

## МЕТОДЫ ЧАСТОТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ И ВЕЩАНИЯ

### 4.1. Принципы частотного планирования сетей радиосвязи и радиовещания

Частотное планирование сетей радиосвязи и вещания является необходимым инструментом решения вопросов выделения частотных каналов для бурно развивающихся сетей звукового (ЗВ) и телевизионного (ТВ) вещания, сотовых сетей подвижной связи и др. Только используя частотное планирование, можно достичь высокой эффективности использования полос частот, выделенных для развития этих сетей.

На ранних этапах развития радиотехники планирование частот вводимым радиосредствам проводилось лишь с целью минимизации помех, т.е. уровни потенциальных помех были первой целевой функцией. Однако это приводило к большим расходам частотного ресурса. За последние годы рост пригодного для использования частотного ресурса резко замедлился, а спрос на него продолжает возрастать по экспоненте [1]. Это привело к необходимости рассматривать в качестве целевой функции частотный ресурс, экономное расходование которого с учетом требования обеспечения ЭМС радиосредств стало первостепенной задачей. При решении этой задачи было предложено использовать весьма близкую связь между задачами присвоения частот и раскраски графов. К числу очевидных преимуществ, обусловленных этой связью, относится возможность применения хорошо известных алгоритмов раскраски графов для решения задач присвоения частот.

Присвоение частот рассматривается как функция, которая каждому передатчику, принадлежащему некоторому множеству, приписывает рабочую частоту из некоторого множества имеющихся частот. В типичной задаче присвоения частот отыскивается частотное присвоение, которое удовлетворяет определенным ограничениям и минимизирует участок спектра, используемый этим присвоением.

Обычно рассматривают два вида ограничений: частотно-пространственные, когда передатчики могут быть разнесены в пространстве и по частоте, и частотные, когда передатчики расположены на одном объекте. Второй тип ограничений на помехи налагает запрет на некоторые комбинации присвоения для данной пары передатчиков. Такие ограничения определяют лишь частотный разнос для уменьшения уровней помех.

При минимизации участка спектра, используемого частотными присвоениями, также различают два вида задач [1].

Любое присвоение частот должно экономно расходовать спектр. Как правило, это означает, что ширина выделяемой для заданной совокупности передатчиков полосы спектра должна быть минимальной. (Ширина полосы присвоения определяется как разность между наивысшей и наименьшей частотами, присвоенными передатчикам из заданной совокупности.) Задача присвоения, в которой ищется минимальная ширина полосы присвоенных частот, называется *задачей с минимальной шириной полосы частот*.

Может ли присвоение с минимальной полосой частот полностью использовать выделенный участок спектра? Утвердительный ответ получается для задач присвоения канала, в которых ограничения на помехи отличны от ограничений на помехи по совмещенному каналу. Иными словами, в таких задачах для обеспечения минимальной ширины полосы передатчикам, как правило, присваивается больше частот, чем в любом другом присвоении, которое может быть, а может и не быть присвоением с минимальной шириной полосы. Вообще говоря, для многих обычных задач присвоения частот невозможно отыскать присвоение с минимальной шириной полосы, которое действительно использует минимальное число требуемых частот. Это потенциально полезное явление делает важным формулировку нового типа задачи присвоения. Число частот, реально используемое присвоением, будем называть *порядком* присвоения, а задачу присвоения, в которой отыскивается минимальная ширина полосы присвоения и дополнительно минимизируется ее порядок, *задачей присвоения минимального порядка*.

Построение передающих сетей, позволяющих организовать обслуживание населения многопрограммным телевизионным, звуковым вещанием и мобильной радиосвязью при определенных параметрах сети, сводится к частотно-пространственному распределению станций на заданной территории. Решить эту задачу в общем виде позволяют идеализированные сети, в основу построения которых заложены два принципа: геометрически правильная (равномерная) сетка и линейная схема распределения каналов (частот). Для реализации этих принципов вводят следующие ограничения: все станции сети имеют одинаковые эффективные излучаемые мощности, эффективные высоты передающих и приемных антенн, поляризацию, условия распространения радиоволн и круговую диаграмму направленности передающих антенн [2].

Станции идеализированной сети располагают в вершинах одинаковых равносторонних треугольников, называемых *элементарными* (рис. 4.1). Радиусы зон обслуживания  $R_3$  одинаковы и в оптимальном случае пересекаются в одной точке — центре треугольника. При этом осуществляется сплошное покрытие территории вещанием с минимальным перекрытием зон вещания каждой станции, составляющим примерно 21% площади треугольника (на рис. 4.1 заштрихованы).

Расстояние между соседними станциями  $R_0$  связано с радиусом полезной зоны обслуживания  $R_3$  соотношением

$$R_0 = \sqrt{3}R_3. \quad (4.1)$$

Как правило, помехи в совмещенном канале являются наиболее сильными из всех видов помех, и поэтому пространственный разнос между станциями, работающими в совмещенном канале, максимален. Расположив эти станции в вершинах равностороннего треугольника, называемого *треугольником совмещенного канала*, и совместив его вершины с вершинами элементарных треугольников, называемых *узлами*, из двух смежных треугольников совмещенного канала получают *ромб совмещенного канала* (рис. 4.2) с вершинами в узлах 0. Внутри ромба в узлах располагают станции, имеющие другие номера каналов, причем нет двух станций с одинаковыми номерами. Идеализированная сеть содержит примыкающие друг к другу ромбы совмещенного канала с одинаковым распределением каналов внутри него, т.е. сеть однородна. Это позволяет ограничиться анализом одного ромба. При расстоянии  $D$  между станциями, работающими в совмещенном канале, необходимое для создания идеализированной сети вещания минимальное число частотных каналов

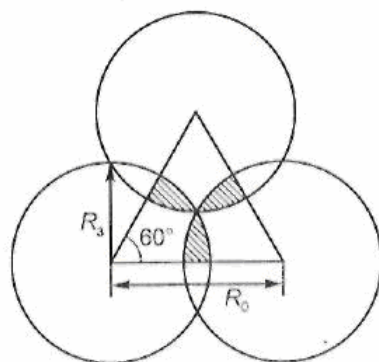


Рис. 4.1. Пример регулярной сети

$$N = 1 + \text{int} \left[ (D/R_s)^2 / 3 \right], \quad (4.2)$$

где  $\text{int}[X]$  — целая часть числа  $X$ . Для исследования идеализированной сети используют координатную систему  $x, y$ , угол между осями в которой составляет  $60^\circ$ . Расстояние от начала координат до любой точки плоскости в этой системе

$$d = \sqrt{x^2 + xy + y^2}.$$

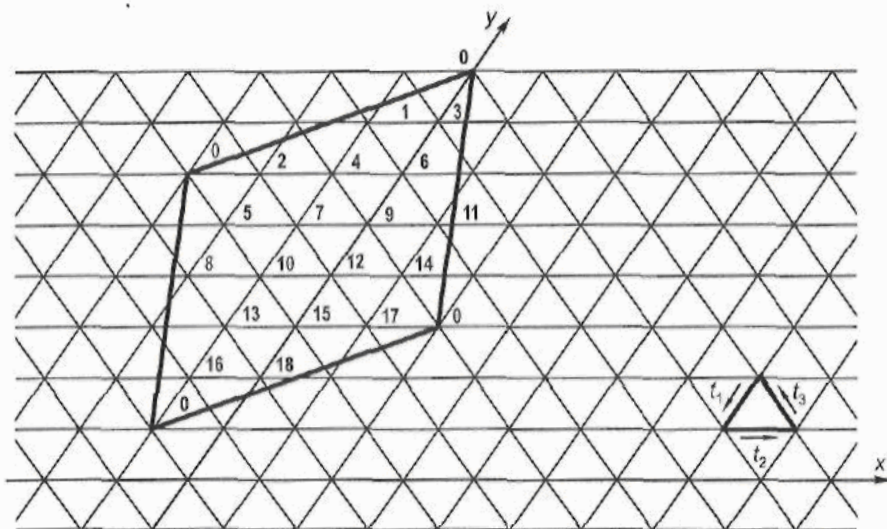


Рис. 4.2. Распределение каналов методом триад для  $N = 19$

Из условия однородности сети вытекает, что, поскольку каждая сторона ромба совмещенного канала принадлежит двум смежным ромбам, узлы элементарной сетки, лежащие на этой стороне, могут принадлежать только совмещенному каналу, что ограничивает число узлов до двух, т.е. сторона ромба не может быть совмещена с осями координат  $x, y$ . Если за размерность в этой системе координат принять расстояние между узлами, то можно найти два целых числа  $a$  и  $b$  соответственно по осям  $x$  и  $y$ , которые не имеют общего делителя и удовлетворяют равенству  $a^2 + ab + b^2 = N$ , где  $N$  — число каналов, принадлежащих одному ромбу совмещенного канала;  $N$  называют также *ромбическим числом*. Расстояние между совмещенными каналами в таком ромбе равно  $\sqrt{N}$ . В табл. 4.1 приведены значения  $a$  и  $b$  и соответствующие этим значениям ромбические числа.

Таблица 4.1. Ромбические числа

$a \backslash b$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	7	13	21	31	43	57	73	91	111	133	157
2			19		39		67		103		147	
3				37	49		79	97		139	163	
4					61		93		133		181	
5						91	109	129	151		201	229
6							127				223	

После определения геометрии идеализированной сети надо перейти к распределению  $N$  каналов внутри ромба, необходимых для полного охвата территории при минимальной помехе. При этом каждый ромб совмещенных каналов является лишь элементом общей идеализированной сети, покрывающей рассматриваемую территорию, и, следовательно, результат распределения каналов внутри такого ромба в силу однородности структуры сети будет периодически повторяться во всех остальных ромбах.

Условие однородной сети предполагает также, что в каждом узле будет присутствовать одинаковая комбинация помех от всех передатчиков, и, таким образом, достаточно рассмотреть всего три узла, образующих элементарный треугольник.

Одним из методов частотного планирования в однородных сетях регулярной структуры является метод триад. Триада — группа из трех целых положительных чисел  $t_1, t_2, t_3$ , сумма которых равна числу распределяемых каналов (в пределах ромба совмещенных каналов), т.е.

$$t_1 + t_2 + t_3 = N.$$

Число триады представляет собой разность номеров каналов, присваиваемых передатчикам, расположенным в вершинах элементарных треугольников (см. рис. 4.2).

Номера частотных каналов всех передатчиков, расположенных по оси  $y$  или по прямой, параллельной ей, отличаются друг от друга на  $t_1$  (при отсчете сверху вниз). Номера частотных каналов передатчиков, расположенных по оси  $x$  или по прямой, параллельной ей, отличаются друг от друга на  $t_2$ . Номера отсчитываются по модулю  $N$ . Номер канала, расположенного в начале координат, равен 0. При выборе триад нужно руководствоваться следующим:

- используются только триады, которые содержат разные числа, а не их перестановки;
- не должны использоваться триады, все числа которых имеют общий делитель с числом каналов  $N$ .

Присвоим номер канала 0 узлам сети, соответствующим узлам ромба совмещенных каналов, тогда расстояние между остальными узлами будут 0, 1, 2, ...,  $N-1$ . Из этого ряда необходимо исключить значения интервалов, которые по своим защитным отношениям не могут располагаться в соседних узлах сети, т.е. в соседних зонах обслуживания. Кроме номера 0, к таким значениям, как правило, относят смежные каналы, расположенные на интервале  $\pm 1$ , зеркальные каналы на интервале  $\pm 2f_{\text{пр}}$ , каналы, совпадающие с частотами гетеродинов приемников  $f_{\text{гет}}$ . Из оставшегося ряда выбирают значения интервалов  $t_1, t_2$  и  $t_3$ , расположенных в строго определенном направлении обхода элементарного треугольника, как это показано на рис. 4.2.

После того как выбраны триады, для каждой из них строят параллелограмм совмещенных каналов. Выбирают ту триаду, при которой может быть получен ромб совмещенных каналов (или параллелограмм, наиболее близкий к ромбу). Этим обеспечивается наиболее равномерное распределение совмещенных каналов по всей территории. Определив территориальное расположение передатчиков, работающих в совмещенных каналах, непосредственно по сетке определяют координаты остальных передатчиков, расположенных в вершинах элементарных треугольников, заполняющих площадь параллелограмма.

На рис. 4.2 приведен пример распределения каналов методом триад для  $N=19$  и для триады:  $t_1=3, t_2=2, t_3=14$ . Для этой триады параллелограмм совмещенных каналов является ромбом.

Число каналов, необходимое для организации сети, из-за дополнительных ограничений, накладываемых частотной несовместимостью между различными сочетаниями каналов, возрастает по сравнению с минимальным.

Таким образом, при построении идеализированной сети учтены помехи от совмещенного канала и исключены те из них, которые могут возникнуть в соседних зонах. Однако не-

обходимо учитывать влияние последних помех и их защитные отношения. Для этого после выбора шагов сетки частот определяют расстояния между смежными каналами порядка  $n \pm 1$  и соседними более высокими порядков  $n \pm 2$ ,  $n \pm 3$  и т.д. [2].

После оптимизации и обеспечения полного охвата территории при минимальном числе каналов одной программой можно построить многопрограммную сеть. Число каналов, необходимое для охвата  $m$  программами, составляет  $N = Nm$ . Строить ее можно двумя способами.

Первый способ — циклический — предполагает использование  $m$  блоков из  $N$  каналов, что избавляет от необходимости анализировать каждый блок в отдельности, поскольку помеховая ситуация в каждом блоке одинакова. Однако при составлении блоков необходимо учитывать возможность совмещения нескольких каналов в одном пункте, т.е. учитывать помехи от гетеродина приемника и по зеркальному каналу, а также технические возможности обеспечения развязки между излучениями станций, работающих на одном передающем центре. Второй способ — рассмотрение  $Nm$  каналов как единое целое, т.е. как одну сетку. При этом в каждом пункте группируют вместе  $m$  присвоенных, выбирающихся из узлов сетки, расположенных в непосредственной близости друг к другу.

Оба способа имеют свои достоинства и недостатки. При первом способе помеховая обстановка и, следовательно, зоны обслуживания каждой программой будут одинаковы, но он более консервативен по числу передаваемых программ. Второй способ более гибок и позволяет организовать разное число программ в каждом пункте, но помеховая обстановка и зоны обслуживания по каждой программе могут быть различны. Если планируют новую сеть без учета действующей или в новом диапазоне с жесткой программой, применяют первый способ, если же планируют развитие сети с учетом действующей или с разным числом программ в каждом пункте — второй.

Из рис. 4.1 следует, что в регулярной однородной сети зоны обслуживания трех соседних передающих станций пересекаются в одной точке. Соединив точки пересечения, можно получить зоны обслуживания передающих станций в виде шестиугольника (рис. 4.3), называемого *сотой*. Такая структура сети используется в сотовых системах связи [3]. При частотно-территориальном планировании составляют кластер. *Кластер* — это совокупность ближайших сот, в которых используются неповторяющиеся частотные каналы. Число таких сот в кластере называется его *размерностью*.

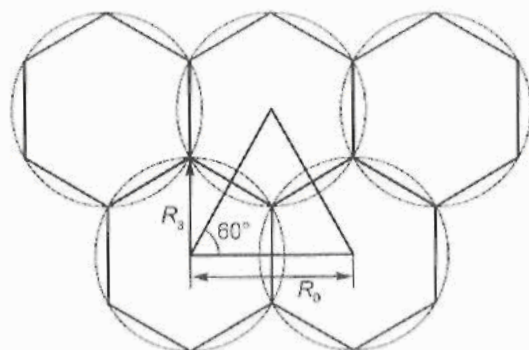


Рис. 4.3. Пример регулярной сотовой сети

Если сравнить однородную сеть регулярной структуры, принятой для планирования в сетях телевизионного и звукового вещания [2] (рис. 4.2), и сеть сотовой структуры (рис. 4.3), то понятие кластера в последней соответствует ромбу совмещенных каналов. При

этом размерность кластера должна соответствовать ромбическим числам, приведенным в табл. 4.1. Однако в действующих сетях сотовой связи используют размерности кластеров 3, 4, 7, 9, 12, т.е. кластеры размерностью 4, 9, 12 не являются ромбическими числами, получаемыми в регулярной однородной сети [2]. Это противоречие устраняется, если использовать универсальную модель регулярной сети [4, 5].

**Универсальная модель однородной сети.** В качестве модели принимаем однородную сеть регулярной структуры, в которой каждая передающая станция находится в равных условиях по расположению и уровню помех. Плоское обслуживание территории обеспечивается при мозаичном покрытии, когда за зону обслуживания передающей станции принимается равносторонний шестиугольник с центром в точке ее расположения. Поскольку реальная зона обслуживания передающей станции в рассматриваемых условиях является кругом, то использование в модели зоны шестиугольника обеспечивает минимальное перекрытие зон соседних передающих станций 18% (в отличие от квадрата и треугольника, ср. рис. 4.1 и 4.3).

В рассматриваемой сети расстояние между всеми соседними станциями одинаково — обозначим его через  $R_0$  и назовем модулем сети. Если за зону вещания передающей станции принять круг, в который вписан шестиугольник, то ее радиус  $R_3$  связан с модулем сети  $R_0$  соотношением

$$R_3 = R_0 / \sqrt{3}. \quad (4.3)$$

При синтезе модели однородной сети радиовещания необходимо определить расположение передатчиков, работающих в совмещенных каналах, для чего предлагается использовать универсальную модель однородной сети (рис. 4.4). В этой модели передающие станции, помещенные в центры шестиугольников с одинаковыми номерами, образуют ромб совмещенных каналов. Поскольку расстояние между передатчиками, работающими в совмещенных каналах, одинаково, его нетрудно определить из геометрии сети. Рассмотрим, как нумеруются шестиугольники в сети (рис. 4.4, а).

Если передатчики, работающие в совмещенных каналах, размещены в центрах шестиугольников под номерами 1 (рис. 4.4, б), то расстояние между ними равно модулю сети  $D = R_0$ , или в относительных модулях сети

$$r_0 = D / R_0 = 1 \quad (4.4)$$

Расстояние между передатчиками, размещенными в центрах шестиугольников под номерами 2 (рис. 4.4, в), можно определить из треугольника  $ABC$  (рис. 4.5, а):

$$D = \sqrt{(AB)^2 - (BO)^2} + \sqrt{(BC)^2 - (BO)^2}. \quad (4.5)$$

Учитывая, что  $AB = BC = R_0$ ,  $BO = R_0/2$ , из (4.5) получим

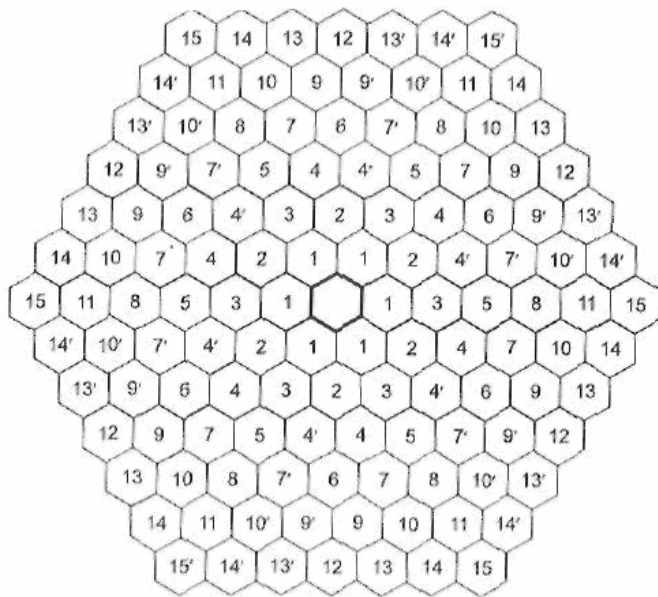
$$D = 2R_0\sqrt{3/4} = R_0\sqrt{3}. \quad (4.6)$$

Расстояние между передатчиками, размещенными в центрах шестиугольников под номерами 3, можно определить из рис. 4.4, а, очевидно, что

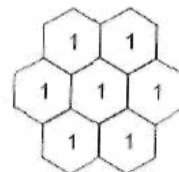
$$D = 2R_0. \quad (4.7)$$

Расстояние между передатчиками, размещенными в центрах шестиугольников под номерами 4, определим из рис. 4.5, б, из которого следует, что  $AB = 3R_0$ ,  $AC = 2R_0$ , тогда с учетом (4.3) можно записать

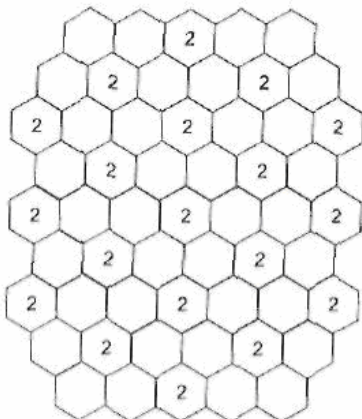
$$D = \sqrt{(AB)^2 + (AC)^2} = \sqrt{9R_0^2/3 + 4R_0^2} = R_0\sqrt{7}. \quad (4.8)$$



а)

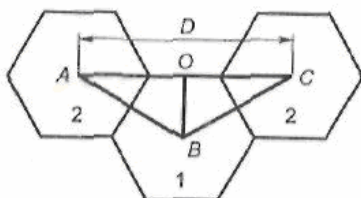


б)

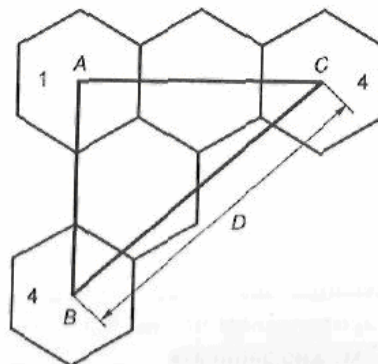


в)

**Рис. 4.4.** Определение расстояний до передатчиков, работающих в совмещенных каналах:  
 а — модель однородной сети;  
 б — размещение передатчиков при  $D = R_0$ ;  
 в — размещение передатчиков при  $D = \sqrt{3}R_0$



а)



б)

**Рис. 4.5.** Определение расстояний в универсальной модели однородной сети

Аналогичным образом определяются расстояния между передатчиками, работающими в совмещенных каналах для других сетей 4, 5, ..., 15 и т.д. (табл. 4.2). Штрихами 4', 7' и т.д. обозначены сети, которые имеют одинаковое расстояние  $D$  с сетями 4, 7 и т.д., но другое расположение передатчиков.

В центральный выделенный на рис. 4.4,  $\alpha$  элемент, согласно проведенным расчетам, необходимо помещать номер рассматриваемой сети из табл. 4.2.

**Таблица 4.2.** Номера сетей в универсальной модели однородной сети

№ сети	1	2	3	4, 4'	5	6	7, 7'	8	9	10, 10'	11	12
$D/R_0$	1	$\sqrt{3}$	2	$\sqrt{7}$	3	$\sqrt{12}$	$\sqrt{13}$	4	$\sqrt{19}$	$\sqrt{21}$	5	$\sqrt{27}$
$N$	1	3	4	7	9	12	13	16	19	21	25	27

Зная для различных сетей расстояния  $D$  между передатчиками, работающими в совмещенных каналах, определим число частотных каналов, необходимое для организации этих сетей. В однородной сети [2] для сплошного покрытия заданной территории однопрограммным радиовещанием необходимое число частотных каналов определяется соотношением

$$N = 1 + \text{int} \left[ \left( \frac{D}{R_0} \right)^2 / 3 \right]. \quad (4.9)$$

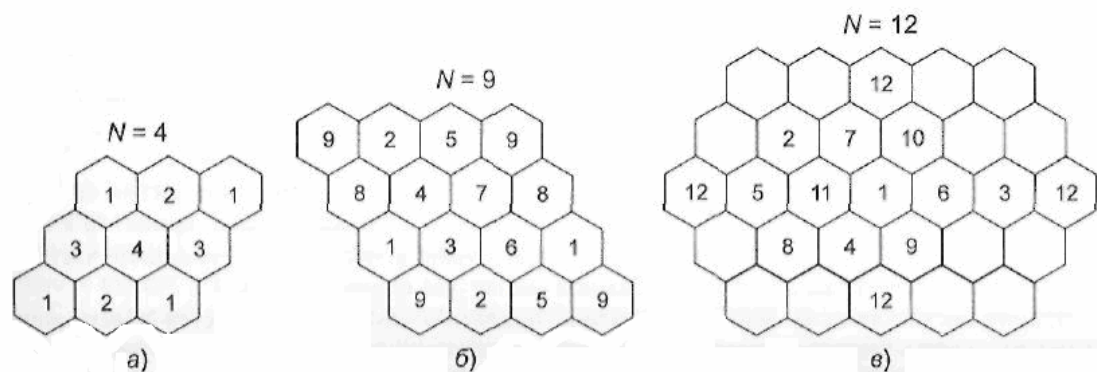
Используя соотношения (4.3), (4.4) и (4.9) и данные табл. 4.2, можно определить значение  $N$ , при котором передатчики, работающие в совмещенных каналах, размещаются в вершинах ромбов:

$$N = 1 + \text{int} \left[ \left( \frac{D}{R_0} \right)^2 \right] = r_0^2. \quad (4.10)$$

Таким образом, в предложенной универсальной модели однородной сети ее относительный модуль  $r_0$  однозначно определяет число необходимых частотных каналов. Подобные результаты получены в [2] другим способом.

Полученная в предложенной универсальной модели однородной сети взаимосвязь (4.10) между значениями  $N$  и  $r_0$  позволяет при заданном числе каналов синтезировать структуру однородной сети или же при заданной структуре сети определить необходимое число частотных каналов для обеспечения сплошного покрытия территории радиовещанием.

На рис. 4.6 приведены примеры распределения каналов для размерностей кластера  $N = 4, 9$  и  $12$ , полученные с использованием универсальной модели однородной сети.



**Рис. 4.6.** Распределение каналов при  $N = 4, 9$  и  $12$