4}+j & -\frac{3}{8}+j & -\frac{1}{2}+j & -\frac{5}{8}+j & -\frac{3}{4}+j & -\frac{7}{8}+j \end{pmatrix}. \quad (7)$$

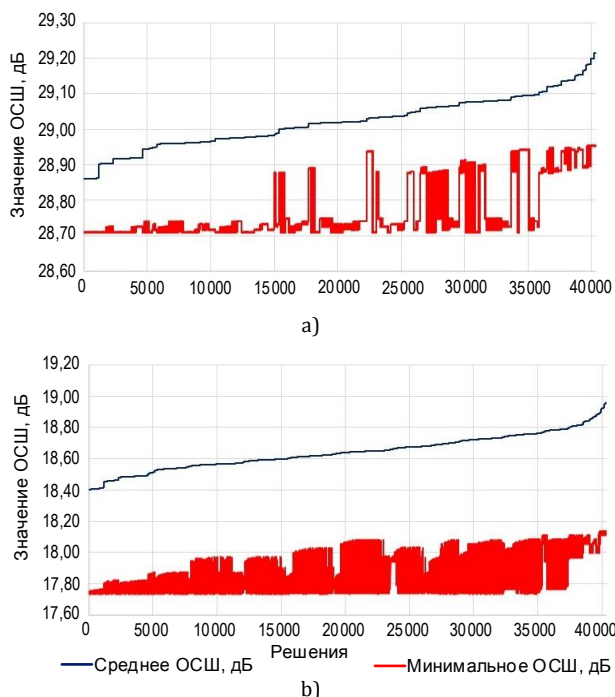


Рис. 2. Вариационный ряд для среднего и минимального SNR в случае $M = 8$, $N = 4$ для моделей затухания ITU-R P.525 (a) и ITU-R P.1238 (b) при $Q = 0,5$, $D = 3$

Fig. 2. Variational Series for Average and Minimum SNR for $M = 8$, $N = 4$, $Q = 0,5$, $D = 3$, ITU-R P.525 (a) and ITU-R P.1238 (b) Models

Отметим, что лучшее решение с точки зрения среднего SNR одновременно является лучшим с точки зрения минимального SNR. Из расчетов видно, что лучшее решение ожидаемо не зависит как от выбранной модели затухания, так и от нагрузки. При этом общий вид вариационного ряда для решений в двух рассмотренных моделях затухания сигнала-помехи идентичен и похож на S-образную функцию. При этом некоторая «ступенчатость» вариационного ряда для случая сильного затухания объясняется очень небольшой разницей в абсолютных значениях по параметрам наилучшего решения. Во всех приведенных ниже результатах значения округлены с точностью до 0,01 дБ.

Во всех случаях при $D = 3$ лучшим решением является № 28811. При $D = 0$ лучшим решением является № 16456. Соответствующие им частотные конфигурации (в МГц) приведены в таблице 1.

Отметим, что здесь и далее номера решения указываются по порядку их генерации алгоритмом, приведенным в работе [16]. Указанным решениям соответствуют частотные конфигурации мотивной единицы (рисунки 3 и 4). При этом числами показаны номера каналов диапазона 5 ГГц.

ТАБЛИЦА 1. Решения для «замощения» $M = 8$, $N = 4$

TABLE 1. Solutions for Tessellation with $M = 8$, $N = 4$

№ решения	ТД	1	2	3	4	5	6	7	8
16456	Канал	64	44	52	40	56	36	60	48
	Частота	5320	5220	5260	5200	5280	5180	5300	5240
28811	Канал	60	40	48	52	64	56	44	36
	Частота	5300	5200	5240	5260	5320	5280	5220	5180

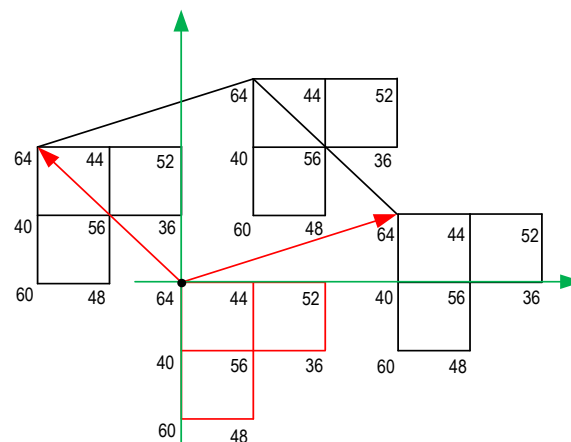


Рис. 3. Решение № 16456 ($D = 0$)

Fig. 3. Solution № 16456, $D = 0$

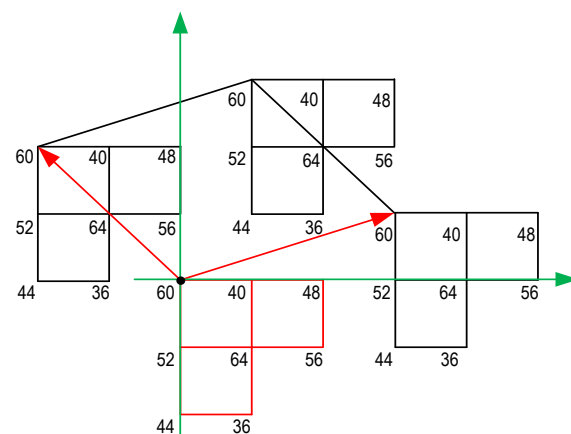


Рис. 4. Решение № 28811 ($D = 3$)

Fig. 4. Solution № 28811, $D = 3$

На рисунке 3 видно, что в рамках частотной конфигурации № 16456 в мотивной единице нет ни одной ТД, имеющей смежные точки, работающие на смежном канале, однако в рамках трансляций решение не является наилучшим. В то же время решение на рисунке 4 наилучшее именно с точки зрения учета трансляций. Теперь рассмотрим влияние размера сетки D на вариационный ряд решений для среднего SNR. Соответствующие графики приведены на рисунке 5.

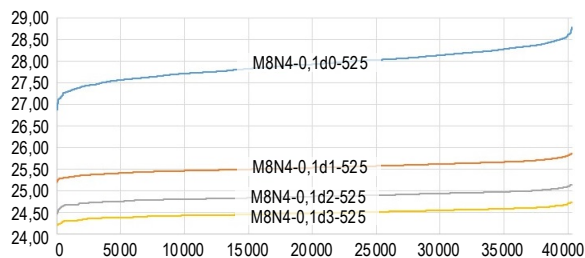


Рис. 5. Вариационные ряды для среднего SNR в случае $M = 8$, $N = 4$, модель затухания ITU-R P.525, $Q = 0,1$

Fig. 5. Variational Series for Average SNR for $M = 8$, $N = 4$, $Q = 0,1$, ITU-R P.525 Model

Обратим внимание, что с увеличением D последовательно снижаются значения SNR для решений и повышается точность расчетов. Можно ожидать, что возможна экстраполяция решений на большие D . При этом вид вариационных рядов для различных D одинаков.

В таблице 2 приведены результаты расчетов лучших решений для указанных условий. Приведены среднее, минимальное, а также значение SNR для третьего по величине узла.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов для $M = 8$, $N = 4$

TABLE 2. Calculation Results for $M = 8$, $N = 4$

L	Q	D	$\langle \text{SNR} \rangle$	$\text{Min}(\text{SNR})$	$\text{SNR}(3)$
1238	0,1	0	29,97	29,95	29,98
		1	29,85	29,79	29,85
		2	29,84	29,78	29,83
		3	29,83	29,77	29,83
		∞	29,81	29,75	–
1238	0,5	0	29,84	29,75	29,89
		1	29,29	29,05	29,29
		2	29,24	28,98	29,23
		3	29,21	28,96	29,21
		∞	29,13	28,85	–
525	0,1	0	28,79	28,37	29,02
		1	25,87	25,33	25,64
		2	25,14	24,53	24,86
		3	24,73	24,12	24,43
		∞	24,30	23,85	–
525	0,5	0	25,86	24,84	26,44
		1	20,52	19,63	20,15
		2	19,50	18,67	19,11
		3	18,96	18,14	18,54
		∞	18,36	17,17	–

Экстраполяция параметров лучшего решения экспоненциальной функцией на бесконечное D также показывает хорошую сходимость для всех рассмотренных случаев и представлена в таблице выше значениями при $D = \infty$.

Далее будем рассматривать мотивные единицы, возможные при «замощениях» с координационным числом $N = 6$ для двух структур.

Решения для случая $M = 8$, $N = 6$. Структура № 1

Для структуры № 1 при замощении с координационным числом 6, «замощение» плоскости, базис и мотивная единица приведены на рисунке 6.

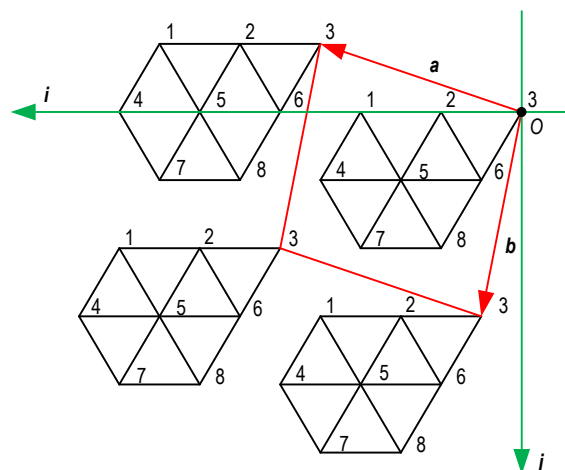


Рис. 6. Трансляционная симметрия и мотивная единица для случая $M = 8$, $N = 6$. Структура № 1

Fig. 6. Translation Symmetry and Cell Unit for $M = 8$, $N = 6$. Structure № 1

Матрица перехода между системами координат имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 5R & R \\ -R\sqrt{3} & 3R\sqrt{3} \end{pmatrix}.$$

Матрица, содержащая все множество трансляций, т. е. задающая координаты вершин мотивной единицы в косоугольной системе координат, имеет вид (8).

Выполним расчеты матрицы решений и построим вариационные ряды, содержащие минимальное и среднее SNR. Ряды для двух рассматриваемых моделей затухания приведены на рисунке 7.

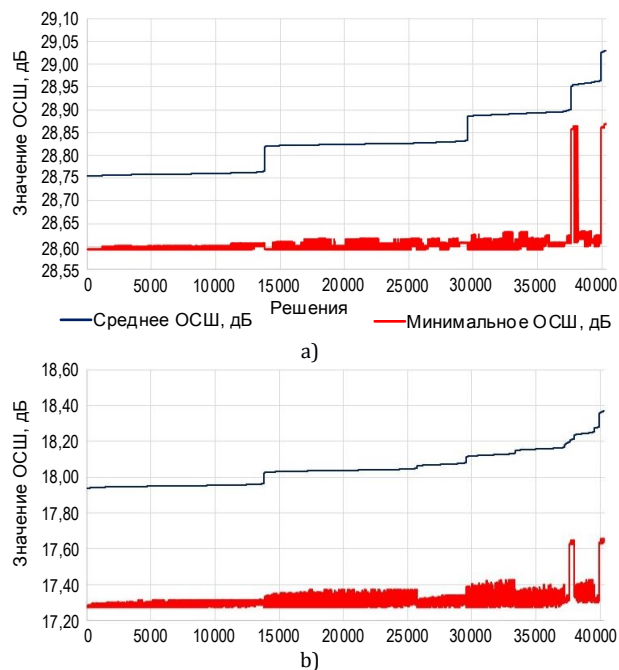


Рис. 7. Вариационный ряд для среднего и минимального SNR в случае $M = 8$, $N = 6$ (структура № 1) для моделей затухания ITU-R P.525 (a) и ITU-R P.1238 (b) при $Q = 0,5$, $D = 3$

Fig. 7. Variational Series for Average and Minimum SNR for $M = 8$, $N = 6$, $Q = 0,5$, $D = 3$, ITU-R P. 525 (a) and ITU-R P.1238 (b) Models. Structure № 1

$$d = \begin{pmatrix} \frac{6}{8} + i & \frac{3}{8} + i & 0 + i & \frac{7}{8} + i & \frac{1}{2} + i & \frac{1}{8} + i & \frac{5}{8} + i & \frac{2}{8} + i \\ \frac{2}{8} + j & \frac{1}{8} + j & 0 + j & \frac{5}{8} + j & \frac{1}{2} + j & \frac{3}{8} + j & \frac{7}{8} + j & \frac{6}{8} + j \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Во всех случаях при $D = 3$ лучшим решением является № 37457. Соответствующая частотная конфигурация приведена в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Решение для «замощения» $M = 8, N = 6$, структура № 1

TABLE 3. Solution for Tessellation with $M = 8, N = 6$, Structure № 1

№ решения	ТД	1	2	3	4	5	6	7	8
37457	Канал	36	56	48	52	44	64	60	40
	Частота	5180	5280	5240	5260	5220	5320	5300	5200

Указанному решению соответствует частотная конфигурация мотивной единицы, показанная на рисунке 8. Отметим, что в ней нет ТД, имеющих более одной соседней точки, работающей на смежном канале.

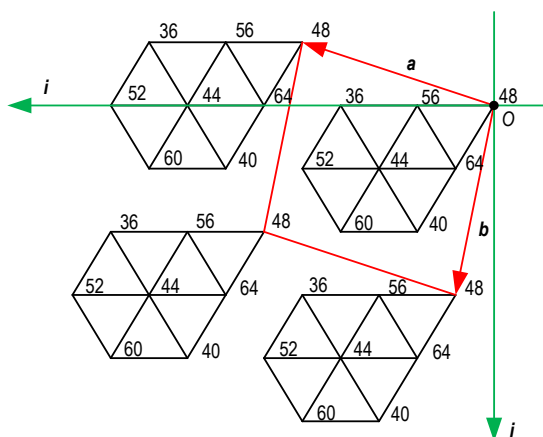


Рис. 8. Решение № 37457, структура № 1

Fig. 8. Solution №3 7457. Structure № 1

Теперь рассмотрим влияние размера сетки D на вариационный ряд решений для среднего SNR. Соответствующие графики приведены на рисунке 9.

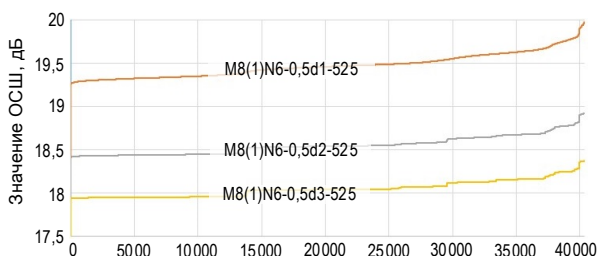


Рис. 9. Вариационные ряды для среднего SNR в случае $M = 8, N = 6$, структура № 1, модель затухания ITU-R P.525, $Q = 0.5$

Fig. 9. Variational Series for Average SNR for $M = 8, N = 6, Q = 0.5$, ITU-R P.525 Model. Structure № 1

Для большей наглядности, на рисунке выше не приведен вариационный ряд для $D = 0$. Обратим внимание, что с увеличением D последовательно

повышается точность расчетов и можно ожидать, что возможна экстраполяция решения на большие D . При этом вид вариационных рядов для различных D также одинаков.

В данном случае особенное внимание необходимо обратить на тот факт, что можно выделить группу из нескольких лучших решений, количеством 384 шт. На вариационных рядах их хорошо видно в правой части диаграммы. На рисунке 10 для большей наглядности приведена крайняя правая часть вариационного ряда среднего SNR для $D = 3$ (см. рисунок 9) в порядке от лучшего решения к худшим.

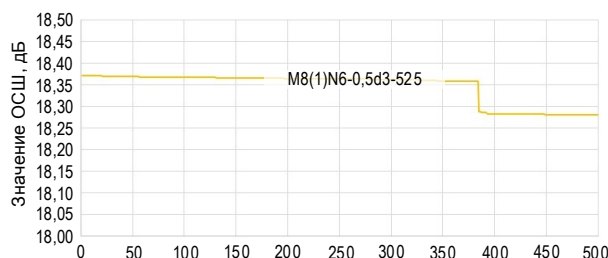


Рис. 10. Группа лучших решений в случае $M = 8, N = 6$, структура № 1, модель затухания ITU-R P.525, $Q = 0.5$

Fig. 10. Best Solutions for $M = 8, N = 6, Q = 0.5$, ITU-R P.525 Model. Structure № 1

Наличие убывания графика на рисунке 10 на участке до решения № 384 объясняется тем, что рассматриваемая сетка «замощения» представляет собой параллелепипед, а не круг. Т. е. с точки зрения произвольно взятой ТД в мотивной единице имеет место неизотропность (неравноценность) направлений на плоскости. С ростом D эта разница последовательно снижается и обратится в ноль на бесконечности. В таблице 4 приведены результаты расчетов лучших решений для указанных условий. Приведен ряд SNR: среднее ($\langle SNR \rangle$), минимальное ($\text{Min}(SNR)$), а также для третьего по величине узла ($SNR(3)$). Обратим внимание, что лучшее решение по поиску частотной конфигурации обладает одновременно и максимальным средним SNR и максимальным минимальным SNR среди возможных.

Экстраполяция экспоненциальной функцией параметров лучшего решения на бесконечное D показывает хорошую сходимость для всех рассмотренных случаев и представлена в таблице 4 значениями при $D = \infty$. Подбор параметров экспоненциальной функции (6) осуществлялся методом наименьших квадратов.

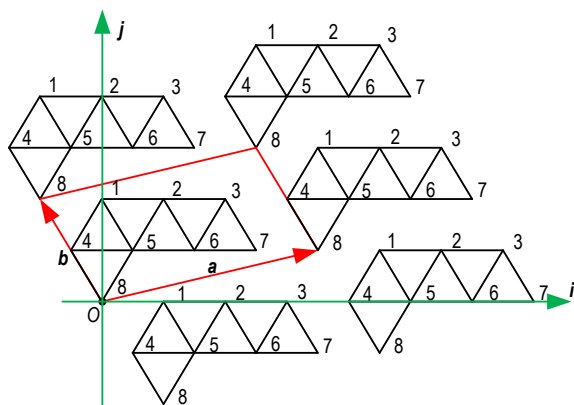
Теперь рассмотрим структуру замощения, также соответствующую случаю $M = 8$ и $N = 6$, но с иной геометрией мотивной единицы (Структура №2).

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчетов для $M = 8, N = 6$, структура № 1TABLE 4. Calculation Results for $M = 8, N = 6$, Structure № 1

L	Q	D	$\langle SNR \rangle$	$\text{Min}(SNR)$	$SNR(3)$
1238	0,5	0	29,79	29,78	29,84
		1	29,14	28,96	29,00
		2	29,05	28,90	28,92
		3	29,03	28,87	28,90
		∞	28,93	28,74	–
525	0,1	0	28,67	28,44	28,79
		1	25,54	24,98	25,05
		2	24,70	24,19	24,26
		3	24,28	23,73	23,83
		∞	24,01	23,41	–
525	0,5	0	25,57	24,98	25,88
		1	19,98	19,30	19,34
		2	18,92	18,21	18,31
		3	18,37	17,65	17,78
		∞	17,73	17,05	–

Решения для случая $M = 8, N = 6$. Структура № 2

Для структуры № 2 при замощении с координатным числом 6, замощение плоскости, базис и мотивная единица приведены на рисунке 11.

Рис. 11. Трансляционная симметрия и мотивная единица для случая $M = 8, N = 6$. Структура № 2Fig. 11. Translation Symmetry and Cell Unit for $M = 8, N = 6$. Structure № 2

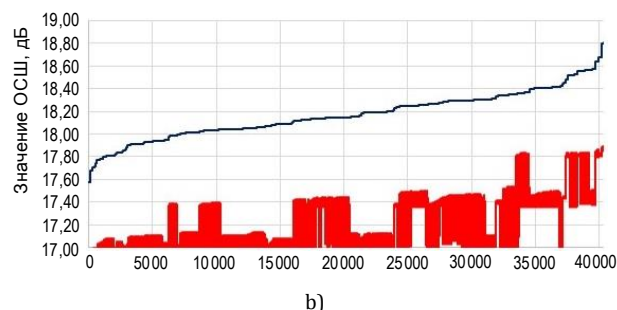
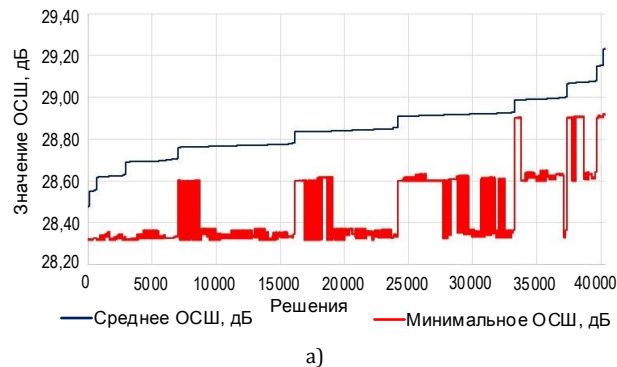
Матрица перехода между системами координат имеет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 7R & -2R \\ R\sqrt{3} & 2R\sqrt{3} \end{pmatrix}.$$

Матрица, содержащая все множество трансляций, т. е. задающая координаты вершин мотивной единицы в косоугольной системе координат, имеет вид (9).

$$d = \begin{pmatrix} \frac{1}{4} + i & \frac{1}{2} + i & \frac{3}{4} + i & 0 + i & \frac{1}{4} + i & \frac{1}{2} + i & \frac{3}{4} + i & 0 + i \\ \frac{7}{8} + j & \frac{6}{8} + j & \frac{5}{8} + j & \frac{1}{2} + j & \frac{3}{8} + j & \frac{2}{8} + j & \frac{1}{8} + j & 0 + j \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Выполним расчеты матрицы SNR и построим вариационные ряды, содержащие для каждого решения минимальное и среднее SNR . Ряды для двух рассматриваемых моделей затухания приведены на рисунке 12.

Рис. 12. Вариационный ряд для среднего и минимального SNR в случае $M = 8, N = 6$, структура № 2 для моделей затухания ITU-R P.1238 (а) и ITU-R P.525 (б) при $Q = 0,5, D = 3$
Fig. 12. Variational Series for Average and Minimum SNR for $M = 8, N = 6, Q = 0,5, D = 3$, ITU-R P.1238 (a) and ITU-R P.525 (b) Models. Structure № 2

Во всех случаях при $D = 3$ лучшим решением является № 28811. Соответствующая ему частотная конфигурация, приведена в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5. Решение для «замощения» $M = 8, N = 6$, структура № 2TABLE 5. Solution for Tessellation with $M = 8, N = 6$, Structure № 2

№ решение	ТД	1	2	3	4	5	6	7	8
6225	Канал	36	56	48	60	44	64	40	52
	Частота	5180	5280	5240	5300	5220	5320	5200	5260

Указанному решению соответствует конфигурация мотивной единицы, показанная на рисунке 13. Решения обладают теми же свойствами, что и в ранее рассмотренном случае для $N = 6$.

Теперь рассмотрим влияние размера сетки D на вариационный ряд решений для среднего SNR . Соответствующие графики приведены на рисунке 14.

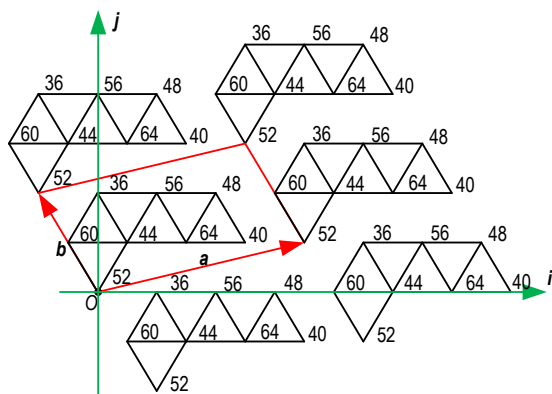


Рис. 13. Решение № 6225, структура № 2

Fig. 13. Solution № 6225. Structure № 2

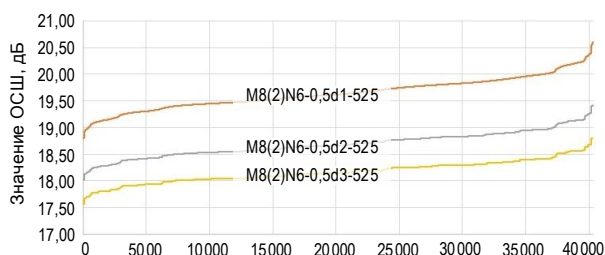


Рис. 14. Вариационные ряды для среднего SNR в случае $M = 8$, $N = 6$, структура № 2, модель затухания ITU-R P.525, $Q = 0,5$

Fig. 14. Variational Series for Average SNR for $M = 8$, $N = 6$, $Q = 0,5$, ITU-R P.525 Model. Structure № 2

Аналогично, на рисунке выше не приведен вариационный ряд для $D = 0$.

Отметим, что можно выделить группу из нескольких лучших решений, количеством 128 шт. На вариационных рядах они хорошо видны в правой части диаграммы. На рисунке 15 для большей наглядности приведена крайняя правая часть вариационного ряда среднего SNR для $D = 3$ (см. рисунок 14) в порядке от лучшего решения к худшим.

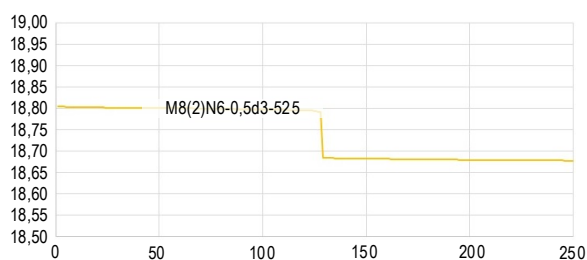


Рис. 15. Группа лучших решений в случае $M = 8$, $N = 6$, структура № 2, модель затухания ITU-R P.525, $Q = 0,5$

Fig. 15. Best Solutions for $M = 8$, $N = 6$, $Q = 0,5$, ITU-R P.525 Model. Structure № 2

Наличие убывания графика на рисунке 15 на участке до решения № 128 аналогично предыдущему случаю объясняется тем, что с точки зрения произвольно взятой ТД в мотивной единице имеет место неизотропность (неравноценность) направлений на плоскости.

В таблице 6 приведены результаты расчетов лучших решений для указанных условий.

ТАБЛИЦА 6. Результаты расчетов для $M = 8$, $N = 6$, структура № 2

TABLE 6. Calculation Results for $M = 8$, $N = 6$, Structure № 2

L	Q	D	$\langle SNR \rangle$	$\text{Min}(SNR)$	$SNR(3)$
1238	0,5	0	29,85	29,78	29,87
		1	29,34	29,06	29,37
		2	29,26	28,96	29,28
		3	29,23	28,92	29,25
		∞	29,16	28,81	–
525	0,1	0	28,87	28,45	29,02
		1	25,92	25,20	25,74
		2	25,08	24,36	24,83
		3	24,62	23,91	24,35
		∞	24,40	23,63	–
525	0,5	0	26,06	25,02	26,43
		1	20,60	19,54	20,31
		2	19,42	18,45	19,05
		3	18,81	17,88	18,42
		∞	18,24	17,28	–

Краткий анализ полученных решений

Из таблиц 2, 4 и 6 видно, что взаимное влияние каналов, и, как следствие, различия между частотными конфигурациями минимальны в случае высокого затухания между ТД (модель ITU-R P.1238) и с точки зрения среднего SNR составляют менее 0,5 дБ. В то же время в случае слабого затухания сигнала между ТД (модель ITU-R P.525), и особенно в случае высоконагруженных БЛВС, различия в величине среднего SNR между решениями могут достигать 2–3 дБ, что существенно при проектировании.

В абсолютных же значениях межканальные помехи оказывают наибольшее влияние (до 15 дБ) на SNR при низких затуханиях между ТД.

К особенностям полученных наилучших решений для $D = 0$ можно отнести следующее:

- в рамках мотивной единицы нет смежных вершин, использующих соседние каналы;
- в рамках трансляций есть смежные вершины, использующие соседние каналы.

Последнее связано с тем, что данное решение было найдено без учета трансляций и является оптимальным без учета «замощения».

Отличием решений для $D = 3$ является отсутствие смежных вершин в рамках трансляций, использующих соседние каналы, так как с учетом «замощения» наилучшее решение учитывает связь между смежными мотивными единицами. В структуре «замощения» для $N = 4$ наблюдается S-образная форма вариационного ряда решений, в которой наилучшим является одно решение. Напротив, в обеих структурах «замощения» для $N = 6$ можно выделить группу оптимальных решений числом 384 шт. для структуры № 1 и 128 шт. для структуры № 2, хорошо заметных в вариационном ряду.

При всех прочих равных условиях значения SNR в решениях для структуры № 2 меньше на величины порядка 0,5 дБ по сравнению с аналогичными

решениями для структуры № 1 в «замощении» с координатным числом $N = 6$, что говорит о предпочтительности ее выбора.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В результате проведенной работы можно отметить, что:

- проанализированы три структуры «замощения» плоской зоны покрытия для частотных планов с восемью каналами, отвечающих задаче построения сети IEEE 802.11 в частотном диапазоне 5 ГГц (поддиапазоны UNII-1 и UNII-2);
- получены частотные конфигурации, отвечающие требованиям к наилучшим решениям задачи минимизации межканальных помех;
- разница между значениями среднего SNR для худших и лучших частотных конфигураций в зависимости от рассматриваемой регулярной струк-

туры различается в пределах 0,5–3 дБ, что существенно при работе БЛВС и должно быть учтено при выборе частотного плана на этапе проектирования;

- значения среднего SNR для структуры № 2 при прочих равных условиях говорят о предпочтительности ее выбора по сравнению со структурой № 1;
- результаты расчетов показывают, что как выбор модели затухания, так и нагрузка на БЛВС не влияют качественно на выбор наилучшей частотной конфигурации;
- решение, выбранное исходя из критерия максимального среднего SNR, обладает также лучшим минимальным SNR и с точностью до 0,01 дБ – максимальным третьим SNR в решении.

Отметим также, что полученные результаты расчетов открывают перспективу дальнейшего анализа частотных конфигураций с точки зрения исследования возможных алгоритмов их построения.

Список источников

1. 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
2. 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
3. Wireless LAN Design Guide: For High Density Environments in Higher Education // Cisco Systems. 2017. URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/docs/education/cisco_wlan_design_guide.pdf (дата обращения 10.11.2022)
4. High Density Wi-Fi Design Principles // Aerohive Networks. 2012. URL: <https://dokumen.tips/documents/aerohive-whitepaper-hi-density-principles.html> (дата обращения 10.11.2022)
5. High Density Wi-Fi Deployment Guide. Best Practices Design Guide. // Ruckus Wireless. 2018. URL: <https://support.ruckuswireless.com/documents/1345-best-practices-design-guide-high-density-wi-fi-ap-deployment> (дата обращения 10.11.2022)
6. Aruba High Density Wireless Networks for Auditoriums. VRD. // Aruba Networks. 2010. URL: <https://www.arubanetworks.com/vrd/HighDensityVRD/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=Chap1.html> (дата обращения 10.11.2022)
7. Best Practices for High Density Wireless Network Design in Education and SMB. White Paper // Netgear. 2013 URL: https://www.netgear.com/images/pdf/High_Density_Best_Practices.pdf (дата обращения 10.11.2022)
8. Беделл П. Сети. Беспроводные технологии. М.: НТ Пресс, 2008.
9. 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.
10. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
11. 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.
12. 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.
13. Бабков В.Ю., Стариков В.В. Выбор кластерной структуры сети начального приближения стандарта LTE // Информационные системы и технологии. 2017. № 5(103). С. 72–80.
14. Викулов А.С. Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замощения» плоской зоны покрытия регулярными структурами. Часть 1. Модель межканальных помех // Труды учебных заведений связи. 2022. № 2. С. 29–36. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-29-36
15. Викулов А.С. Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замощения» плоской зоны покрытия регулярными структурами. Часть 2. Метод выбора частотной конфигурации и решения для малого числа каналов // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 27–36. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-27-36
16. Фёдоров Л.И. Генератор перестановок транспозицией соседних элементов в Mathcad // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2014. № 4. С. 129–136.

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.525-2 (1994) Расчет ослабления в свободном пространстве. (1978-1982-1994).

References

1. 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
2. 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
3. Cisco Systems. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. 2017. URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/docs/education/cisco_wlan_design_guide.pdf [Accessed 10th November 2022]
4. Aerohive Networks. High Density Wi-Fi Design Principles. 2012. URL: <https://dokumen.tips/documents/aerohive-whitepaper-hi-density-principles.html> [Accessed 10th November 2022]
5. Ruckus Wireless. High Density Wi-Fi Deployment Guide. Best Practices Design Guide. 2018. URL: <https://support.ruckuswireless.com/documents/1345-best-practices-design-guide-high-density-wi-fi-ap-deployment> [Accessed 10th November 2022]
6. Aruba Networks. Aruba High Density Wireless networks for Auditoriums. VRD. 2012. URL: <https://www.arubanetworks.com/vrd/HighDensityVRD/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=Chap1.html> [Accessed 10th November 2022]
7. Netgear. Best Practices for High Density Wireless Network Design in Education and SMB. White Paper. 2013. URL: https://www.netgear.com/images/pdf/High_Density_Best_Practices.pdf [Accessed 10th November 2022]
8. Bedell P. *Wireless Crash Course*. McGraw-Hill Professional, 2001.
9. Ryzhkov A.E., Sivers M.A., Babkin A.S., Pilenok 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.)
10. 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.)
11. 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.)
12. 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.)
13. 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.)
14. 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
15. Vikulov A. Effective Channel Planning for IEEE 802.11 Networks as a Plane Tessellation Problem. Part 2. Method of Best Channel Configuration Selection and Solutions for a Low Number of Channels. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(3):27–36. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-27-36
16. 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.)
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.525-2 *Calculation of free-space attenuation*. 1994.

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 31.10.2022; принята к публикации 02.11.2022.

The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 31.10.2022; accepted for publication 02.11.2022.

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>