

4.3. Методы частотного планирования сетей подвижной связи

При проектировании системы радиосвязи с подвижными объектами и, в частности, сотовых систем связи возникает необходимость в определении зоны обслуживания базовой станции (БС), в которой будет обеспечена связь с заданными качеством и надежностью, и минимально допустимого расстояния между БС сети связи, которые используют одни и те же частотные каналы и поэтому могут создавать друг другу помехи.

Для расчета зон обслуживания БС и минимально допустимого расстояния между БС в сети связи необходимо учитывать:

- мощности передатчиков БС и абонентских станций (АС);
- параметры антенно-фидерного тракта приемно-передающей аппаратуры (характеристики диаграммы направленности приемной антенны, ее действующая высота, потери в антенно-фидерном тракте и т.п.);
- уровень внешних и внутренних шумов на входе приемника и его чувствительность;
- статистические закономерности распространения радиоволн в условиях пересеченной местности и городской застройки;
- параметры радиоканала связи (характер местности, степень урбанизации и т.д.);
- электрические параметры применяемой аппаратуры (рабочая частота, тип модуляции, ширина полосы пропускания приемника и т.д.);
- системные параметры систем связи с подвижными объектами (ССПО) (наличие интермодуляционных помех, интенсивность телефонной нагрузки, характер повторного использования частоты и т.д.).

Рассмотренные параметры определяются стандартами ССПО, которые используются операторами систем подвижной связи в России. Кроме того, необходимо учитывать условия распространения радиоволн в городе и пригородах. В ССПО связь осуществляется между стационарной БС и подвижным абонентским терминалом, при этом параметры линии связи (или канала связи) непрерывно изменяются. Поэтому при описании поведения сигналов, распространяющихся в городских или пригородных условиях, пользуются статистическими методами.

При распространении радиоволн в городских условиях существует несколько явлений, вызывающих изменение сигнала в точке приема. Средний уровень сигнала главным образом обусловлен техническими характеристиками БС и АС, а также расстоянием между БС и АС. Расчет среднего уровня потерь осуществляется на основании эмпирической модели Окамура–Хата, которая представлена в Рекомендации МСЭ [3]. В этом случае местность

представляется как квазиплоская. Рельеф местности, а также здания, расположенные по прямой, соединяющей БС и АС, вызывают экранирование и дифракцию передаваемого БС сигнала. В результате происходят колебания сигнала относительно среднего уровня (медленные замирания), которые подчиняются логарифмически-нормальному закону распределения вероятности (или гауссовскому распределению в дБ). Наконец, неоднородности (здания, холмы и т.д.), находящиеся в окрестности точки приема, вызывают явление многолучевости, т.е. в точку приема, помимо прямой волны от БС, поступают также множество отраженных от неоднородностей волн. В результате происходят колебания сигнала (быстрые замирания) относительно уровня сигнала, подверженного медленным замираниям, которые подчиняются вероятностному закону распределения Релея.

Таким образом, уровень принимаемого АС сигнала определяется средним уровнем затухания, зависящим от расстояния и технических характеристик ССПО, который в свою очередь имеет разброс, определяемый медленными и быстрыми замираниями. Разброс зависит от требуемой вероятности приема сигнала БС в зоне обслуживания абонентов ССПО.

В данном разделе приведены метод расчета потерь распространения радиоволн и метод частотного планирования сетей сотовой подвижной связи.

4.3.1. Модель Окамура–Хата

Методики, основанные на широком применении эмпирических графиков (модели Окамуры и Рекомендации 370 и 529 МСЭ), достаточно неудобны для практического применения, особенно при автоматизации расчетов с использованием ПК. Поэтому М. Хата получил аналитическую модель предсказания потерь распространения сигналов как результат прямой аппроксимации кривых Окамуры.

Модель медианных потерь на трассах наземной подвижной связи Окамура–Хата зафиксирована в Рекомендациях и сообщениях МККР и положена в основу стандартной модели COST 321 Хата, рекомендуемой ETSI. Проведенные практические исследования показывают хорошие результаты совпадения практически измеренных значений уровней сигналов и рассчитанных с использованием модели Окамура–Хата.

Модель Окамура–Хата позволяет получать достаточно точные значения медианных потерь на трассах наземной подвижной связи при следующих ограничениях:

- частота сигнала $f = 100 \dots 1500$ МГц;
- дальность связи $R = 1 \dots 100$ км;
- высота подъема антенны БС $h_{\text{БС}} = 30 \dots 200$ м;
- высота подъема антенны АС $h_{\text{АС}} = 1 \dots 10$ м.

При этом в модели применяется достаточно удобная классификация типов местности:

- *крупные города*. Данная зона характеризуется наличием учреждений и промышленных предприятий, большим числом высотных построек и небоскребов. Движение автотранспорта крайне оживленное практически для любого времени суток;
- *небольшие и средние города*. Плотная населенная зона с большим числом учреждений, включающих отдельные высотные здания. Дорожное движение довольно интенсивное и зависит от времени суток;
- *пригород*. Большое число строений преимущественно дачного типа, а также подсобных сооружений (типа склада, хранилища, небольшого магазина). Умеренное движение автотранспорта;
- *сельская (открытая) местность*. Незастроенная земля (открытое пространство). Не возделанная или частично обработанная земля с небольшими далеко отстоящими группами строений.

В соответствии с этой моделью затухание сигнала, дБ, при распространении в городских районах

$$L = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_{\text{БС}} - a(h_{\text{АС}}) + (44,9 - 6,55 \lg h_{\text{БС}}) \lg R, \quad (4.21)$$

где f — рабочая частота, МГц; $h_{\text{БС}}$ — высота подъема антенны БС, м; $h_{\text{АС}}$ — высота подъема антенны АС, м; R — дальность связи, км; $a(h_{\text{АС}})$ — поправочный коэффициент, используемый при высоте антенны АС, отличной от эталонной, равной 1,5 м.

Выражения для $a(h_{\text{АС}})$ получаются различными для крупных и средних городов, а также (в случае крупных городов) для разных частотных диапазонов:

для города средних размеров

$$a(h_{\text{АС}}) = (1,1 \lg f - 0,7) h_{\text{АС}} - (1,56 \lg f - 0,8); \quad (4.22)$$

для крупного города

$$a(h_{\text{АС}}) = 3,2 (\lg 11,75 h_{\text{АС}})^2 - 4,97. \quad (4.23)$$

Потери при распространении в пригороде, дБ,

$$L_s = L - 2 \lg (f/28)^2 - 5,4, \quad (4.24)$$

на открытой (сельской) местности

$$L_o = L - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94, \quad (4.25)$$

где L — потери распространения в городских районах (4.21).

Размеры зоны покрытия базовой станции будут определяться дальностью связи между БС и АС, которая получается путем решения первого уравнения связи:

$$P_{\text{ПС}} = P_{\text{изл}} - L(R, h_{\text{БС}}, h_{\text{АС}}) - B_{\tau} - B_{\text{в}}, \quad (4.26)$$

где $P_{\text{ПС}}$ — уровень мощности ПС на входе приемной антенны, дБ/мВт; $P_{\text{изл}}$ — уровень эффективной изотропно излучаемой мощности передатчика, дБ/мВт; $L(R, h_{\text{БС}}, h_{\text{АС}})$ — затухание сигнала при распространении, дБ, определяемое по формулам (4.21)–(4.26); B_{τ} — дополнительные потери сигнала, дБ, при работе с портативной АС, $B_{\tau} = 3$ дБ; $B_{\text{в}}$ — дополнительные потери сигнала, дБ, при работе с портативной АС в здании или автомобиле (для автомобиля $B_{\text{в}} = 8$ дБ, для здания $B_{\text{в}} = 15$ дБ).

Уровень эффективной изотропно излучаемой мощности передатчика

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{прд}} - B_{\text{ф прд}} - B_{\text{д прд}} - B_{\text{к}} + G_{\text{прд}}, \quad (4.27)$$

где $P_{\text{прд}} = 10 \lg P'_{\text{прд}} + 30$ — уровень мощности передатчика, дБ/мВт; $P'_{\text{прд}}$ — мощность передатчика, Вт; $B_{\text{ф прд}} = \alpha_{\text{прд}} l_{\text{ф прд}}$ — потери в фидере антенны передатчика, дБ; $\alpha_{\text{прд}}$ — погонное затухание в фидере антенны передатчика, дБ/м; $l_{\text{ф прд}}$ — длина фидера антенны передатчика, м; $B_{\text{д прд}}$ — потери в дуплексере на передачу, дБ; $B_{\text{к}}$ — потери в комбайнере (устройстве сложения), дБ; $G_{\text{прд}}$ — коэффициент усиления антенны передатчика в направлении связи, дБ.

Основным условием обеспечения связи будет необходимость превышения уровня мощности ПС на входе приемной антенны минимально необходимого уровня мощности $P_{\text{ПС мин}}$, дБм, определяемого техническими характеристиками приемника:

$$P_{\text{ПС мин}} = P_{\text{прм}} + B_{\text{ф прм}} + B_{\text{д прм}} - K_{\text{МШУ}} - G_{\text{прм}}, \quad (4.28)$$

где $P_{\text{прм}} = 20 \lg P'_{\text{прм}} - 10 \lg R_{\text{прм}} - 90$ — чувствительность приемника, дБ/мВт; $P'_{\text{прм}}$ — чувствительность приемника, мкВ (в случае, если чувствительность приемника задается в дБм, то в качестве $P_{\text{прм}}$ используется именно это значение); $R_{\text{прм}}$ — входное сопротивление приемника, Ом; $B_{\text{ф прм}} = \alpha_{\text{прм}} l_{\text{ф прм}}$ — потери в фидере антенны приемника, дБ; $\alpha_{\text{прм}}$ — погонное затухание в фидере антенны приемника, дБ/м; $l_{\text{ф прм}}$ — длина фидера антенны приемника, м; $B_{\text{д прм}}$ — потери в дуплексном фильтре на прием, дБ; $K_{\text{МШУ}}$ — коэффициент усиления антенного тракта приема (МШУ), дБ; $G_{\text{прм}}$ — коэффициент усиления антенны приемника в направлении связи, дБ.

В системах подвижной связи уровень мощности сигнала на входе приемной антенны является случайной величиной, которая хорошо описывается логнормальным законом распределения. Для повышения вероятности обеспечения связи требуемого качества необходим дополнительный запас уровня мощности сигнала на входе приемной антенны $P_{\text{ПС доп}}$. Этот запас определяется статистическими параметрами сигнала на трассах подвижной связи, а именно стандартными отклонениями сигнала по месту (σ_d , дБ) и по времени (σ_t , дБ). При этом многочисленные экспериментальные исследования показали, что значение σ_d зависит в основном от степени неровности местности и диапазона частот, а σ_t — от дальности связи.

При распространении сигнала над холмистой поверхностью потери распространения увеличиваются по сравнению со случаем среднепересеченной местности. Для оценки степени неровности местности используют параметр Δh , м, который может быть определен по рис. 4.23 как разность между высотами $h(90\%)$ и $h(10\%)$ местности на трассе, превышаемые в 90% и 10% точек профиля соответственно. Параметр Δh позволяет ввести условную классификацию типов местности (табл. 4.16).



Рис. 4.23. Определение холмистости местности Δh

Таблица 4.16. Характеристика типов местности

Тип местности	Значение параметра Δh , м
Равнинная или водная поверхность	0...25
Равнинно-холмистая (среднепересеченная)	25...75
Холмистая (сильнопересеченная)	75...150
Гористая	150...400
Очень высокие горы, не менее	400

Экспериментальные исследования, проведенные для многих районов, показывают, что для расстояний свыше 10 км стандартное отклонение, дБ, для диапазона частот 300...3000 МГц можно определить по формуле

$$\sigma_d = 9,5 \lg(\Delta h/50) + 9. \quad (4.29)$$

На расстояниях меньше 10 км стандартное отклонение зависит от дальности связи R , км. Для практических вычислений эти данные в диапазоне 300...3000 МГц с высокой степенью точности аппроксимируются формулой

$$\sigma_d = 4,1 \lg(R) + 5. \quad (4.30)$$

Стандартное отклонение сигнала по времени σ_t зависит от дальности связи и для точек приема, расположенных на расстоянии менее 100 км от передатчиков,

$$\sigma_t = 6,5 [1 - \exp(-0,036R)]. \quad (4.31)$$

Обобщенное значение стандартного отклонения сигнала по месту и по времени

$$\sigma = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_t^2}. \quad (4.32)$$

Дополнительный запас уровня сигнала

$$P_{\text{ПС доп}} = k_{\text{тр}} \sigma, \quad (4.33)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент логнормального распределения, обеспечивающий требуемую надежность связи, определяется как аргумент нормальной функции распределения:

$$S(k_{\text{тр}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_{\text{тр}}} \exp(t^2/2) dt, \quad (4.34)$$

значение которой равно требуемой вероятности обеспечения связи и может быть найдено путем решения уравнения (4.34). Некоторые значения $k_{\text{тр}}$ и $S(k_{\text{тр}})$ приведены в табл. 4.17.

Таблица 4.17. Значения величин $k_{\text{тр}}$ и $S(k_{\text{тр}})$

$S(k_{\text{тр}})$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
$k_{\text{тр}}$	0	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	2,326

Таким образом, для того чтобы мощность сигнала на входе приемной антенны $P_{\text{ПС}}$, определяемая по (4.26), превышала минимальную мощность сигнала на входе приемной антенны $P_{\text{ПС мин}}$, определяемую по (4.28), исходя из чувствительности приемника, с заданной вероятностью, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$P_{\text{ПС}} \geq P_{\text{ПС мин}} + P_{\text{ПС доп}} \quad (4.35)$$

где $P_{\text{ПС доп}}$ определяется по (4.29)–(4.35) и табл. 4.17 для заданной вероятности S .

Исходя из вышеизложенного, методика прогноза зон покрытия БС для сетей подвижной связи будет следующей.

1. В соответствии с выражением (4.27) вычисляется уровень эффективной изотропно излучаемой мощности передатчика $P_{\text{изл}}$.

2. Определяется минимально необходимый уровень сигнала на входе приемной антенны $P_{\text{ПС мин}}$ по формуле (4.28).

3. Определяется величина дополнительного запаса уровня мощности сигнала $P_{\text{ПС доп}}$, обеспечивающего требуемую надежность связи.

4. Вычисляется требуемый уровень мощности сигнала на входе приемной антенны, обеспечивающей необходимую надежность связи:

$$P_{\text{ПС тр}} = P_{\text{ПС мин}} + P_{\text{ПС доп}} \quad (4.36)$$

5. Рассчитываются максимально допустимые потери при распространении сигнала на трассе:

$$L_{\text{доп}} = P_{\text{изл}} - P_{\text{ПС тр}} - B_{\text{т}} - B_{\text{э}}, \quad (4.37)$$

6. Определяется максимальная дальность связи путем решения уравнения

$$L(R) = L_{\text{доп}} \quad (4.38)$$

относительно R . При этом в качестве высоты антенны $h_{\text{БС}}$ выбирается эффективная высота антенны БС.

4.3.2. Частотное планирование сетей сотовой подвижной связи

Определение размерности кластера. Сотовые сети подвижной связи строят на основе частотно-территориальных планов. При этом обслуживаемую территорию разделяют на зоны обслуживания БС. Сама БС располагается в центре такой зоны. Если на БС используется ненаправленная антенна, то граница зоны обслуживания базовых станций есть окружность. В такой модели границы трех соседних зон пересекаются в одной точке. Соединив точки пересечения, получают границы зоны обслуживания БС в виде шестиугольника, называемого сотой. Во избежание взаимных помех соседние БС должны работать на разных частотах. При частотном планировании составляют кластер.

Число таких сот в кластере называется его размерностью. Как следует из разд. 4.1, понятия размерности кластера, принятое в сотовых системах подвижной связи, совпадает с понятием ромбического числа, принятого в сетях ТВ и ЗВ радиовещания. Поэтому размерность кластера можно определять по табл. 4.2 ромбических чисел, полученных на основе метода координационных колец.

Размерность кластера $N = 7$ удобна при шестиугольной соте. Действительно, возможны разные частоты в одной центральной и шести пограничных сотах (рис. 4.24). Все частотные каналы системы делят между БС кластера. Каждой БС присваивается группа каналов. Так, если в подвижной системе используется всего $N_f = 119$ частотных каналов и кластер размерностью 7, то группа частотных каналов, приходящихся на одну соту, содержит число частот

$$N_{fc} = \frac{N_f}{N} = \frac{119}{7} = 17.$$

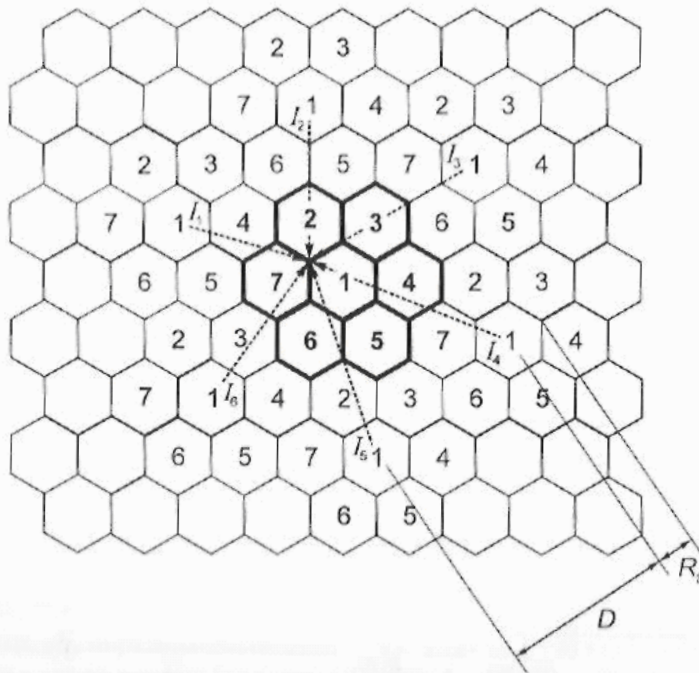


Рис. 4.24. Модель повторного использования частот при размерности кластера $N = 7$

Частотно-территориальный план составляют так, чтобы уровень интерференционных помех не превышал допустимых значений для заданного стандарта, что позволяет многократно повторять кластер и реализовать достоинства сотовых систем.

Основное достоинство любых сотовых систем — эффективное использование выделенной полосы частот за счет многократного повторения кластера на территории. Это позволяет обслуживать большое число абонентов при ограниченных ресурсах спектра частот.

На рис. 4.24 приведен фрагмент частотно-территориального плана для модели сети с использованием кластера размерностью $N=7$. Цифрами обозначен номер группы рабочих частот в соте. Жирными линиями выделен центральный кластер. Пунктиром показаны пути прихода интерференционных помех совмещенного канала на АС, находящуюся на границе соты 1.

Рассмотрим случай, когда на вход антенны АС поступают полезный сигнал и шесть мешающих сигналов (см. рис. 4.24). Мощность сигнала АС, принимаемого антенной,

$$P_{\text{ис}} = P_{\text{ис}} / L, \quad (4.39)$$

где $P_{\text{ис}}$ — излучаемая мощность передатчика; L — потери, которые при использовании модели Окамуры–Хата определяются по формуле (4.21) и могут быть записаны в виде

$$L(R, f) = 10^{-6,955} f^{-2,616} h_1^{1,382} R^{4,49-0,655 \lg(h_1)}. \quad (4.40)$$

Из (4.40) следует, что мощность сигнала, принимаемого антенной АС, обратно пропорциональна расстоянию до источника сигнала:

$$P_{\text{ис}} = \frac{P_{\text{ис}}}{CR^{-(4,49-0,655 \lg(h_1))}} = \frac{P_{\text{ис}}}{CR^{-x}}, \quad (4.41)$$

где $C = 10^{-6,955} f^{-2,616} h_1^{1,382}$; $x = 4,49 - 0,655 \lg(h_1)$.

Очевидно, что наименьшее отношение сигнал/помеха будет на границе сот. Из рис. 4.24 следует, что суммарная мощность мешающих сигналов

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6. \quad (4.42)$$

В соответствии с (4.41) и рис. 4.24 помехи от соответствующих базовых станций равны:

$$\begin{aligned} I_1 &= P_{\text{ис}} / C(D + R_3)^{-x}; \quad I_2 = P_{\text{ис}} / C\left(\sqrt{D^2 + DR_3 + R_3^2}\right)^{-x}; \\ I_3 &= P_{\text{ис}} / C\left(\sqrt{D^2 - DR_3 + R_3^2}\right)^{-x}; \quad I_4 = P_{\text{ис}} / C(D - R_3)^{-x}; \\ I_5 &= P_{\text{ис}} / C\left(\sqrt{D^2 - DR_3 + R_3^2}\right)^{-x}; \quad I_6 = P_{\text{ис}} / C\left(\sqrt{D^2 + DR_3 + R_3^2}\right)^{-x}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

где D — расстояние между БС, работающими в совмещенных каналах; R_3 — радиус зоны обслуживания БС.

Из (4.42) и (4.43) следует, что суммарная мощность помех для однородной и регулярной сети

$$I_{\Sigma} = P_{\text{ис}} \left[\frac{1}{C(D + R_3)^{-x}} + \frac{2}{C\left(\sqrt{D^2 + DR_3 + R_3^2}\right)^{-x}} + \frac{2}{C\left(\sqrt{D^2 - DR_3 + R_3^2}\right)^{-x}} + \frac{1}{C(D - R_3)^{-x}} \right]. \quad (4.44)$$

Тогда отношение сигнал/помеха

$$\frac{S}{I_{\Sigma}} = \frac{R_3^{-x}}{(D + R_3)^{-x} + 2\left(\sqrt{D^2 + DR_3 + R_3^2}\right)^{-x} + 2\left(\sqrt{D^2 - DR_3 + R_3^2}\right)^{-x} + (D - R_3)^{-x}}. \quad (4.45)$$

Учитывая, что коэффициент соканального повторения $q = D/R_s$, запишем (4.45) через значение этого параметра:

$$\frac{S}{I_{\Sigma}} = \frac{1}{(q+1)^{-x} + 2(\sqrt{q^2 + q + 1})^{-x} + 2(\sqrt{q^2 - q + 1})^{-x} + (q-1)^{-x}}. \quad (4.46)$$

Для того чтобы найти коэффициент соканального повторения q , необходимо решить уравнение (4.46) для отношения сигнал/помеха, определяемого стандартом сотовой подвижной связи. После определения параметра q по (4.46) можно определить необходимую размерность кластера для данного стандарта сотовой связи. Необходимо отметить, что размерность кластера определяется из универсальной модели однородной сети [4] и берется из ряда чисел

$$N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 25, 27 \text{ и т.д.} \quad (4.47)$$

Для повышения эффективности использования выделенного диапазона частот, т.е. для уменьшения коэффициента соканального повторения частот q , в сотовых системах подвижной связи на БС используют секторные антенны с шириной главного лепестка диаграммы направленности $\theta_{0,5} = 60^\circ, 90^\circ$ или 120° . Кроме того, необходимо учитывать плотность распределения нагрузки на территории города [10, 11], что приводит при ограниченном числе каналов на БС, к увеличению плотности размещения базовых станций в центре города и уменьшению их плотности на окраинах.

Частотное планирование. Для составления полного частотного плана сети сотовой подвижной радиосвязи (СПР), т.е. плана внедрения конкретных номиналов частот для каждой из БС, установленных на территории города, необходимо предварительно определить основные параметры этого плана [12]:

- размерность кластера N ;
 - число M секторов обслуживания в одной соте ($M = 1$ при $\theta_{0,5} = 360^\circ$; $M = 3$ при $\theta_{0,5} = 120^\circ$ и $M = 6$ при $\theta_{0,5} = 60^\circ$, где $\theta_{0,5}$ — ширина диаграмм направленности антенн БС);
 - число k БС, которые необходимо установить на территории города;
 - радиус одной соты R_s , км;
 - уровень мощности передатчика БС $P_{БС}$, дБВт;
 - высота подвеса $h_{БС}$, м, антенны БС (высота антенны АС принимается равной $h_{АС} = 1,5$ м).
- Перечисленные параметры можно определить, если известны следующие данные:
- F — полоса частот, МГц, выделенная для передачи сигналов БС сети СПР в данном городе;
 - F_k — полоса частот, МГц, занимаемая одним частотным каналом сети СПР;
 - n_a — число абонентов, которые одновременно могут использовать один частотный канал (для системы NMT $n_a = 1$, для GSM $n_a = 8$);
 - N_a — число абонентов, которое должна обслуживать сотовая сеть СПР в данном городе;
 - β — активность одного абонента в час наибольшей нагрузки, Эрл;
 - p_a — допустимая вероятность блокировки вызова в сотовой сети СПР;
 - ρ_0 — необходимое защитное отношение для приемников сети СПР;
 - p_t — процент времени, в течение которого допускается, чтобы отношение сигнал/помеха на входе приемника в сети СПР было меньше защитного отношения ρ_0 ;
 - S — площадь города, км², в котором развернута сотовая сеть СПР;
 - α — параметр, дБ, определяющий диапазон случайных флуктуаций уровня принимаемого сигнала в месте приема (для сети СПР $\alpha = 4 \dots 10$ дБ);
 - $P_{АС}$ — чувствительность приемника АС, дБВт;
 - $G_{БС}$ — коэффициент усиления антенны БС, дБ.

Процедура определения основных параметров частотного плана для сети СПР состоит из восьми этапов.

1. Определяется общее число частотных каналов, выделяемых для развертывания сотовой сети СПР в данном городе:

$$n_k = \text{int}(F/F_k),$$

где $\text{int}(x)$ — целая часть числа x .

2. Вычисляется необходимая размерность кластера при заданных ρ_0 и p_t , для чего используется соотношение

$$p(N) = 100 \int_{[\lg(1/\beta_c) - \rho_0] / \alpha_p}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt,$$

вывод которого приведен в [9]. Данная формула связывает процент времени $p(N)$, в течение которого отношение сигнал/помеха на входе приемника АС ниже защитного отношения ρ_0 . Величины β_c и α_p зависят от параметров $q = D/R_s = \sqrt{3N}$, α , а также от M . Процент времени $p(N)$ убывает с ростом N . При заданных ρ_0 , α и $M = 1; 3; 6$ выполняется расчет значений $p(N)$ для нескольких величин N (т.е. q). Значение N , при котором выполняется условие $p(N) \leq p_t$, принимается за размерность кластера сети СПР.

3. Находится число частотных каналов, которое используется для обслуживания абонентов в одном секторе одной соты:

$$n_s = \text{int}(n_k / MN).$$

4. Определяется допустимая телефонная нагрузка в одном секторе одной соты, Эрл,

$$A = \begin{cases} n_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(p_a \sqrt{\pi n_0} / 2 \right)^{1/n_0}} \right], & p_a \leq 2 / (\pi n_0); \\ n_0 + \sqrt{\pi / 2 + 2 n_0 \ln \left(p_a \sqrt{\pi n_0} / 2 \right)} - \sqrt{\pi / 2}, & p_a > 2 / (\pi n_0), \end{cases}$$

где $n_0 = n_s n_r$. Вывод данной формулы приведен в [12].

5. Рассчитывается число абонентов, обслуживаемых одной БС при заданной вероятности блокировки,

$$N_{\text{БС}} = M \text{int}(A/\beta).$$

6. Определяется число БС в сотовой сети

$$K = \text{int}(N_s / N_{\text{БС}}).$$

7. Находится радиус одной соты

$$R_s = \sqrt{S/(\pi K)}.$$

8. Вычисляется $P_{\text{БС}}$ при $h_{\text{БС}} = \text{const}$, либо $h_{\text{БС}}$ при $P_{\text{БС}} = \text{const}$, для чего применяют уравнение (4.1)

$$P_{\text{АС}} = P_{\text{БС}} + G_{\text{БС}} - 69,55 - 26,16 \lg(f_{\text{МГц}}) + 13,82 \lg h_{\text{БС}} - (44,9 - 6,55 \lg h_{\text{БС}}) \lg R_s.$$

Таким образом, приведенная процедура позволяет найти все требуемые параметры частотного плана сети СПР. При составлении полного частотного плана необходимо, зная число частотных каналов, приходящихся на каждую БС, и конфигурацию кластера, используемого для построения сотовой сети, определить конкретные номиналы частот, которые выделяются для работы всех БС одного кластера. Причем должны быть сведены к минимуму помехи меж-

ду сотами, в которых применяются соседние частотные каналы, а также интермодуляционные помехи между частотными каналами, задействованными в одном секторе соты.

Примеры частотного планирования [12]. Рассмотрим два примера частотного планирования сотовых сетей СПР стандартов NMT и GSM. В обоих примерах зададим следующие данные:

$$F = 7,2 \text{ МГц}; \beta = 0,025; p_a = 0,1, p_t = 10\%, \alpha = 6 \text{ дБ}; S = 706,8 \text{ км}^2; N_a = 60000; \\ h_{\text{БС}} = 30 \text{ м}; G_{\text{БС}} = 12 \text{ дБ}.$$

Пример 1. Дополнительные исходные данные для системы NMT-900:

$$p_0 = 18 \text{ дБ}; F_k = 0,025 \text{ МГц}; p_{\text{АС}} = -143 \text{ дБВт}; n_a = 1.$$

В рассматриваемом случае $n_k = 288$. Расчет по п. 2 показывает, что для заданных p_0 и p_t имеем $N = 6$ и $M = 6$, причем $n_s = 8$; $A = 5,2$; $N_{\text{БС}} = 1248$; $K = 48$; $R_0 = 2,16 \text{ км}$; $P_{\text{БС}} = 25 \text{ мВт}$.

Пример 2. Дополнительные исходные данные для системы GSM:

$$p_0 = 9 \text{ дБ}; F_k = 0,2 \text{ МГц}; p_{\text{АС}} = -132 \text{ дБВт}; n_a = 8.$$

В данном случае $n_k = 36$. Расчет по п. 2 показывает, что при заданных p_0 и p_t получим $N = 4$ и $M = 3$, причем $n_s = 3$; $A = 20,6$; $N_{\text{БС}} = 2472$; $K = 25$; $R_0 = 3 \text{ км}$; $P_{\text{БС}} = 1 \text{ Вт}$.

Сравнивая результаты двух рассмотренных примеров, нетрудно заметить, что применение системы GSM, обладающей существенно большей, чем у NMT, помехоустойчивостью, позволяет создать сотовую сеть СПР с гораздо меньшим (почти в 2 раза) числом БС. Каждая БС системы GSM имеет большую зону покрытия и обслуживает большее число абонентов. Поэтому капитальные затраты на строительство сети СПР с использованием стандарта GSM оказываются более низкими по сравнению со стандартом NMT.

Сравнение СПР по эффективности использования радиочастотного спектра [13]. Сети сотовой подвижной связи (СПС) начали развиваться в 80-х годах. Системы первого поколения были аналоговыми, в них использовалось частотное разделение каналов (FDMA). В ряде европейских государств были распространены аналоговые системы первого поколения стандарта NMT, работающие в диапазонах 450 и 900 МГц; в США, некоторых странах американского континента и Азии действовали системы AMPS диапазона 800 МГц.

Следует отметить, что по эффективности использования РЧС все аналоговые системы указанных выше стандартов практически эквивалентны, и поэтому выводы, сделанные в отношении одной из них, можно отнести ко всем остальным.

Многообразие стандартов не позволяет существенно снижать стоимость производства оборудования. Поэтому в странах западной Европы в рамках СЕРТ (Европейской конференции Административных связей) разрабатываются общеевропейские стандарты на новые системы радиосвязи диапазона 900 МГц. С 1992 г. началось широкое внедрение сетей СПС на базе цифровой системы второго поколения стандарта GSM, в которой используется временное разделение каналов (TDMA). Система обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с аналоговыми системами, что позволяет увеличить повторяемость частот на обслуживаемой территории и таким образом повысить эффективность использования РЧС.

Аналогом системы GSM в диапазоне 2 ГГц служит система общеевропейского стандарта GSM-1800, имеющая две разновидности. В первой из них — GSM-1800(8) — в одном частотном канале одновременно могут работать восемь абонентов, во второй — GSM-1800(16) — число абонентов удваивается. Стандарт AMPS также имеет две модификации. В аналоговой системе AMPS(1) в одном частотном канале передаются сигналы толь-

ко одного абонента, в цифровой же системе AMPS(3) в одном канале методом TDMA передаются сигналы трех абонентов.

В 1993 г. фирмой Qualcomm была разработана система СПС с кодовым разделением каналов (CDMA) [14]. В 1995 г. завершились разработка и испытания европейской системы СПС, в которой также применяется CDMA [15]. Было показано [16, 17], что эффективность использования РЧС в сетях СПС с CDMA может быть существенно выше, чем в сетях СПС с FDMA и TDMA. В [12, 13] предложена методика определения основных параметров сетей СПС, на основе которой могут быть получены зависимости полосы частот, необходимой для обслуживания абонентов с требуемым качеством, от числа БС (сот) сетей, числа абонентов, обслуживаемых одной БС, радиуса соты и мощности передатчика БС в расчете на одного активного абонента. Далее такие зависимости определены для основных видов стандартов систем СПС, работающих в диапазоне 2 ГГц. На основе их сопоставления делаются выводы об эффективности использования РЧС в сетях СПС, создаваемых на основе различных сотовых систем. Исходные данные о параметрах систем разных стандартов можно найти в [18].

Рассмотрим примеры планирования в перспективном диапазоне 2 ГГц сетей СПС. Такое планирование требует задания определенных исходных данных, которые могут быть разбиты на несколько групп.

К первой группе относятся данные, связанные с качеством обслуживания абонентов в сети СПС, ко второй — исходные данные, необходимые для проектирования сети, а к третьей — данные, определяющие параметры используемой системы. Перечень необходимых исходных данных и параметров, использованных в приведенном ниже анализе, приведены в табл. 4.18.

Таблица 4.18. Определение параметров, используемых при расчетах

Группа параметров	Параметр	Наименование параметра	Значения параметра, использованного в анализе
1	β	Средняя активность одного абонента, Эрл	0,025
	p_a	Вероятность потери вызова из-за занятости канала	0,1
	p_r	Допустимый процент времени ухудшения качества связи, %	1
	P_0	Защитное отношение (отношение сигнал/помеха), определяющее качество связи, дБ	9 (GSM-1800) 20 (AMPS) 5 (CDMA)
2	S	Площадь города, км ²	800 (большой город) 60 (средний город)
	σ	Дисперсия флуктуации уровней полезных и мешающих сигналов, дБ	8 (большой город) 6 (средний город)
	N_a	Количество абонентов, которое следует обслужить в данном городе	100 000, 30 000 и 10 000 — большой город 30 000, 10 000 и 5 000 — средний город
	B_r	Полоса частот, выделенная для организации сети СПС, МГц	$2 \leq B_r \leq 30$
	p_r	Чувствительность приемника, дБВт	-132 (GSM-1800) -143 (AMPS) -153 (CMA)

Группа параметров	Параметр	Наименование параметра	Значения параметра, использованного в анализе
3	G	Коэффициент усиления антенны БС, дБ	12
	$h_{\text{БС}}$	Высота подвеса антенны, м	40
	n_a	Число абонентов, которые используют один частотный канал или один псевдослучайный сигнал	8 и 16 для (GSM-1800) 1 и 3 для (AMPS) 1 для (CDMA)
	F_k	Полоса частот, занимаемая одним частотным каналом, кГц	200 (GSM-1800) 30 (AMPS) B_c (CDMA)

На основании данных из табл. 4.18 в ходе проектирования сетей СПС необходимо определить:

- M — число секторов, на которые разбивается каждая из сот в результате применения на БС секторных антенн;
- $N_{\text{БС}}$ — число абонентов, которое может быть обслужено одной БС;
- K — число БС, которые должны быть построены для организации сети СПС, обслуживающей данное количество абонентов;
- R_s — радиус соты (зон обслуживания одной БС), км;
- P_R — уровень мощности излучения БС, приходящаяся на одного активного абонента, дБВт.

В результате проведенных расчетов [13] было установлено, что с увеличением полосы частот, выделяемой сети СПС, число абонентов, обслуживаемых одной БС, возрастает. Следует также отметить, что при заданной полосе частот, выделенной для работы сети, различные системы СПС существенно отличаются по числу абонентов, обслуживаемых одной БС. Наибольшее число абонентов может быть обслужено в сети СПС, в которой используется система CDMA, наименьшее — в сети с системой AMPS(1). Применение на БС трех- и шестисекторных антенн вместо ненаправленных, как правило, увеличивает число абонентов, обслуживаемых одной БС, особенно в случае широкой полосы частот, выделяемой сети СПС. Если эта полоса невелика, то применение секторных антенн, как следует из [13], может оказаться нерациональным. Это объясняется тем, что разбиение отдельных сот на секторы с помощью направленных антенн на БС уменьшает число абонентов, обслуживаемых в каждом секторе. Причем в соответствии с законом Эрланга при заданной вероятности блокировки вызова снижается эффективность использования каналов связи в каждом секторе, что может приводить к общему уменьшению числа абонентов, обслуживаемых в данной соте.

В [13] представлены также зависимости числа БС от полосы частот, выделенной сети СПС, для разных систем, типов городов и числа абонентов сети для $N_a = 30\,000$ и $\sigma = 8$ дБ. Эти зависимости показывают: необходимая полоса частот уменьшается, если в сети СПС используется большее число БС; при заданной полосе частот число БС, которое необходимо иметь в сети СПС для обслуживания заданного числа абонентов, существенно зависит от выбранной системы СПС. Наименьшее число БС требуется построить в сети СПС, в которой применяется система CDMA.

Сопоставим применение различных систем СПС с точки зрения эффективности использования спектра. Очевидно, что эффективность системы СПС тем выше, чем большее число абонентов может быть обслужено одной БС при заданной общей полосе частот, выделенной для

работы сети. Если это число значительно, то число БС в сети невелико и соответственно стоимость строительства и эксплуатации такой сети может оказаться сравнительно небольшой.

В табл. 4.19 указано число абонентов, обслуживаемых одной БС для разных систем СПС при $B_r = 11$ МГц. Данные этой таблицы показывают следующее.

1. Система CDMA существенно превосходит все остальные сравниваемые системы по числу абонентов, которые в заданной полосе частот могут быть обслужены одной БС. По сравнению с системой GSM-1800(16) система CDMA дает выигрыш в числе абонентов в 3...6 раз.

2. В системе GSM-1800(8) одной БС может быть обслужено такое же число абонентов, что и в системе AMPS(3), либо несколько большее.

3. Система первого поколения AMPS(1) морально устарела и значительно уступает современным системам СПС в плане эффективности использования спектра, так как может обслужить наименьшее число абонентов.

4. Применение на БС трехсекторных антенн вместо ненаправленных наиболее эффективно в системе CDMA, в которой они позволяют увеличить число абонентов, обслуживаемых одной БС, более, чем в два раза. В остальных системах трехсекторные антенны увеличивают число абонентов на 20...30%, а применение шестисекторных антенн может даже уменьшить число абонентов и поэтому нерационально.

5. На число абонентов существенно влияют условия распространения радиоволн, характеризуемые параметром σ в большом городе ($\sigma = 8$ дБ); одна и та же система СПС может обслужить одной БС меньшее число абонентов, чем в среднем ($\sigma = 6$ дБ).

Таблица 4.19. Число абонентов, обслуживаемых одной БС, для разных систем СПС при $B_r = 11$ МГц

Полоса частот СПС B_r , МГц	Тип города	Число абонентов $N_{БС}$, обслуживаемых одной БС, в системе				
		AMPS		GSM-1800		CDMA
		$n_a = 1$	$n_a = 3$	$n_a = 8$	$n_a = 16$	$n_a = 1$
10	большой ($\sigma = 8$ дБ)	300/400/450	1200/1750/2200	1100/1600/1250	2500/2700/2600	7500/15600
6		120/120/130	500/700/850	500/520/1250	1250/1500/2600	5000/11300
10	средний ($\sigma = 6$ дБ)	600/700/800	1860/1900/2000	2000/2500/3000	4500/5500/7000	11000/23500
6		200/230/270	950/1050/1200	1000/1500/1250	2500/2700/2600	6500/15700

Примечание. Для систем AMPS и DCS-1800 число абонентов приведено соответственно при $M = 1, 3, 6$, для CDMA — при $M = 1, 3$

В табл. 4.20 приведено число БС, которые должны быть развернуты на территории города для различных систем СПС в случае, когда в сети СПС используются трехсекторные антенны и обслуживается заданное количество абонентов. Анализ этой таблицы также показывает значительное преимущество системы CDMA над другими системами. В сети СПС, которая создана на ее основе и которая обслуживает 100 тыс. абонентов, должно быть развернуто всего 11 БС, если для работы сети выделена полоса частот 6 МГц. Система DCS-1800(16) требует при тех же условиях строительства почти в 6 раз большего числа БС. Из табл. 4.20 следует, что уменьшение полосы частот, выделяемой для работы сети СПС, приводит к необходимости увеличения числа БС в сети, причем, если для системы CDMA при уменьшении полосы частот с 10 до 6 МГц это увеличение не очень значительно, то для других систем оно может составлять два и более раз.

Таблица 4.20. Определение числа базовых станций для разных систем сотовой связи

Полоса частот СПС B_p , МГц	Тип города	Число обслуживаемых абонентов	Число базовых станций, которые необходимо развернуть на территории города, для системы СПС ($M = 3$)				
			AMPS		GSM-1800		CDMA
			$n_a = 1$	$n_a = 3$	$n_a = 8$	$n_a = 16$	$n_a = 1$
10	Большой	100000	400	60	65	25	8
		30000	120	28	20	9	2
		10000	40	9	7	3	1
6		100000	760	140	160	65	11
		30000	225	40	49	20	3
		10000	75	14	17	7	1
10	Средний	100000	55	15	13	6	2
		30000	19	5	5	2	1
		10000	9	3	3	1	1
6		100000	140	30	20	9	2
		30000	40	10	7	3	1
		10000	22	5	4	2	1

Нужно отметить, что условия распространения радиоволн существенно влияют на число БС, которые должны быть установлены в сети СПС. Если сопоставить данные табл. 4.19 для $N_a = 30000$ и $10\ 000$ для большого ($\sigma = 8$ дБ) и среднего ($\sigma = 6$ дБ) городов, то нетрудно заметить, что в большом городе, для которого характерны более сложные условия распространения радиоволн, число БС должно быть в 3...4 раза больше.

Существенно зависит число БС в сети от выбранной системы СПС. Система GSM-1800(8) требует в ряде случаев строительства в 1,3...1,5 раза меньшего числа БС по сравнению с системой AMPS(3). Что касается системы AMPS(1), то она может быть применена лишь в тех случаях, когда число обслуживаемых в сети абонентов невелико, а выделенная для работы сети полоса частот достаточно широка.

4.3.3. Оценка эффективности использования РЧС в сетях радиосвязи и вещания

Одним из важнейших вопросов, возникающих при организации любой радиослужбы в отведенной для ее работы полосе частот, является следующий: какая минимальная полоса частот требуется для покрытия региона сетью примыкающих зон обслуживания, в каждой из которых должно быть организовано заданное число частотных каналов? Этот вопрос в течение ряда лет изучался в 1-й Исследовательской комиссии Бюро радиосвязи МСЭ, и результаты выполненных в этом направлении исследований отражены в Отчете МСЭ [19] и Справочнике по управлению РЧС [20]. Один из подходов к решению этого вопроса для сетей подвижной связи и вещания, который отражен в [19–21], изложен в данном разделе.

При определении минимальной полосы частот, необходимой для покрытия региона сетью примыкающих зон обслуживания, исходными данными являются технические характеристики применяемого приемопередающего оборудования, метод модуляции и требования к качеству воспроизведения информации. Однако важно знать не только минимальную полосу частот, которую необходимо выделить для создания такой сети, вид модуляции, ис-

пользуемый для передачи сообщений, но и потенциальный предел сокращения полосы частот в сетях связи и вещания при применении оптимальных методов передачи и приема сигналов с идеальными характеристиками приемопередающего оборудования. Такую предельно минимальную полосу, необходимую для создания сети радиосвязи или вещания, которая дальше обозначена $F_{\text{опт}}$, можно определить на основе теории информации [20, 21]. Зная $F_{\text{опт}}$, эффективность использования РЧС можно выразить отношением полос частот $F_{\text{опт}}$ и F_c , необходимых для организации сети на базе «оптимальных» и реальных РЭС: $\mu = F_{\text{опт}}/F_c$.

На рис. 4.25 представлена сеть радиосвязи или вещания, построенная на базе регулярных сеток. При этом решается задача покрытия определенного региона сетью примыкающих зон обслуживания. Для каждой зоны отводится один или несколько частотных каналов, причем один и тот же канал может использоваться в разных зонах на основе их надлежащего территориального разнорасположения. Для некоторого упрощения выкладок рассматривалась сеть с зонами в виде квадратов одних и тех же размеров (см. рис. 4.25). Базовые станции в системах подвижной связи или вещательные передатчики расположены в центре зоны. Размер r зоны обслуживания считается заданным. В зонах, помеченных на рис. 4.25 одной и той же цифрой, может использоваться один и тот же частотный канал, если расстояние R между этими зонами обеспечивает необходимое ослабление помех.

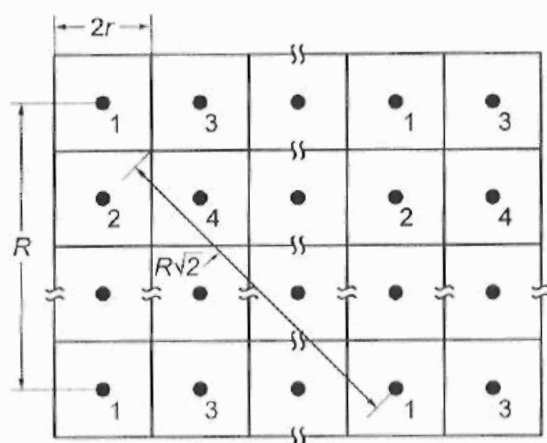


Рис. 4.25. Сеть радиосвязи или вещания с регулярной сеткой

В идеализированной сети на базе равных квадратов при использовании в каждой зоне M_c частотных каналов, как видно из рис. 4.25, общее число каналов, необходимое для покрытия сетью всего региона

$$N = M_c \left\{ \text{int} \left[\frac{R}{2r} \right] + 1 \right\}^2,$$

где $\text{int} [x]$ — целая часть числа x .

Если обозначить через F_m полосу частот одного канала, то полная полоса частот, отводимая сети,

$$F_c = N F_m. \quad (4.49)$$

При анализе удобно рассматривать значения этих полос, отнесенные к полосе частот модулирующего сигнала F_0 :

$$\tilde{F}_m = F_m / F_0 \quad \text{и} \quad \tilde{F}_c = F_c / F_0.$$

В соответствии с математическими моделями, широко используемыми для оценки ослабления уровня сигналов с изменением расстояния l , множитель ослабления уровня сигнала $V(l)$ изменяется как $V(l) = a/l^k$, где k в зависимости от высоты подвеса антенны и расстояния может принимать значения от 2 до 4. При этом отношение сигнал/помеха на входе приемника имеет вид

$$\rho = \frac{\beta}{4} \left(\frac{R}{r} \right)^{k+2}; \quad \beta = \frac{2}{1 + 2^{-(k+2)/2}}. \quad (4.50)$$

Из (4.50) и (4.47) следует

$$R/r = (4\rho/\beta)^{1/(k+2)} \quad \text{и} \quad N = M_c \left\{ \left[(1/2)(4\rho/\beta)^{1/(k+2)} \right] + 2 \right\}^2.$$

Отношение ρ на входе приемника не должно быть меньше защитного ρ_s , т.е. величины, при которой обеспечивается необходимое отношение ρ_0 сигнал-шум на его выходе. Для разных видов модуляции в [21] получены формулы для $\rho_s(\rho_0)$.

Для оптимальных РЭС в соответствии с положениями теории информации получена следующая формула для $\rho_s(\rho_o)$:

$$\rho_s(\rho_o) = (1 + \rho_o)^{1/\tilde{F}_m} - 1. \quad (4.51)$$

Выражение (4.51) справедливо для оптимальных «по Шеннону» РЭС, когда передача и прием информации осуществляются оптимальными методами. Из (4.49) видно, что при $\rho_o = \text{const}$ и использовании более широкополосных видов модуляции (большие \tilde{F}_m) необходимое значение ρ_s уменьшается.

Для частотной модуляции (ЧМ) соотношение, связывающее ρ_s , ρ_o и \tilde{F}_m , имеет вид

$$\rho_s(\rho_o) = \chi^2 \rho_o / \left[3\tilde{F}_m (\tilde{F}_m - 2)^2 \right], \quad (4.52)$$

где $\tilde{F}_m = 2(1 + \chi m_e)$; m_e — эффективный индекс модуляции; χ — пик-фактор сообщения (обычно полагают $\chi = 3 \dots 4$).

Для амплитудной модуляции с одной боковой полосой частот (АМ-ОБП) справедливо соотношение $\rho_s = \rho_o$.

Для кодово-импульсной модуляции (ИКМ), использующей для передачи сообщений n разрядов и метод передачи с помощью класса сигналов, относящегося к М-позиционной фазовой манипуляции (М-ФМ),

$$\rho_s(\rho_o) = \left[2 \left(n / \tilde{F}_m + 1 \right) \ln 2 + \rho_o \right] / \sin^2 \left(\pi 2^{-(2n/\tilde{F}_m)} \right), \quad (4.53)$$

где $\tilde{F}_m = \frac{2n}{\lg M}$ и $\rho_o = 2^{2n-1} - 1$.

Для системы n -ИКМ, использующей позиционные сигналы вида 16-КАМ, формула для $\rho_s(\rho_o)$ имеет вид

$$\rho_s(\rho_o) = 10 \left\{ \ln \left[180 / \sqrt{10 \ln 180 \rho_o} \right] + \ln \rho_o \right\}. \quad (4.54)$$

С использованием приведенных формул получены зависимости $\tilde{F}_c(\tilde{F}_m)$. Они имеют вид пилообразных линий, как показано на рис. 4.26, для сети, использующей оптимальные РЭС при $k = 3$ и двух значениях ρ_o , а также для ЧМ при одном значении ρ_o . Указанные в разрывах линии квадраты целых чисел 4, 9, 16 и т.д. показывают, сколько частотных каналов N необходимо для создания сети при одном частотном канале на зону, т.е. при $M_c = 1$.

Из рис. 4.26 видно, что увеличение \tilde{F}_m может быть выгодным лишь тогда, когда одновременно скачком уменьшается отношение R/r , т.е. N ; штрихом отмечены минимумы кривых $\tilde{F}_c(\tilde{F}_m)$. Хорошо видно наличие оптимальных значений \tilde{F}_{m0} , при которых $\tilde{F}_c(\tilde{F}_{m0})$ имеет минимум. С увеличением ρ_o увеличиваются как \tilde{F}_{m0} , так и $\tilde{F}_c(\tilde{F}_{m0})$. При этом для организации сети при всех видах модуляции, кроме АМ-ОБП, и при всех рассмотренных значениях ρ_o требуется девять частотных каналов. Число каналов для АМ-ОБП указано в табл. 4.21.

Таблица 4.21. Число каналов для АМ-ОБП

ρ_o , дБ	24	30	36	42
N_{\min}	16	25	36	49

На рис. 4.27 приведены зависимости значений $\tilde{F}_{c0}(\tilde{F}_{m0})$ от ρ_0 для оптимальных РЭС, а также зависимости $\mu(\rho_0)$ для всех остальных рассматриваемых видов модуляции при тех же условиях. Для всех видов модуляции $\tilde{F}_{c0} = (\tilde{F}_{c0\text{opt}} / \mu)$. Зависимости на рис. 4.27 иллюстрируют эффективность использования РЧС (ЭИРЧС) при всех рассматриваемых видах модуляции по отношению к оптимальным РЭС. Худшей является ЧМ, поскольку при ее использовании требуемая для организации сети полоса частот примерно в 5 раз больше, чем для оптимальных РЭС. Наиболее близкой к оптимальной для всех значений ρ_0 является 16-позиционная система с ИКМ, которая требует для организации сети всего лишь в 1,5 раза более широкой полосы частот, чем для оптимальных РЭС, даже в случае приема сообщений с весьма высоким качеством. Из цифровых методов передачи ИКМ-М-ФМ наилучшей для рассматриваемых условий является система с $M = 8$, а наихудшей — с $M = 4$.

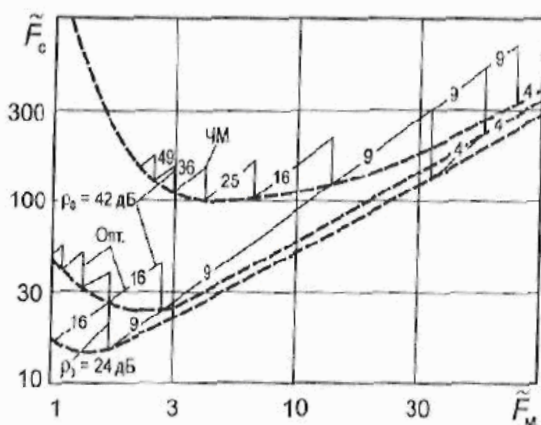


Рис. 4.26. Зависимости $\tilde{F}_c(\tilde{F}_m)$

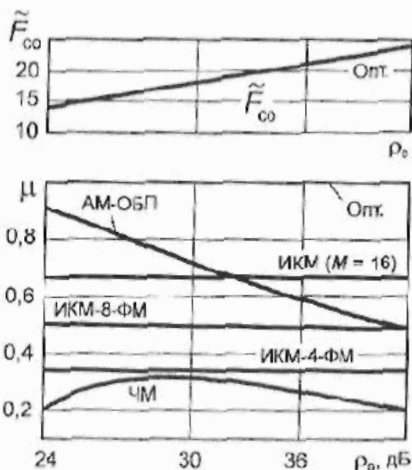


Рис. 4.27. Зависимости $\tilde{F}_{c0}(\rho_0)$ и $\mu(\rho_0)$

Интересно также отметить, что при невысоких требованиях к качеству приема сообщений наиболее близкой к оптимальным РЭС будет Ам-ОбП. Однако ЭИРЧС Ам-ОбП заметно падает при повышении требований к качеству приема сообщений, особенно если учитывать влияние нестабильности частоты реальных передатчиков.

Достоинство приведенного критерия состоит в том, что он позволяет определять эффективность использования РЧС сетей РЭС, в которых применяются конкретные виды и параметры модуляции по отношению к потенциальному минимуму, обеспечиваемому идеальной радиосистемой.

Понятие «идеальная радиосистема» может быть в каждом конкретном случае достаточно четко определено на основе выбранной модели идеализированной сети и использования оптимальной системы передачи и приема сообщений «по Шеннону», характеристики которой определяются выражением (4.51). Основываясь на этих показателях, можно определять допустимые отклонения характеристик приемного и передающего оборудования от идеальных, рассматривая их влияние на изменение ЭИРЧС.