

Научная статья

УДК 004.725.5

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-27-36



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

Антон Сергеевич Викулов, Asv012016@gmail.com

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

Аннотация: Вопрос назначения конкретного канала точке доступа в крупных, распределенных сетях IEEE 802.11 – это сложная задача. В ряде случаев она решается автоматически контроллером сети на основе заданных настроек, а когда это невозможно, может потребовать участия человека. Кроме того, для выбора частотного плана необходимо понимать преимущества той или иной конфигурации каналов и на этапе проектирования иметь возможность оценить возникающие эффекты межканальных помех. Аналогичная проблема может возникать и при диагностике работы современных беспроводных сетей данного стандарта. В работе рассмотрены регулярные структуры «замощения» плоскости как способ описать распределенную сеть беспроводного доступа и предложен метод поиска наилучших двумерных частотных конфигураций для наиболее эффективного частотно-территориального планирования сетей IEEE 802.11 с учетом специфики использования спектра в данных сетях. Кроме того, в работе рассмотрены наиболее простые возможные решения: для трех- и четырехканальных частотных кластеров.

Ключевые слова: беспроводная сеть доступа, IEEE 802.11, частотный кластер, мотивная единица, «замощение» плоскости, регулярная структура, частотное планирование, 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 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

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

Anton Vikulov, Asv012016@gmail.com

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

Abstract: *The assignment a particular channel to an access point in large, distributed IEEE 802.11 networks can present a complex challenge. Although the channel can be assigned automatically by the network controller in some cases based on specified settings, it may require human attention when this is not possible. In order to select a frequency plan, it is necessary to understand the advantages of a particular channel configuration and evaluate the resulting effects of adjacent-channel interference at the design stage. A similar problem may arise during WLAN troubleshooting. In this paper, we consider distributed flat wireless networks as regular structures in plane tessellation and propose a method for finding the best channel configurations for the most efficient channel planning of IEEE 802.11 networks, which take the specifics of spectrum use in these networks into account. In addition, we consider the simplest possible solutions for three- and four- channel frequency plans.*

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

For citation: 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

Введение

При проектной работе над сетями IEEE 802.11 [1] вообще и дополнением стандарта IEEE 802.11ax в частности [2], разворачиваемыми по сотовому принципу, часто необходимо обосновать возможность выбора конкретных частотных планов. Это может требоваться как с позиции необходимости получения разрешения на использование соответствующих частот, так и с позиции проектного обоснования перед заказчиком достижимых значений пропускной способности для конкретных клиентских устройств. Вопросы планирования беспроводных сетей различных стандартов рассматривались в литературе, в частности, в работе [3]. Основным источником помех для сети IEEE 802.11 являются смежные (посторонние) сети того же стандарта, а также точки доступа (ТД) той же сети, работающие на близко расположенных в спектре каналах, что создает негативное влияние на целевую ТД.

Исследованию вопросов планирования [4] беспроводных локальных вычислительных сетей (БЛВС) стандарта IEEE 802.11 для различных приложений [5] были посвящены работы [6, 7]. В них в большей степени рассматривался вероятностный подход к размещению ТД на плоскости с целью расчета суммарного спектра помехи. В данной статье проблема будет рассмотрена с иных позиций.

Ранее в [8] была предложена модель, реализующая геометрический подход к решению данной задачи, заключающийся в построении структуры «замощения» (наиболее плотного заполнения) плоскости зонами покрытия ТД, включающий в себя выбор решетки «замощения» (т. е. вида трансляционной симметрии, определяемой базисом) и мотивной единицы. В данном случае будем пользоваться кристаллографическими терминами для пояснения геометрической сути предлагаемого подхода. Так, под мотивной (элементарной) единицей [9] структуры будем понимать геометрическую фигуру, представляющую собой группу зон радиопо-

крытия точек доступа, связанную с каждым из узлов решетки. В спектральном смысле мотивная единица соответствует понятию частотного кластера [10], однако акцентируя внимание на геометрии структуры «замощения». Иными словами, размножая (транслируя) мотивную единицу на каждый из узлов решетки, получаем структуру «замощения». В [11] была предложена модель межканальных помех со стороны ТД собственной сети, основывающаяся на обозначенном геометрическом подходе.

Целью данной работы является разработка метода, позволяющего выбрать наилучшую частотную конфигурацию для конкретных мотивных единиц. Т. е. поставить такое однозначное соответствие между центральной частотой канала заданного типа и номером ТД в мотивной единице, чтобы характеристики радиопокрытия всей полученной структуры были наилучшими. Рассмотрим далее этот вопрос более подробно.

Постановка задачи

За критерий качества радиопокрытия, определяющий выбор режима модуляции и кодирования, примем отношение сигнал/шум (ОСШ) – SNR (*от англ. Signal-To-Noise Ratio*), измеренное на стороне каждой из ТД в одной произвольно выбранной мотивной единице. Для примера на рисунке 1 приведено «замощение» плоскости для частотного кластера размером M , в структуре с координационным числом (числом элементов на минимальном расстоянии от заданного) в плоскости N , равном 4. Красным показаны векторы трансляционной симметрии (базис) \mathbf{a} , \mathbf{b} и целевая мотивная единица, размещенная в узле O решетки с координатами $(0;0)$, где D – размер сетки, принимаемой во внимание при расчетах. На рисунке 1 показана структура из 25 мотивных единиц в «замощении»; при этом 24 мотивных единицы являются результатами трансляций исходной по обеим осям решетки в диапазоне $D \in [-2; 2]$.

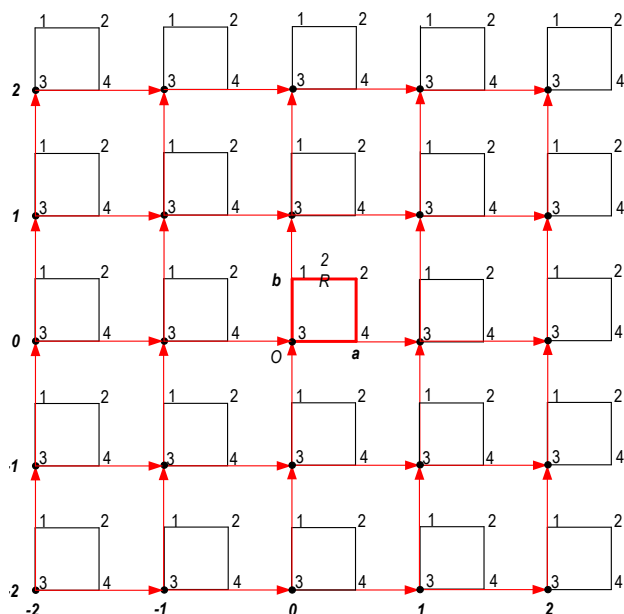


Рис.1. Пример «замощения» для $M = 4$, $N = 4$ и $D = 2$

Fig.1. Tessellation Example for $M = 4$, $N = 4$, and $D = 2$

Общее число возможных частотных конфигураций в кластере равно $M!$. Теперь сформулируем задачу следующим образом. Необходимо для бесконечной плоскости структуры «замощения» найти такую наилучшую частотную конфигурацию, т. е. однозначное соответствие между номером ТД мотивной единицы и центральной частотой канала IEEE 802.11 заданного типа, которая отвечала бы требованиям характеристик покрытия.

Рассмотрим модель межканальных помех, предложенную в работе [11]. Перечислим требования (детально будут рассмотрены далее) к такой частотной конфигурации мотивной единицы с позиции значения ОСШ:

- среднее ОСШ для всех ТД должно быть максимальным;
- должно выполняться максиминное условие для ОСШ;
- третье по величине ОСШ должно быть максимальным; такое условие является актуальным в случае равномерного размещения каналов на непрерывном участке спектра;
- минимальное ОСШ должно быть не ниже допустимого.

Сделаем следующие допущения. Во-первых, зона покрытия представляет собой бесконечную плоскость (именно рассмотрение бесконечной плоскости дает возможность сравнивать различные решения задачи поиска наилучшей частотной конфигурации). Во-вторых, зона покрытия, формируемая каждой из ТД, представляет собой круг радиуса R . В-третьих, расстояние между двумя любыми ближайшими точками доступа равно $2R$. В-четвертых, в частотном плане используются каналы одного типа, например, HE20. В-пятых, вероятность занятости Q всех каналов одинакова. И в-шестых, при

построении суммарного спектра межканальных помех будем учитывать влияние суммарного спектра помех от прочих точек доступа на стороне рассматриваемой ТД.

Зададимся целью построить метод выбора наилучшей частотной конфигурации из всех теоретически возможных.

Метод выбора наилучшей частотной конфигурации

Если размер частотного кластера равен M , то в мотивной единице «замощения» плоскости будет M точек доступа, работающих каждая на своем канале. Тогда число возможных частотных конфигураций будет $M!$, т. е. число возможных конфигураций определяется возможными перестановками из M . Поставим каждой ТД в соответствие некоторую центральную частоту канала наперед заданного типа.

Зададим матрицу-вектор F , содержащую центральные частоты каналов, заданные условиями задачи:

$$F = (F_1 \ F_2 \ \dots \ F_M) \quad (\text{МГц}). \quad (1)$$

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

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

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

Предлагаемый метод выбора частот можно описать пошагово.

Шаг 1. Формирование исходных данных.

На первом шаге определяются конкретные количественные значения исходных переменных и вид структуры «замощения».

Исходными данными в решаемой задаче являются:

- радиус R (м) зоны покрытия, формируемой точкой доступа БЛВС; примем его равным 10;
- 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 и ее базис;
- мотивная единица структуры;
- координационное число структуры N ;
- размер частотного кластера M , равный числу ТД в мотивной единице;
- матрица-вектор F , содержащая центральные частоты каналов, используемых в частотном плане;
- тип каналов, используемых в частотном плане;

- матрица H возможных частотных конфигураций;
- вероятность занятости канала Q ;
- фоновый шум NF (аббр. от англ. Noise Floor); примем его постоянным и равным -90 дБм;
- требуемый уровень приема сигнала P_T ;
- мощность передачи радиомодулей всех ТД в рассматриваемом диапазоне.

Шаг 2. Расчет матрицы возможных решений.

Матрица $SNR_{n,m}$ (где n – номер вершины; m – номер решения), содержащая множество значений ОСШ, рассчитывается согласно модели, предложенной в работе [11]. Расчет выполняется для всех возможных частотных конфигураций мотивной единицы заданной структуры и размера для нескольких различных размеров сетки D .

При этом сами значения SNR рассчитываются согласно формуле:

$$SNR_{n,m} = 10 \log_{10} \frac{\int_{F_T-A}^{F_T+A} S_{Tw}(f) df}{\int_{F_T-A}^{F_T+A} W_{Iw}(f) df} \quad (\text{дБ}), \quad (3)$$

где F_T – центральная частота сигнала (МГц); A – полуширина участка спектральной маски сигнала (МГц).

При этом размер матрицы определяется следующими диапазонами значения индексов $n \in [1, M]$, $m \in [1, M!]$.

В формуле (3) суммарный спектр всех межканальных помех W_{Iw} от ячеек той же БЛВС рассчитывается согласно:

$$W_{Iw}(f) = NF + Q \sum_{i=-D}^D \sum_{j=-D}^D \sum_{k=1}^M US_{Iw}(H_{k,m}, d_{i,j}(n), f) \quad (4)$$

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

где U – функция-индикатор межканальных помех; NF – фоновый шум (мВт); Q – вероятность занятости частотного канала; i, j – первая и вторая координаты в системе трансляционной симметрии (см. рисунок 1); D – размер сетки; S_{Iw} – спектральная маска канала заданного типа; $H_{n,m}$ – матрица возможных $m \in [0, M!]$ частотных конфигураций для заданной мотивной единицы, содержащей n ТД.

Спектральная маска сигнала задается согласно:

$$S_{Tw}(f) = 10^{\frac{P_T + S(f-F_T)}{10}} \quad (\text{мВт}), \quad (5)$$

где $P_T = -60$ дБм.

Маска канала-помехи задается согласно:

$$S_{Iw}(f) = 10^{\frac{P_{\text{rad}} + G_t + S(f-F_I) - L(d)}{10}} \quad (\text{мВт}), \quad (6)$$

где F_I – центральная частота канала-помехи (МГц); P_{rad} – уровень мощности излучения источника сигнала на выходе радиомодуля, создающего помеху

(дБм); G_t – коэффициент усиления передающей антенны ТД (дБ); $L(d)$ – затухание помехи в зависимости от расстояния d до источника (дБ).

Отметим, что выбор конкретной модели затухания [12–16] не определяет качественный выбор лучшей частотной конфигурации, а влияет лишь на количественные характеристики.

Шаг 3. Построение вариационного ряда решений.

Вариационный ряд с целью выбора наилучшего решения строится с двойной сортировкой по возрастанию – в первую очередь по среднему отношению сигнал/шум: $\langle SNR_{n,m} \rangle$, и во вторую – по минимальному: $\min(SNR_{n,m})$, и, таким образом, содержит два значения для каждого решения.

Шаг 4. Поиск оптимального решения (группы решений).

На данном шаге, имея $M!$ наборов частотных конфигураций, необходимо среди найденных решений выделить такое решение m (или группы решений), в случае выбора которых выполнялись бы условия оптимальности.

С учетом ранее названных требований сформируем задачу поиска наилучшей частотной конфигурации следующим образом. В рамках мотивной единицы такая частотная конфигурация ТД должна удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} & \max\langle SNR_{n,m} \rangle; \max\min(SNR_{n,m}); \max\langle SNR_{3,m} \rangle; \\ & \min\langle SNR_{n,m} \rangle > 25 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

Первое условие требует максимизации среднего значения $SNR_{n,m}$ среди всех возможных m . Это необходимо для обеспечения наилучшего в среднем ОСШ для всех ТД в мотивной единице и как следствие – лучших скоростей передачи на более высоких MCS.

Второе условие требует отсутствия ТД, «проваляющихся» по значению ОСШ в мотивной единице, т.е. минимальное ОСШ в мотивной единице должно быть максимальным среди всех возможных решений. Это необходимо для исключения из числа наилучших решений случаев, при которых теоретически возможно относительно высокое среднее значение ОСШ при низком (возможно на одной лишь ТД) минимальном ОСШ.

Третье условие является опциональным и связано с особенностями размещения каналов в спектре. В любой из рассматриваемых задач два канала, располагающиеся на краях спектра, будут иметь преимущества по сравнению с прочими ввиду того, что для них помехи будут в спектральном смысле «односторонними». Потому канал с третьим по величине значением ОСШ будет одним из определяющих в каждой частотной конфигурации. Обозначим ОСШ такой ТД как $SNR_{3,m}$. Его в некотором смысле можно считать «лучшим» каналом конфигурации, поскольку качество его работы будет в

большей степени определяться именно геометрией мотивной единицы и частотной конфигурацией, а не фактом размещения на краю рассматриваемого участка спектра.

Четвертое условие является опциональным и может накладывать нижнюю границу на ОСШ ТД мотивной единицы, поскольку при решении конкретных проектных задач это условие обычно фигурирует в явном виде. В данном случае значение приведено для примера, а конкретное – может зависеть от условий проектной задачи.

Шаг 5. Экстраполяция решения на $D \rightarrow \infty$.

Поскольку значение среднего ОСШ рассчитывается для ряда конечных значений размера сетки D , а расчет для больших D затруднителен ввиду большой вычислительной сложности, представляется удобным применить следующий подход. Значение $\max\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle$ при больших D будет иметь предел, связанный с тем фактом, что число мотивных единиц, влияние которых на целевую ТД исследуется в решении, столь велико для рассматриваемой геометрии, что становится неотличимо от бесконечности. В то же время дальнейшее увеличение D не несет существенного влияния на результат ввиду большого расстояния до помехи.

В таком случае средним значением ОСШ из шага 1 для случая бесконечной плоскости является:

$$\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_{\infty} = \lim_{D \rightarrow \infty} (\max\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle) \text{ (дБ)}. \quad (7)$$

Для нахождения такого предела, исходя из рассчитанных значений ОСШ для найденных решений, удобно использовать следующую аппроксимирующую функцию:

$$\max\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle = z_1 \cdot e^{-(D-z_2)} + \langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_{\infty} \text{ (дБ)}, \quad (8)$$

где z_1 и z_2 – некоторые коэффициенты, подбираемые методом наименьших квадратов.

Из формулы видно, что график функции (8) асимптотически приближается к значению $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_{\infty}$ при больших D . Это важно, поскольку в дальнейшей работе будет показано, что не все случаи актуальные для практики допускают приемлемое время вычисления для достаточно больших D .

Аналогичным образом экстраполируем значение $\min(\text{SNR}_n)$ для лучшего решения. Отметим, что решения для больших D , отвечающие большому размеру «замощаемой» плоскости, являются геометрическим упрощением, поскольку на практике на таких расстояниях начинает влиять земная поверхность, занятость первой зоны Френеля и, как следствие, высота установки ТД. Так, например, для $D = 100$, при $M = 3$ и $N = 3$, при $R = 10$ м линейный размер общего «замощаемого» пространства составит порядка 3,5 км, что в несколько раз превышает практическую дальность работы ТД IEEE 802.11.

Тем не менее, именно на больших D будут наиболее отчетливо видны различия в характеристиках выбранных частотных конфигураций.

Теперь рассмотрим конкретные решения на примере случаев с малыми M , встречающимися на практике. К таковым относятся возможные конфигурации с размером частотного кластера $M = 3$ и $M = 4$. Соответствующие им структуры «замощения» были ранее предложены в работе [9]. Такие размеры кластера нередко встречаются при частотном планировании в диапазоне 2,4 ГГц и отличаются отсутствием выраженной наилучшей частотной конфигурации. Проверим расчетами данное утверждение.

Расчеты для малого числа каналов. Случай $M = 3$

Примем целевое ОСШ для всех случаев, рассмотренных ниже за 30 дБ (при уровне приема –60 дБм и шумовом пороге –90 дБм). Отклонения в меньшую сторону от указанного значения будут определяться выбранной частотной конфигурацией решения и геометрией мотивной единицы.

Итак, «замощение» для $M = 3$, $N = 6$ приведено на рисунке 2.

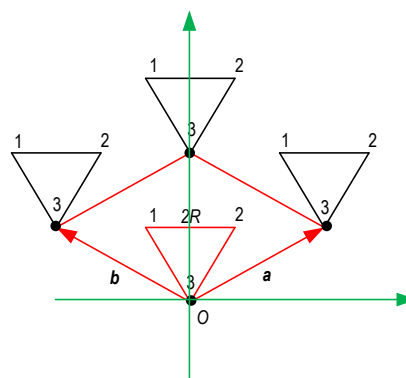


Рис. 2. Трансляционная симметрия и мотивная единица для случая $M = 3$, $N = 6$

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

Для $M = 3$ рассмотрим один частотный план для диапазона 2,4 ГГц с тремя каналами HE20: 1, 6, 11. Матрица-вектор F центральных частот каналов (1) в данном случае будет иметь вид:

$$F = (2412 \quad 2437 \quad 2462).$$

Матрица H возможных решений (2) для $M = 3$ имеет вид:

$$H = \begin{pmatrix} 2412 & 2437 & 2437 & 2462 & 2462 & 2412 \\ 2437 & 2412 & 2462 & 2412 & 2412 & 2462 \\ 2462 & 2462 & 2412 & 2437 & 2437 & 2437 \end{pmatrix}.$$

В результате расчетов для модели затухания сигналов-помех ITU-R P.1238 была выполнена аппроксимация зависимости $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle(D)$ для экстраполяции и нахождения предела функции (8) при $D \rightarrow \infty$. Графики для $M = 3$ приведены на рисунке 3.

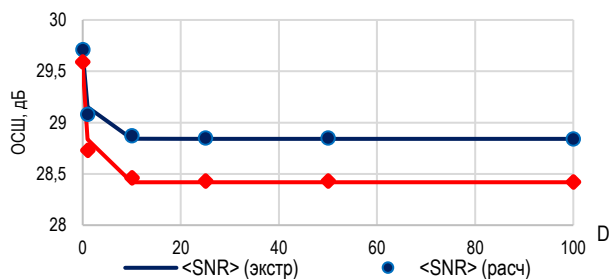


Рис. 3. Аппроксимация $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_{\infty}$ и $\min(\text{SNR})$ $M = 3, N = 6$
 Fig. 3. Approximation of $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_{\infty}$ and $\min(\text{SNR})$ for $M = 3, N = 6$

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов для $M = 3, Q = 0,1$ для двух моделей затухания ITU-R P.525 / ITU-R P.1238

TABLE 1. Calculated Solutions for $M = 3, Q = 0,1$ for ITU-R P.525 / ITU-R P.1238 Attenuation Models

M	N	D	Q	Частотный план	$\langle \text{SNR} \rangle$, дБ	Min(SNR), дБ	СКО $\langle \text{SNR} \rangle$, дБ
3	6	0	0,1	1, 6, 11	26,51 / 29,71	25,53 / 29,59	0 / 0
		1			22,29 / 29,08	20,86 / 28,73	0,017 / 0,003
		10			19,29 / 28,87	17,71 / 28,46	0 / 0
		25			18,42 / 28,85	16,82 / 28,43	0 / 0
		50			17,86 / 28,85	16,24 / 28,43	0 / 0
		100			17,35 / 28,84	15,72 / 28,42	0 / 0
		∞			– / 28,84	– / 28,42	

ТАБЛИЦА 2. Решения $\text{SNR}_{n,m}$ при $D = 100$,
ITU-R P.525 / ITU-R P.1238

TABLE 2. Solutions for $D = 100$
for ITU-R P.525 / ITU-R P.1238 Attenuation Model

Номер решения	Вершина		
	1	2	3
1	18,17 / 29,06	15,72 / 28,42	18,16 / 29,06
2	15,72 / 28,42	18,17 / 29,06	18,16 / 29,06
3	15,72 / 28,42	18,16 / 29,06	18,17 / 29,06
4	18,16 / 29,06	15,72 / 28,42	18,17 / 29,06
5	18,16 / 29,06	18,17 / 29,06	15,72 / 28,42
6	18,17 / 29,06	18,16 / 29,06	15,72 / 28,42

Покажем все возможные решения для двух моделей затухания L сигнала-помехи ITU-R P.525 и ITU-R P.1238. Они приведены в таблице 2.

Хорошо видно, что вариационный ряд решений строить не нужно ввиду того, что все они идентичны. При этом можно отметить, что:

- выбор наилучшего решения невозможен;
- значения ОСШ для вершин, работающих на ISM канале № 6 (2437 МГц), ниже примерно на 2,4 дБ (для ITU-R P.525) и на 1,6 дБ (для ITU-R P.1238) ввиду его центрального размещения в полосе спектра и большей подверженности межканальным помехам;
- для модели затухания ITU-R P.525 при размере сетки, равной 100, данные решения соответствуют минимальному ОСШ, равному 15,72 дБ, и среднему ОСШ – 17,35 дБ;
- в выбранных условиях, для модели затухания ITU-R P.1238 при размере сетки, равной 100, данные решения соответствуют минимальному ОСШ,

Отметим, что график для модели ITU-R P.525 является бесконечно убывающим, и при этом горизонтальная асимптота отсутствует. В таблице 1 приведены результаты расчетов для трехканальных решений с экстраполяцией на $D \rightarrow \infty$ для двух моделей затухания помех.

Отметим, что для каждой строки таблицы, т. е. для каждого обсчитываемого случая все возможные решения эквивалентны. Среднеквадратичное отклонение (СКО) для $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle$ при этом равно нулю для всех достаточно больших D .

равному 28,84 дБ, и среднему ОСШ – 28,42 дБ; видно, что решение при больших D имеет явно выраженный предел.

Расчеты для малого числа каналов. Случай $M = 4$

Теперь рассмотрим случай частотных конфигураций с четырьмя каналами. Целевое ОСШ здесь также примем равным 30 дБ (при уровне приема равном –60 дБм и шумовом пороге равном –90 дБм). Отклонения в меньшую сторону от значения ОСШ 30 дБ будут определяться частотной конфигурацией и геометрией решения.

«Замоещение» для $M = 4, N = 4$ и для $M = 4, N = 6$ приведены на рисунке 4.

Будем указывать номера каналов согласно стандарту [1]. Среди рассматриваемых частотных планов для $M = 4$ рассмотрим следующие:

- 2,4 ГГц с четырьмя каналами HE20: 1, 4, 8, 11;
- 2,4 ГГц с четырьмя каналами HE20: 1, 5, 9, 13;
- 5 ГГц с четырьмя агрегированными каналами HE40: 36+40, 44+48, 52+56, 60+64.

Данные три частотных плана рассмотрим для двух моделей затухания помех.

Матрица-вектор F для $M = 4$ для случая частотного плана с каналами 1, 5, 9 и 13 будет соответственно иметь вид:

$$F = (2412 \quad 2432 \quad 2452 \quad 2472).$$

Аналогично F для частотного плана с каналами 1, 4, 8 и 11:

$$F = (2412 \quad 2427 \quad 2447 \quad 2462).$$

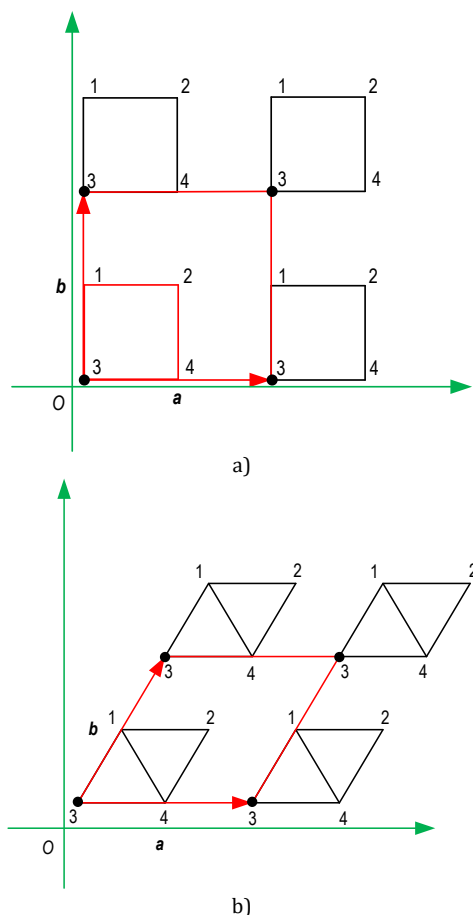


Рис. 4. Трансляционная симметрия и мотивная единица для случаев: а) $M = 4, N = 6$; б) $M = 4, N = 4$

Fig. 4. Translation Symmetry and Cell Unit for $M = 4, N = 6$ (a) and $M = 4, N = 4$ (b)

F для частотного плана с каналами 36+40, 44+48, 52+56 и 60+64:

$$F = (5190 \ 5230 \ 5270 \ 5310).$$

Последний частотный план диапазона 5 ГГц для удобства условно обозначим как «5 GHz».

Соответствующие указанным частотным планам матрицы H строятся аналогично случаю с тремя каналами. Здесь их приводить не будем из соображений наглядности, ввиду их большого размера (4×24).

По итогам расчета выполним поиск решения для бесконечной плоскости.

Для модели с прямой видимостью (ITU-R P.525), ввиду заметно более слабой зависимости величины затухания сигнала от расстояния, при аппроксимации горизонтальную асимптоту найти не удастся. В результате расчетов была выполнена аппроксимация зависимости $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle(D)$ для нахождения предела функции при $D \rightarrow \infty$ в случае ITU-R P.1238. Соответствующие графики для $M = 4$ приведены на рисунке 5.

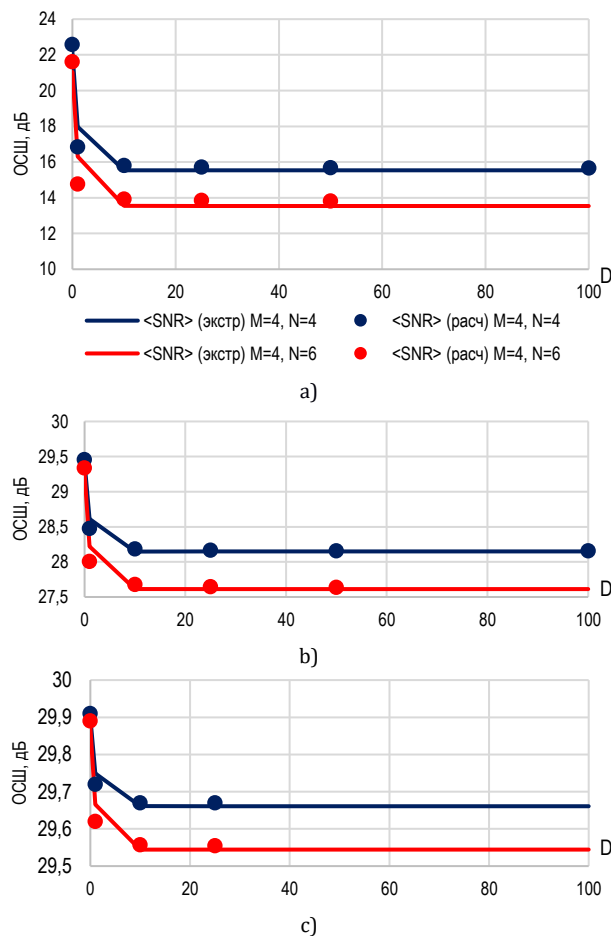


Рис. 5. Аппроксимация $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_\infty$ для двух «замощений» и частотных планов: а) 1, 4, 8, 11; б) 1, 5, 9, 13; в) 5G

Fig. 5. Approximation of $\langle \text{SNR}_{n,m} \rangle_\infty$ for Two Tessellations with Channel Plans: a) 1, 4, 8, 11; b) 1, 5, 9, 13; c) 5G

Особо отметим, что все решения, приведенные на графиках 5b и 5c, равноценны.

В таблице 3 приведены результаты расчетов для четырехканальных решений с экстраполяцией на $D \rightarrow \infty$ с моделями затухания L согласно ITU-R P.525 и ITU-R P.1238. Из данных расчетов видно, что с увеличением D снижается СКО расчетных значений, т.е. растет точность вычислений предложенным методом. Можно сделать выводы, аналогичные таблице 1.

Интересно отметить, что по сравнению с частотным планом 1, 5, 9, 13, где все решения эквивалентны, в частотном плане 1, 4, 8, 11 есть группа наилучших решений. Это связано с неравномерным расположением каналов в спектре друг относительно друга. Так, центральные частоты каналов 1 и 4, а также 8 и 11 попарно расположены ближе друг к другу (на 5 МГц) по сравнению с парой каналов 4 и 8. На рисунке 6 приведены примеры лучших (одной из 8) и худших (одной из 24, в скобках) конфигураций. При этом числа при вершинах соответствуют номерам частотных каналов.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчетов для $M = 4$, $Q = 0,1$ и модели затухания ITU-R P.525/ITU-R P.1238TABLE 3. Calculated Solutions for $M = 4$, $Q = 0,1$ for ITU-R P.525 / ITU-R P.1238 Attenuation Model

M	N	D	Частотный план	$\langle \text{SNR} \rangle$, дБ	Min(SNR), дБ	СКО $\langle \text{SNR} \rangle$, дБ
4	4	0	1, 5, 9, 13	24,42 / 29,46	22,88 / 29,19	0,587 / 0,142
		1		19,38 / 28,48	17,88 / 27,94	0,248 / 0,156
		10		16,20 / 28,19	14,75 / 27,60	0,111 / 0,142
		25		15,30 / 28,17	13,85 / 27,57	0,090 / 0,141
		50		14,71 / 28,16	13,26 / 27,56	0,079 / 0,141
		100		14,19 / 28,16	12,74 / 27,56	0,071 / 0,141
		∞		- / 28,15	- / 27,55	- / -
4	4	0	1, 4, 8, 11	- / 22,58	- / 22,45	- / 1,887
		1		< 3 / 16,84	< 3 / 16,72	- / 0,895
		10		- / 15,80	- / 15,68	- / 0,714
		25		- / 15,71	- / 15,60	- / 0,702
		50		- / 15,69	- / 15,57	- / 0,698
		100		- / 15,67	- / 15,55	- / 0,696
		∞		- / 15,53	- / 15,42	- / -
4	4	0	5G	28,00 / 29,91	27,26 / 29,86	0,286 / 0,025
		1		24,84 / 29,72	23,73 / 29,62	0,178 / 0,033
		10		22,27 / 29,67	21,04 / 29,55	0,091 / 0,032
		25		21,48 / 29,67	20,22 / 29,54	0,076 / 0,032
		50		20,95 / -	19,68 / -	0,068 / -
		100		20,49 / -	19,20 / -	0,061 / -
		∞		- / 29,66	- / 29,53	- / -
4	6	0	1, 5, 9, 13	24,02 / 29,34	21,90 / 28,86	0,467 / 0,108
		1		18,60 / 28,01	17,28 / 27,49	0,029 / 0,007
		10		15,50 / 27,68	14,12 / 27,10	0 / 0
		25		14,61 / 27,65	13,22 / 27,06	0 / 0
		50		14,03 / 27,64	12,64 / 27,06	0 / 0
		100		13,51 / -	12,12 / -	0 / -
		∞		- / 27,61	- / 27,03	- / -
4	6	0	1, 4, 8, 11	- / 21,61	- / 18,71	- / 1,420
		1		< 3 / 14,77	< 3 / 14,64	- / 0,030
		10		- / 13,92	- / 13,81	- / 0
		25		- / 13,85	- / 13,74	- / 0
		50		- / 13,82	- / 13,72	- / 0
		∞		- / 13,54	- / 13,60	- / -
4	6	0	5G	27,78 / 29,89	26,67 / 29,80	0,229 / 0,019
		1		24,26 / 29,62	23,24 / 29,51	0,022 / 0
		10		21,66 / 29,55	20,47 / 29,42	0 / 0
		25		20,87 / 29,55	19,64 / 29,41	0 / 0
		50		20,34 / 29,55	19,10 / 29,41	0 / 0
		100		19,87 / -	18,61 / -	0 / -
		∞		- / 29,54	- / 29,40	- / -

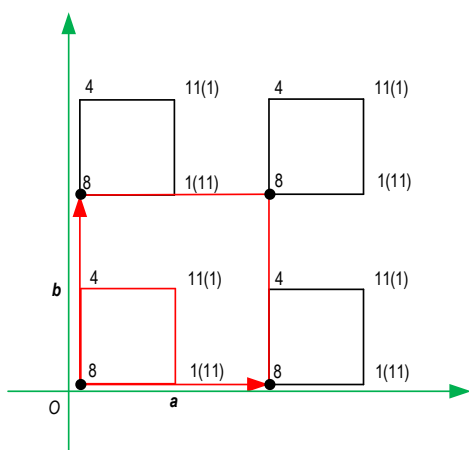


Рис. 6. Примеры лучших (худших) конфигураций для плана 1, 4, 8, 11 при $N = 4$

Fig. 6. Best (Worst) Channel Configurations Examples for $N=4$ with Channel Plan 1, 4, 8, 11

Промежуточные выводы и перспективы дальнейших исследований

Во-первых, на основе модели межканальных помех в регулярных структурах предложен метод частотно-территориального планирования сети IEEE 802.11, позволяющий выделить наилучшую с точки зрения ОСИ частотную конфигурацию и, как следствие, достаточно точно количественно оценить возможности выбранного частотного плана.

Во-вторых, выполнены расчеты для трех- и четырехканальных частотных планов с целью проверки возможности выбора наилучшей конфигурации для заданных мотивных единиц в структуре «замощения» плоскости. Получены оценки значений отношения сигнал/шум в ряде применимых на практике сценариев.

В-третьих, расчеты для трех и четырех каналов дают ожидаемый результат отсутствия наилучшего решения, кроме частотного плана 1, 4, 8, 11 при координационном числе структуры $N = 4$. Все возможные плоские решения для прочих случаев ожидаемо равноценны, что подтверждает работоспособность выбранной модели и метода и позволяет применять предложенный подход для поиска наилучших решений в более сложных случаях при большем числе каналов в частотном кластере.

В-четвертых, в случаях, где возможно определить наилучшую частотную конфигурацию, решение (группа решений) не зависит от модели затухания сигнала.

В-пятых, расчеты приведены для относительно невысокой вероятности занятости канала ($Q = 0,1$), однако в дальнейшей работе будет показано влияние значения Q на параметры решения.

В развитие данной работы будет выполнен расчет и анализ частотных планов с большим числом возможных каналов.

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. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
4. Дунайцев Р.А., Короткин К.Ф. Радиообследование и радиопланирование беспроводных локальных сетей Wi-Fi // VI-я Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2017, Санкт-Петербург, Россия, 01–02 марта 2017 г.): сборник статей. СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 270–274.
5. Динь Ч.З., Киричек Р.В., Кучерявый А.Е., Маколкина М.А. Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений дополненной реальности на базе беспроводной сенсорной сети // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 76–87. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-76-87
6. 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.
7. Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов // Электросвязь. 2021. № 4. С. 55–62. DOI:10.34832/ELSV.2021.17.4.007
8. 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.
9. Греков Ф.Ф., Рябенко Г.Б., Смирнов Ю.П. Кристаллохимия. Структурная кристаллография. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. 106 с.
10. Федорцов С.П., Цыбаков Б.С. Распределение каналов в сотовой сети // Проблемы передачи информации. 1996. Т. 32. № 1. С. 91–99.

11. Викулов А.С. Эффективное частотно-территориальное планирование сетей IEEE 802.11 как задача «замоещения» 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
12. Рекомендация МСЭ-R P.525-2 (1994) Расчет ослабления в свободном пространстве. (1978-1982-1994).
13. 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.
14. Рекомендация МСЭ-R P.676-6 (2005) Затухание в атмосферных газах.
15. Рекомендация МСЭ-R P.530-12 (2007) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости.
16. Рекомендация МСЭ-R P.833-9 (2016) Ослабление сигналов растительностью.

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. 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.)
4. Dunaytsev R., Korotkin K. Wi-Fi Site Surveys, Planning and Design. *Proceedings of the VIth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 1–2 March 2017, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2017. p.270–274. (in Russ.)
5. Dinh T.D., Kirichek R., Koucheryavy A., Makolkina M. Experimental Investigation of the Transmission of Multimedia Content for Augmented Reality Applications on the Basis of a Wireless Sensor Network. *Proc. of Telecom. Universities*. 2019;5(2):76–87. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-76-87
6. 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.)
7. Tonkikh E.V., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Modeling the Network Structure of the IoT Using Fractals. *Electrosvyaz*. 2021;4:55–62. DOI:10.34832/ELSV.2021.17.4.007
8. 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.)
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. Fedortsev S.P., Tsybakov B.S. Channel Assignment in Cellular Networks. *Probl. Peredachi Inf.* 1996;32(1):78–85. (in Russ.)
11. 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
12. Rec. ITU-R P.525-2 *Calculation of free-space attenuation*. 1994.
13. 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.
14. Rec. ITU-R P.676-6 *Attenuation by atmospheric gases*. 2005.
15. Rec. ITU-R P.530-12 *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. 2007.
16. Rec. ITU-R P.833-9 *Attenuation in vegetation*. 2016.


Статья поступила в редакцию 23.06.2022; одобрена после рецензирования 02.09.2022; принята к публикации 05.09.2022.

The article was submitted 23.06.2022; approved after reviewing 02.09.2022; accepted for publication 05.09.2022.

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>