

## 4.2. Методы частотного планирования сетей звукового и телевизионного вещания

В настоящее время во всем мире происходят революционные изменения в области ЗВ и ТВ вещания, обусловленные переходом на цифровые системы, позволяющие гораздо более эффективно по сравнению с аналоговыми системами использовать выделенный для вещания РЧС. В 2004 г. состоялась первая сессия Региональной конференции по планированию сетей цифрового вещания в Европейской зоне. Новый региональный план развития цифрового вещания принят на второй сессии Региональной конференции в 2005 г. Этот план заменяет Стокгольмский план, разработанный в 1961 г. и многие десятилетия определявший развитие сетей вещания в европейских странах и в СССР. В данном разделе излагаются технические основы и методология частотного планирования сетей аналогового и цифрового вещания. Принципы частотного планирования аналоговых и цифровых сетей вещания одинаковы. Однако технические основы вещания существенно отличаются.

### 4.2.1. Технические основы планирования сетей звукового и телевизионного вещания

В соответствии с [2] радиовещательной службе для наземных передающих сетей ТВ и ЗВ вещания в Районе 1, в который входит Россия, выделены частоты от 47 до 960 МГц. Выделенные для ТВ вещания полосы частот разбиваются на диапазоны: I — 48,5...66 МГц; II — 76,0...100,0 МГц; III — 174,0...230,0 МГц; IV–V — 470,0...958,0 МГц.

В России для ТВ вещания используются стандарты D и K и система цветного телевидения SECAM. Для этих стандартов число строк в кадре 625, частота кадров 25 Гц, при этом частота строк  $f_{стр} = 15625$  Гц. Полоса частот, занимаемая полным телевизионным сигналом, равна 6 МГц. В ТВ передатчиках используется амплитудная модуляция несущей с частично подавленной нижней боковой полосой. Поскольку одновременно с полным телевизионным сигналом передается сигнал звукового сопровождения с частотной модуляцией, то ширина полосы радиоканала в ТВ вещании составляет 8 МГц.

Для ОВЧ ЧМ вещания в Районе 1 [2] выделены полосы частот 65,9...74 и 100,0...108,0 МГц. При монофоническом вещании звуковое сообщение (высший класс) занимает полосу частот 30...15000 Гц. Поскольку в ОВЧ диапазоне в настоящее время используется частотная модуляция несущей с девиацией частоты 50 кГц, то ширина полосы радиоканала составляет около 130 кГц.

Частотный разнос между несущими соседних каналов в полосе 65,9...74 МГц составляет 30 кГц, а в полосе 100...108 МГц — 100 кГц, т.е. используются соседние каналы с перекрывающимися спектрами. Таким образом, в полосе 65,9...74 МГц можно организовать 271 вещательный канал, а в полосе 100...108 МГц — 81 канал звукового вещания.

В настоящее время наибольшее распространение получила стереофоническая система вещания, в которой комплексным стереосигналом с полярной модуляцией, принятой в России, в передатчике осуществляется частотная модуляция несущей с девиацией частоты 50 кГц. При этом ширина полосы радиоканала составляет около 200 кГц.

Одним из важнейших аспектов решения проблемы ЭМС РЭС является обеспечение их оптимального частотно-пространственного размещения с учетом частотно-пространственных ограничений, накладываемых сетями ТВ и ЗВ вещания. При размещении передатчиков ТВ и ЗВ вещания на одной станции (в одном пункте) при назначении им частот необ-

ходимо учитывать частотные ограничения, определяемые необходимыми защитными отношениями сигнал/помеха на входе приемника.

При работе нескольких ТВ передатчиков возникают взаимные помехи в совмещенном канале, в смежных каналах, в зеркальных каналах и от излучений гетеродинов. Наибольшее защитное отношение  $A_3 = 45$  дБ (рис. 4.7) требуется в совмещенном канале, когда частоты несущих полезного и мешающего передатчиков равны. Известно, что спектр ТВ сигнала является дискретным с концентрацией энергии возле частот, кратных частотам строк и полей. Если два ТВ сигнала расположить по частоте так, чтобы спектр одного из них располагался в незаполненных промежутках другого, то заметность на изображении сигнала с меньшей амплитудой значительно снизится.

Сдвиг спектров ТВ сигналов осуществляется взаимным смещением несущих частот (СНЧ) передатчиков. При обычном режиме СНЧ учитывается дискретность ТВ сигнала с частотой строк, и стабильность частоты изображения должна составлять  $\pm 500$  Гц. При прецизионном СНЧ учитывается дискретность ТВ сигнала с частотой полей, стабильность частоты изображения должна составлять  $\pm 1$  Гц, а стабильность строчной частоты должна быть не хуже  $\pm 10^{-6}$ . Зависимость защитного отношения от СНЧ приведена на рис. 4.7.

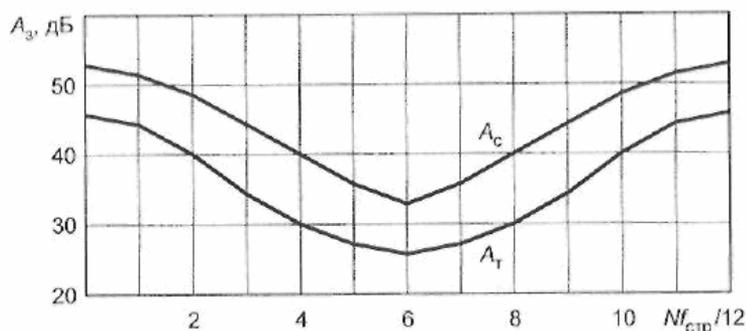


Рис. 4.7. Зависимость защитного отношения от СНЧ

При планировании наземной сети ТВ вещания значения защитных отношений нормируются для двух случаев интерференции. Первый из них — когда уровень помехи флуктуирует в значительных пределах. Такую помеху называют тропосферной, она соответствует 10% или 1% времени, и обозначают такое защитное отношение  $A_T$ . Второй — когда уровень помехи практически не меняется либо его флуктуации не существенны. Такую помеху называют продолжительной, она соответствует 50% времени, и обозначают такое защитное отношение  $A_c$ .

Защитное отношение для верхнего и нижнего смежных каналов составляет  $-6$  дБ. В IV и V диапазонах необходимо учитывать помеху по зеркальному каналу, который определяется как  $n + 8$  для поднесущей звукового сопровождения и  $n + 9$  для несущей изображения. Защитное отношение по зеркальному каналу для поднесущей звукового сопровождения равно  $-9$  дБ, а для несущей изображения  $+13$  дБ. Учитывая защитные отношения, можно определить частотные ограничения на присвоение частот передатчикам, расположенным в одном пункте [2].

Для определения частотно-пространственных ограничений на присвоение частотных каналов передатчикам, разнесенным в пространстве, необходимо рассчитать напряженность полей сигнала и помехи, для которых на границе зоны вещания должны выполняться условия:

$$\begin{cases} E_c = E_{\text{мин}}; \\ E_c - E_n = A_3, \end{cases} \quad (4.11)$$

где  $E_{\text{мин}}$  — минимальная напряженность поля сигнала на входе приемника, при которой обеспечивается хорошее качество изображения, при отсутствии помех от других станций, дБ/мкВ/м [2];  $E_c$ ,  $E_n$  — напряженности полей сигнала и помехи в рассматриваемой точке дБ/мкВ/м;  $A_3$  — требуемое защитное отношение, дБ.

Напряженность поля  $E(R)$ , дБ, в точке на расстоянии  $R$  от передатчика определяется выражением

$$E(R) = E(T, L) + P_{\Sigma} + K(L) + K(T) + K(\Delta h), \quad (4.12)$$

где  $E(T, L)$  — напряженность поля, определяемая по кривым, полученным экспериментальным путем и рекомендованным МККР [3] для 1 кВт излучаемой мощности относительно полуволинового вибратора и высоты приемной антенны 10 м при определенной эффективной высоте передающей антенны  $H_a$  (рис. 4.8, 4.9, 4.10);  $T$  — процент времени наблюдений, равный 50% для полезного передатчика, 10 и 1% для полей мешающих передатчиков;  $L$  — процент мест приема, равный 50% для полей полезного и мешающего передатчиков;  $P_{\Sigma} = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}} + \eta_{\text{пер}}$  — излучаемая мощность передающей станции;  $P_{\text{пер}}$  — мощность передатчика;  $G_{\text{пер}}$  — коэффициент усиления передающей антенны;  $\eta_{\text{пер}}$  — потери в фидере;  $K(L)$ ,  $K(T)$ ,  $K(\Delta h)$  — поправочные коэффициенты, учитывающие процент мест, процент времени и холмистость (рис. 4.11) соответственно.

Поскольку число радиовещательных станций велико, а число частотных каналов ограничено, то они используются в сети многократно [2, 5]. Это приводит к появлению множественности помех, для учета которых в условии (4.11) используется вероятностный метод.

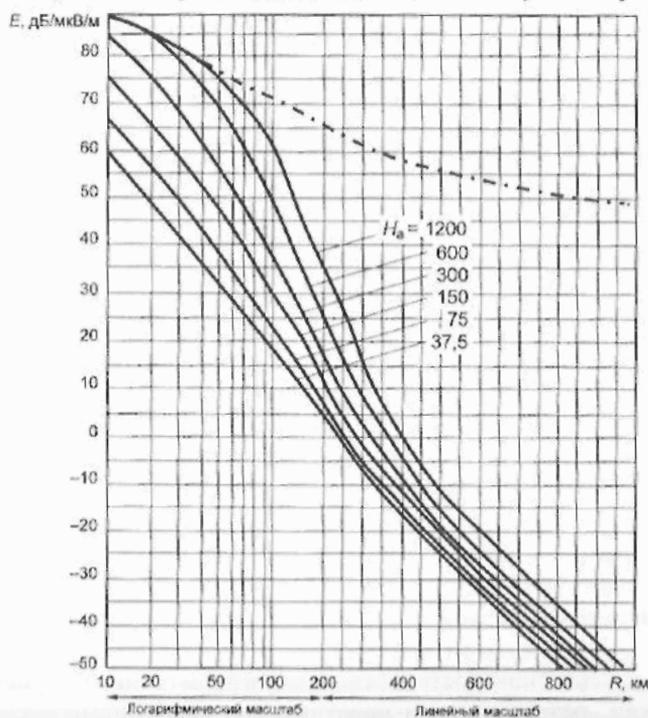


Рис. 4.8. Напряженность поля для 1 кВт эффективно излучаемой мощности; частота 30...250 МГц (полосы I, II и III); суша и Северное море; 10% времени; 50% мест

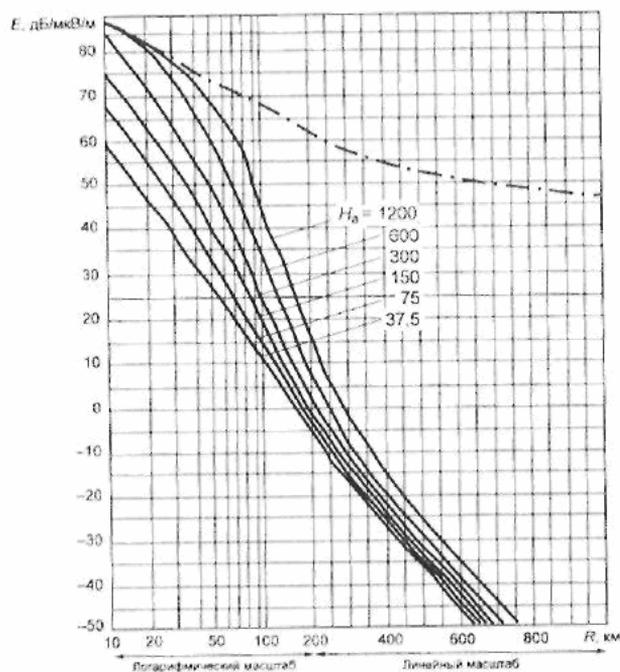


Рис. 4.9. Напряженность поля для 1 кВт эффективно излучаемой мощности; частота 450...1000 МГц (полосы IV и V); 50% времени; 50% пунктов

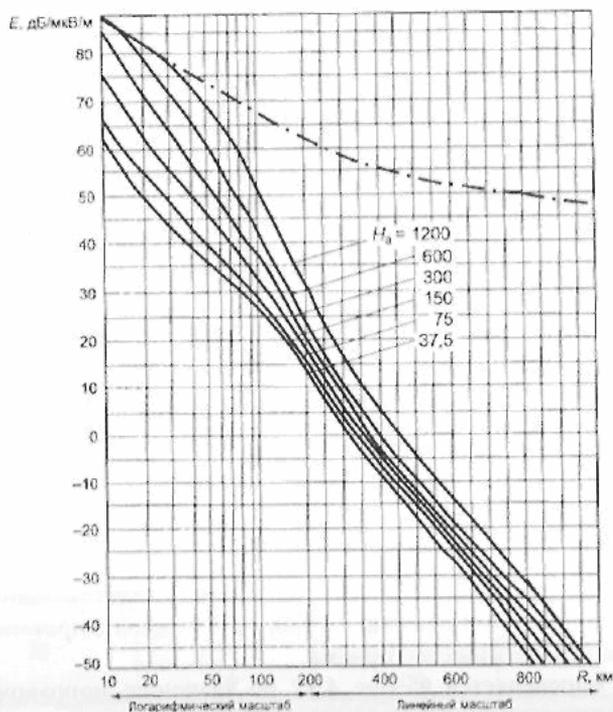


Рис. 4.10. Напряженность поля для 1 кВт эффективно излучаемой мощности; частота 450...1000 МГц (полосы IV и V), 1% времени, 50% пунктов

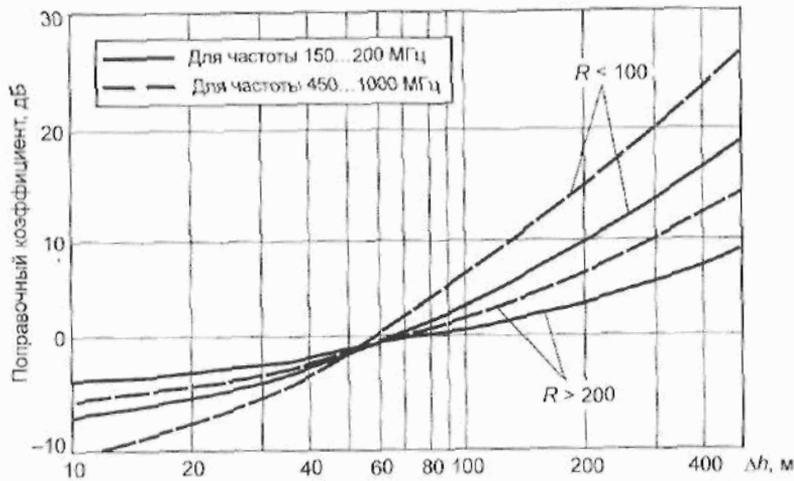


Рис. 4.11. Зависимость поправочного коэффициента от холмистости  $\Delta h$  при расстояниях до передающей станции  $R > 200$  км и  $R < 100$  км

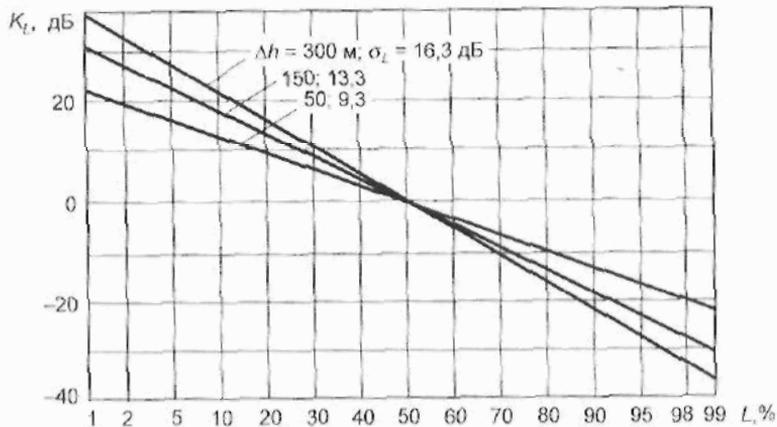


Рис. 4.12. Отношение напряженности поля для заданного процента приемных пунктов к напряженности поля для 50% приемных пунктов

Качественный прием считается обеспеченным, если его вероятность  $Y$  при учете действия всех помех равна 0,45. Эта вероятность рассчитывается по формуле

$$Y = \prod_{i=1}^M I_i, \quad (4.13)$$

где  $M$  — число мешающих станций;  $I_i = L_i$  — вероятность качественного приема в рассматриваемой точке при действии  $i$ -й помехи, %/100;  $L_i$  — процент приемных пунктов, в которых обеспечивается заданное качество приема.

Величина  $L_i$ , %, определяется из рис. 4.12 по значению поправочного коэффициента  $K(L_i)$ , дБ, который можно определить из (4.11), (4.12) и (4.13):

$$K(L_i) = A_s + E_{\text{ш}}(T, 50) + P_{\Sigma \text{ш}} - P_{\Sigma \text{с}} + \Delta S, \quad (4.14)$$

где  $\Delta S$  — ослабление помехи направленной приемной антенной (рис. 4.13); при  $A_3 = A_1$ ,  $T = 10\%$  или  $1\%$ ; при  $A_3 = A_с$ ,  $T = 50\%$ ;  $L_i$  — процент приемных пунктов, в которых обеспечивается заданное качество приема;  $K(L_i)$  — поправочный коэффициент, который учитывает процент мест, в которых обеспечивается заданное качество приема;  $A_3$  — защитное отношение (отношение напряженности поля полезного сигнала к напряженности поля мешающего сигнала);  $E_{in}(T, 50)$  — напряженность поля  $i$ -го мешающего сигнала для  $T$  процентов времени наблюдений ( $T = 10$  или  $1\%$ ) и  $50\%$  мест приема;  $P_{\Sigma n}$  — излучаемая мощность передающей станции  $i$ -го мешающего сигнала;  $P_{\Sigma с}$  — излучаемая мощность передающей станции полезного сигнала;  $\Delta S$  — ослабление напряженности поля мешающего сигнала за счет направленных свойств приемной антенны.

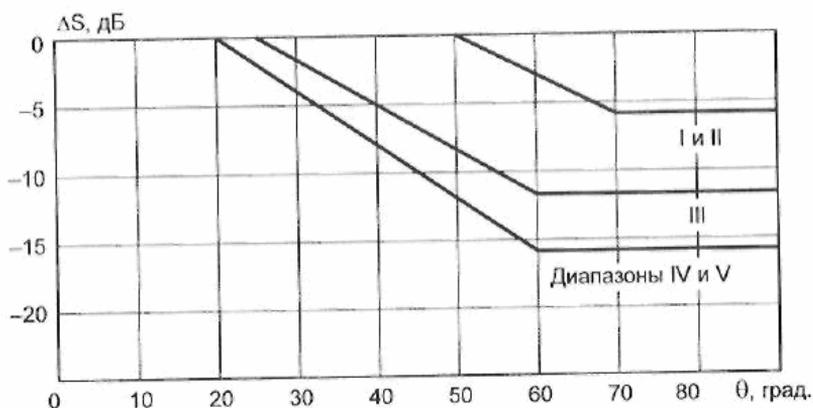


Рис. 4.13. Защищенность приемной антенны

Передающие антенны имеют круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, и в некоторых случаях в них используется сектор ослабления для уменьшения помех станциям, работающим в совмещенных каналах.

В табл. 4.3 приведены рассчитанные по (4.1)–(4.14) радиусы зон обслуживания  $R_z$  и координационные расстояния  $R_k$  между двумя ТВ передающими станциями, имеющими одинаковые технические параметры. При этом  $A_3 = A_1$ ,  $T = 10\%$  для I диапазона и  $1\%$  для IV и V диапазонов.

Таблица 4.3. Зависимость радиуса зоны и координационного расстояния ТВ передатчика от параметров аппаратуры

Диапазон	$E_{мин}$ , дБ/мкВ/м	$P_{\Sigma}$ , дБкВт	$H_a$ , м	$R_z$ , км	$R_k$ , км
I	50	-9	75	17	193
		13	150	62	403
		22	300	103	523
IV...V	70	-5	75	6,7	77
		11	150	15	182
		29	300	52	344

Для сети ОВЧ ЧМ вещания защитные отношения в зависимости от разноса несущих частот полезного и мешающего передатчиков определяются по кривым рис. 4.14.

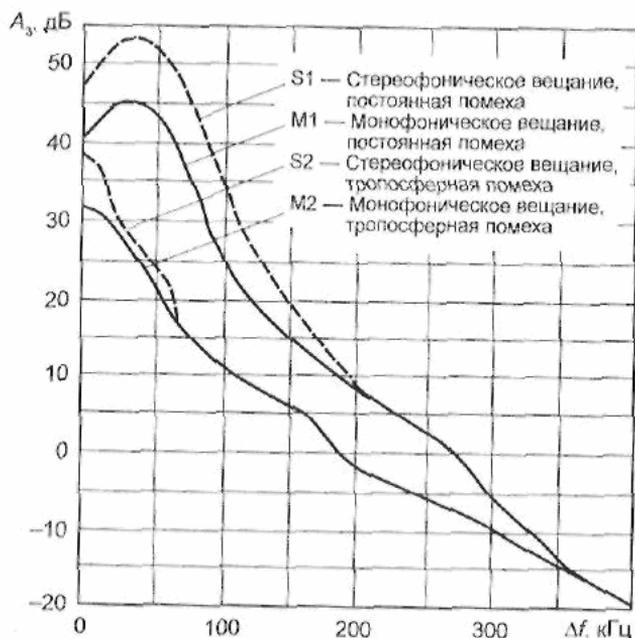


Рис. 4.14. Зависимость защитного отношения от разности между несущими полезного и мешающего сигналов  $\Delta f$  (девиация частоты  $\pm 50$  кГц)

Частотные ограничения на присвоение частот ОВЧ ЧМ передатчикам, расположенным в одном пункте, определяются исходя из защитных отношений и составляют  $\pm 1,2$  МГц от несущей частоты передатчика. Частотно-пространственные ограничения определяются так же, как и для передатчиков ТВ сети. Радиус зоны обслуживания, координационное расстояние рассчитывают так же, как и для ТВ вещания, по формулам (4.11)–(4.14) и кривым напряженности поля, рекомендованным МККР для I–III диапазонов. Ослабление помехи, приходящей с обратного направления приемной антенны, составляет 12 дБ (см. рис. 4.13). При расчете помех используют кривые напряженности поля для 10% времени при моно вещании и для 1% при стереовещании [2].

Результаты расчетов зон обслуживания и координационного расстояния для ОВЧ ЧМ станций, имеющих одинаковые технические параметры, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Зависимость радиуса зоны и координационного расстояния ОВЧ ЧМ передатчика от параметров аппаратуры

$P_{\Sigma}$ , дБкВт	$H_{\Sigma}$ , м	$E_{мин}$ , дБ/мкВ/м	$R_D$ , км	$R_K$ , км	$P_{\Sigma}$ , дБкВт	$H_{\Sigma}$ , м	$E_{мин}$ , дБ/мкВ/м	$R_D$ , км	$R_K$ , км
-10	100	46	24	120	-10	100	54	15	225
0	100		40	190	0	100		24	325
+7	150		60	250	+7	150		41	450
+13	250		80	325	+13	250		60	490

Для исключения взаимного влияния ТВ и ОВЧ ЧМ передатчиков в пунктах, где установлены ТВ передатчики второго и пятого каналов, ОВЧ ЧМ передатчикам запрещается использовать частоты 65,9...68 и 100...102 МГц и наоборот.

## 4.2.2. Параметры регулярных сетей ТВ и ЗВ вещания

Территориальный разнос в идеализированных сетях вещания определяется радиусом зоны обслуживания станции  $R_{\text{вол}}$  и минимально допустимым расстоянием  $R_{\text{ст}}$  между станциями, работающими в совмещенных каналах. При этом предполагают, что отдельные каналы распределены так, что межканальные помехи в идеализированных сетях отсутствуют. В ТВ вещании к ним относят помехи по каналам смежным  $n \pm 1$ , гетеродинным  $n \pm 4$  и зеркальным (только в дециметровом диапазоне волн)  $n \pm 8$  и  $n \pm 9$ . Число межканальных помех составляет 4 и 8 в метровом и дециметровом диапазоне волн соответственно. В ОВЧ ЧМ стереовещании к межканальным помехам относят помехи по соседним каналам  $n \pm 1$ ,  $n \pm 2$ ;  $n \pm 3$ ;  $n \pm 4$  в диапазоне 66...74 МГц и  $n \pm 1$ ;  $n \pm 2$  и  $n \pm 3$  в диапазоне 100...108 МГц. Число межканальных помех составляет 8 и 6 в нижнем и верхнем частотных диапазонах соответственно.

Значения территориального разноса мощных ТВ станций в идеализированных сетях вещания для I–V диапазонов можно определить по данным табл. 4.5 и 4.6, рассчитанным на ПК в метровом и дециметровом диапазонах волн. В расчетах участвовали 12 мешающих станций совмещенного канала, расположенных относительно полезной станции в вершинах двух правильных шестиугольников. При этом использовалась известная модель однородной сети регулярной структуры, реализованная на ПК в виде схемы (рис. 4.15), на которой исследуемый передатчик (0) находится в окружении 18 соканальных помех, расположенных в углах трех правильных шестиугольников с расстояниями  $D_1$ ,  $\sqrt{3}D_1$ ,  $2D_1$  соответственно. Как известно из теории регулярных сетей, такая ситуация справедлива для каждого передатчика регулярной сети при использовании числа  $N$  частот, равного ромбическому числу [6]. Поэтому решения, полученные для предлагаемой схемы, справедливы для сети в целом.

Таблица 4.5. Расчетные данные однородных сетей ТВ вещания в диапазоне метровых волн

Мощность передатчика, дБкВт (кВт)	Эффективная высота антенны, м	I диапазон, $E_{\text{мин}} = 50$ дБ/мкВ/м		II диапазон, $E_{\text{мин}} = 54$ дБ/мкВ/м		III диапазон, $E_{\text{мин}} = 57$ дБ/мкВ/м		Расстояние прямой видимости, км
		$R_n$ , км	$R_k$ , км	$R_n$ , км	$R_k$ , км	$R_n$ , км	$R_k$ , км	
0 (1)		$G = 7,8$ дБ, $\eta = -0,5$ дБ, $P_{\Sigma} = 7,3$ дБкВт		$G = 9,8$ дБ, $\eta = -0,7$ дБ, $P_{\Sigma} = 9,1$ дБкВт		$G = 11,5$ дБ, $\eta = -1,2$ дБ, $P_{\Sigma} = 10,3$ дБкВт		
	100	41	318	34	249	37	300	54
	200	55	333	47	260	51	313	71
	300	65	346	57	271	60	326	84
	400	72	356	63	280	67	336	95
500	78	366	70	290	74	346	105	
7 (5)		$G = 7,8$ дБ, $\eta = -0,5$ дБ, $P_{\Sigma} = 14,3$ дБкВт		$G = 9,8$ дБ, $\eta = -0,7$ дБ, $P_{\Sigma} = 16,1$ дБкВт		$G = 11,5$ дБ, $\eta = -1,2$ дБ, $P_{\Sigma} = 17,3$ дБкВт		
	100	56	381	47	302	51	360	54
	200	70	397	61	315	65	376	71
	300	81	412	72	327	76	390	84
	400	89	423	78	337	83	401	95
500	96	435	86	347	91	413	105	

Мощность передатчика, дБкВт (кВт)	Эффективная высота антенны, м	I диапазон, $E_{\text{мин}} = 50$ дБ/мкВ/м		II диапазон, $E_{\text{мин}} = 54$ дБ/мкВ/м		III диапазон, $E_{\text{мин}} = 57$ дБ/мкВ/м		Расстояние прямой видимости, км
		$R_{\Sigma}$ , км	$R_{\text{к}}\text{, км}$	$R_{\Sigma}$ , км	$R_{\text{к}}\text{, км}$	$R_{\Sigma}$ , км	$R_{\text{к}}\text{, км}$	
14 (25)		$G = 9,8$ дБ, $\eta = -0,7$ дБ, $P_{\Sigma} = 23,1$ дБкВт		$G = 11,5$ дБ, $\eta = -1,0$ дБ, $P_{\Sigma} = 24,5$ дБкВт		$G = 11,5$ дБ, $\eta = -1,5$ дБ, $P_{\Sigma} = 24,0$ дБкВт		
	100	95	491	77	374	87	461	71
	200	108	508	89	387	99	478	84
	300	116	520	96	397	107	491	95
	400	124	533	104	409	116	503	105
	500	133	546	113	421	123	515	114
17 (50)		$G = 9,8$ дБ, $\eta = -0,7$ дБ, $P_{\Sigma} = 26,1$ дБкВт		$G = 11,5$ дБ, $\eta = -1,0$ дБ, $P_{\Sigma} = 27,5$ дБкВт		$G = 11,5$ дБ, $\eta = -1,5$ дБ, $P_{\Sigma} = 27,0$ дБкВт		
	100	105	525	86	402	96	495	71
	200	118	543	97	416	109	512	84
	300	127	556	106	428	118	525	95
	400	135	569	114	440	126	538	105
	500	143	582	122	452	134	551	114

Таблица 4.6. Расчетные данные регулярных сетей ТВ станций в IV и V диапазонах

Мощность передатчика, дБкВт (кВт)	Эффективная высота антенны, м	IV, V диапазоны, $E_{\text{мин}} = 70$ дБ/мкВ/м		Расстояние прямой видимости, км
		$R_{\Sigma}$ , км	$R_{\text{к}}\text{, км}$	
7 (5)		$G = 14,8$ дБ, $\eta = -1,5$ дБ, $P_{\Sigma} = 20,3$ дБкВт		
	100	26	221	54
	200	36	233	71
	300	45	243	84
	400	48	250	95
	500	50	257	105
13 (20)		$G = 14,8$ дБ, $\eta = -1,5$ дБ, $P_{\Sigma} = 26,3$ дБкВт		
	100	45	277	71
	200	54	288	84
	300	59	296	95
	400	66	303	105
	500	73	311	114

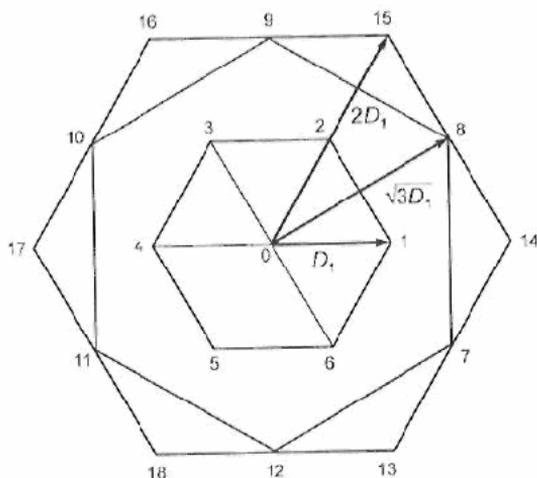


Рис. 4.15. Помехи по совмещенному каналу

Исходные данные расчетов: напряженность поля полезной станции на границе зоны обслуживания равна минимальной используемой напряженности поля в соответствующем частотном диапазоне; кривые распространения:  $E(50, 50)$  — для полезного сигнала,  $E(50, 10)$  и  $E(50, 1)$  — для мешающего сигнала в метровом и дециметровом диапазонах волн соответственно; вероятность обеспечения 50% мест приема  $p_0 = 0,5$  при расчете множественности помехи упрощенным методом умножения; СНЧ передатчиков составляет  $\pm 2/3$  строчной частоты; защитное отношение в совмещенном канале 45 дБ, поправка к этому значению в соответствии с рис. 4.7 при СНЧ  $= \pm 2/3$  строчной частоты составляет 15 дБ; поляризация волн передающих антенн всех станций одинакова; поправки на помехозащищенность приемных антенн телевизоров стандартные в каждом частотном диапазоне (см. рис. 4.13).

В таблицах приведены рассчитанные предельные расстояния прямой видимости; при этом в качестве высот передающих антенн взяты их эффективные высоты, а высота приемных антенн принята равной 10 м [2].

Территориальный разнос мощных ОВЧ ЧМ станций в идеализированных сетях для моно- и стереовещания приведены в табл. 4.7. Методика расчетов аналогична методике, по которой рассчитывались идеализированные сети ТВ станций. Исходные данные также аналогичны, но при этом использовались минимальная используемая напряженность поля, кривые распространения мешающего сигнала  $E(50, 10)$  и  $E(50, 1)$ , а также значения защитных отношений 31 и 42 дБ для моно- и стереовещания соответственно.

В частотном планировании считается, что радиус зоны обслуживания ограничивается приблизительно предельным расстоянием прямой видимости. Это объясняется тем, что за радиогоризонтом довольно резко понижается качество приема вследствие заметного замирания сигнала, связанного с отражением от тропосферы. В связи с тем, что у ТВ станций метрового диапазона волн с мощностью передатчиков 25 и 50 кВт, а также у ОВЧ ЧМ станций моновещания (см. табл. 4.5–4.7) радиус зоны обслуживания в некоторых случаях на 30% превышает расстояние прямой видимости, в соответствии с вышеизложенным, за радиус зоны обслуживания принимается расстояние прямой видимости.

Таблица 4.7. Расчетные данные регулярных сетей ОВЧ ЧМ станций

Мощность передатчика, дБкВт (кВт)	Эффективная высота антенны, м	Моно вещание $E_{\text{мин}} = 46$ дБ/мкВ/м		Стереовещание $E_{\text{мин}} = 54$ дБ/мкВ/м		Расстояние прямой видимости, км
		$R_D$ , км	$R_K$ , км	$R_D$ , км	$R_K$ , км	
6 (4)		$G = 7,8$ дБ, $\eta = -0,7$ дБ, $P_{\Sigma} = 13,1$ дБкВт				
	100	62	456	44	496	54
	200	78	476	59	510	71
	300	89	495	69	521	84
	400	97	508	76	532	95
	500	105	521	83	545	105
11,8 (15)		$G = 7,8$ дБ, $\eta = -1,0$ дБ, $P_{\Sigma} = 18,6$ дБкВт				
	100	94	542	71	570	71
	200	106	562	82	584	84
	300	115	576	90	597	95
	400	123	589	97	609	105
	500	131	603	105	622	114

Приведенные в табл. 4.5–4.7 данные позволяют рассчитать необходимое число частотных каналов при учете помех в совмещенном канале. Например, для идеализированной сети ТВ вещания, состоящей из типовых станций с мощностью передатчиков 5 кВт (эффективная излучаемая мощность 17,3 дБ) при эффективной высоте передающих антенн 200 м необходимое число частотных каналов в III диапазоне  $N = 1/3(315/61)^2 \approx 9$ . Межканальные помехи вызывают увеличение необходимого числа частотных каналов. В ТВ вещании к ним относят помехи по каналам смежным  $n \pm 1$ , гетеродинным  $n \pm 4$  и зеркальным (только в дециметровом диапазоне волн)  $n \pm 8$  и  $n \pm 9$ .

Необходимое число частотных каналов при учете всех помех складывается из необходимого числа частотных каналов при учете помех в совмещенном канале и межканальных помех. Например, для рассчитанной выше идеализированной сети ТВ вещания необходимое число частотных каналов равно  $13(9 + 4)$ . Ближайшее ромбическое число, равное или большее указанного (см. табл. 4.1), составляет 13. Следовательно, для создания идеализированной сети вещания требуется 13 каналов. Таким образом, в метровом диапазоне волн может быть создана только однопрограммная идеализированная сеть ТВ вещания, при отступлении от которой необходимое число частотных каналов увеличивается.

#### 4.2.3. Метод координационных колец

**Методы планирования.** При планировании передающих сетей ТВ и ОВЧ ЧМ вещания широко применяют методы, основанные на использовании регулярной сетки элементарных треугольников, в вершинах которых располагаются передатчики [2]. Эти методы весьма эффективны, когда планирование проводится для относительно равнинной местности, если

существующая сеть не накладывает существенных ограничений, а также в случае распределения каналов в новом диапазоне.

В условиях реальной передающей сети целесообразнее пользоваться другими методами, например использовать для этой цели задачу из теории графов о раскраске вершин [1]. Отметим, что применение точного алгоритма при раскраске графа общего вида с ростом числа вершин приводит к экспоненциальному увеличению времени решения задачи, а потому, требует больших затрат машинного времени [1]. Что касается известных эвристических алгоритмов раскраски вершин графа больших размеров, то, как показывает опыт, число цветов, полученное при решении данной задачи, намного превышает хроматическое.

Анализ причин неоптимальности решения поставленной задачи перечисленными методами продемонстрировал, что они вызваны наложением запрета на раскраску в один цвет вершин, находящихся на расстоянии меньше координационного. В то же время не существует условий, по которым в один цвет раскрашиваются вершины, удаленные на расстояние, большее либо равное координационному. Именно этот факт — причина неоптимальной раскраски. Таким образом, для получения раскраски, близкой к оптимальной, нужно ввести ограничение на расстояние между вершинами при их раскраске в один цвет.

**Постановка задачи.** Пусть множество передатчиков реальной передающей сети рассматривается как объединение двух подмножеств: действующей сети и планируемой, содержащих множество действующих и планируемых передатчиков.

Существующая сеть состоит из действующих передатчиков некоторого региона. Для каждого из этих передатчиков однозначно определяются его географические координаты, эффективная высота подвеса антенны, излучаемая мощность, требуемый радиус зоны обслуживания, частотный канал, в котором он работает. Для таких передатчиков нетрудно вычислить коэффициент использования каждого из них:

$$Q = S_p / S_{ид}, \quad (4.15)$$

где  $S_p$  и  $S_{ид}$  — площади зоны вещания передатчика соответственно с учетом всех помех в сети и в беспомеховой обстановке. Расчет зон вещания проводился с помощью автоматизированной системы анализа ТВ сети путем расчета радиусов зоны вещания по 12 азимутальным направлениям [6].

Для планируемых передатчиков также определяют географические координаты и эффективную высоту антенны. Мощность передатчика для планируемого диапазона выбирается из дискретной сетки мощностей. Частотный же канал не определен, хотя, возможно, установлен приоритет частотного присвоения.

Суть задачи оптимизации частотного плана состоит в присвоении планируемым передатчикам частотных каналов, при котором минимизируется уровень взаимных помех в сети и соответственно увеличивается коэффициент использования передатчиков. При этом необходимо учитывать все помехи по совмещенному и соседнему каналам, а также невозможность использования в одном географическом пункте совмещенных, соседних, зеркальных и несовместимых по гетеродину каналов. Трудность задачи заключается в том, что реальная сеть неоднородна и нерегулярна, а число частотных каналов ограничено. Поэтому в случае неоптимального присвоения частотных каналов передатчикам сети помеховая обстановка обострится, а коэффициент использования (4.15) снизится.

**Анализ задачи.** Независимо от способа решения поставленной задачи в процессе присвоения частотных каналов планируемым передатчикам сети многократно возникает один и тот же вопрос: можно или нельзя присвоить некоторому передатчику данный частотный канал? Отрицательный ответ следует в трех случаях: если данный канал несовместим с действующим или уже является присвоенным каналом другого передатчика, расположенного в

одном пункте с рассматриваемым; если существует хотя бы один действующий или планируемый, но не расположенный в одном пункте с рассматриваемым, передатчик с уже присвоенным каналом, создающий помеху по данному каналу (соседнему или совмещенному), которая превышает допустимый уровень; если присвоение данного канала рассматриваемому передатчику ведет к созданию недопустимой помехи хотя бы одному действующему или планируемому удаленному передатчику с уже назначенным каналом.

Первый случай очевиден, во втором и третьем — взаимодействие передатчиков предлагается определять с помощью коэффициента взаимного влияния (КВВ), который показывает, насколько изменяются радиусы зон вещания передающих станций относительно максимальных зон под воздействием взаимных помех. Этим дается количественная оценка степени взаимного влияния передатчиков [6]. Коэффициент взаимного влияния определяется по формуле

$$KBB = \left\{ \left[ 1 - \min(R_{pi1}; R_{pj2}) / R_{maxi} \right] \left[ 1 - \min(R_{pj1}; R_{pi2}) / R_{maxj} \right] \right\}, \quad (4.16)$$

где  $R_{pi1}, R_{pj1}$  — реальные радиусы зон вещания  $i$ -го и  $j$ -го передатчиков по направлению друг к другу с учетом влияния помехи, км;  $R_{pi2}, R_{pj2}$  — реальные радиусы зон вещания  $i$ -го и  $j$ -го передатчиков в противоположных направлениях с учетом влияния помехи, км;  $R_{maxi}, R_{maxj}$  — радиусы зон вещания  $i$ -го и  $j$ -го передатчиков без учета влияния помех, км, определяемые из условия

$$E_c(R_{max}, H_a) = E(50, 50, R_{max}, H_a) + P_{\Sigma} = E_{min}.$$

Радиус  $R_{pi}$  определяется из условия

$$E(50, 50, R_{pi}, H_a) + P_{\Sigma_i} - E(50, 10, d, H_a) - P_{\Sigma_j} = A_s.$$

КВВ учитывает взаимные помехи только между парами передатчиков. Его положительные значения  $R_p < R_{max}$  указывают на недостаточное использование технических ресурсов передатчиков из-за больших взаимных помех. В этом случае должно быть задано максимальное допустимое уменьшение  $R_p$ , определяемое наперед заданной величиной  $\varepsilon$ , которая связана с коэффициентом использования передатчика (4.15) соотношением

$$Q = (1 - \varepsilon)^2. \quad (4.17)$$

Отрицательный КВВ  $R_p > R_{max}$  свидетельствует о редком присвоении одинаковых частот передатчикам, что хотя и ведет к отсутствию помех между ними, но снижает эффективность использования спектра, величина которой определяется наперед заданным числом  $\delta$ . Таким образом, оптимальное применение ресурсов передатчика и эффективное использование спектра предлагается определять при условии

$$\delta \leq KBB \leq \varepsilon. \quad (4.18)$$

Значения  $\varepsilon$  и  $\delta$  задаются эмпирически. Если  $KBB > \varepsilon$ , то уровень взаимных помех считается недопустимо высоким; если же  $KBB < \delta$ , то снижается эффективность использования спектра.

**Решение задачи.** Пусть частотный канал  $K$  присвоен некоторому передатчику. Тогда вокруг него выделяется множество передатчиков, которым критерий (4.18) запрещает назначить канал  $K$  ввиду сильных взаимных помех с передатчиком  $A$ .

Территория, на которой расположены эти передатчики, по форме напоминает круг (для однородной сети это действительно круг). В его центре возникает малый круг, находящимся в нем передатчикам нельзя присваивать не только канал  $K$ , но и соседние  $K \pm 1$  каналы. Любому же из оставшихся вне большого круга передатчиков этот частотный канал назначить можно. Так появляется свобода выбора передатчика для очередного назначения ему

канала  $K$ . В то же время критерий оптимальности парных частотных присвоений, примененный к каждому из передатчиков в паре с передатчиком  $A$ , показывает, что совместное присвоение канала  $K$  близко к оптимальному лишь для некоторых из этих пар.

Передатчики, образующие с передатчиком  $A$  оптимальные пары, расположены на территории, по форме напоминающей кольцо (в однородной сети — строгое кольцо) с центром в точке  $A$ , непосредственно охватывающее круг, формируемый по критерию (4.18) (рис. 4.16). Множество этих передатчиков будем называть координационным кольцом передатчика  $A$ , которое строится следующим образом. Рассчитываются, например, КВВ передатчика  $A$  с каждым передатчиком, которому можно присвоить очередной канал. Если этот коэффициент находится в заданных пределах, определяемых (4.18), то рассматриваемый передатчик попадает в координационное кольцо передатчика  $A$ . Поставив задачу максимально загрузить каждый канал, не уменьшая чрезмерно коэффициента использования передатчиков, для очередного присвоения канала  $K$  следует выбирать передатчик из координационного кольца, поскольку находящиеся в нем передатчики удовлетворяют одновременно обоим требованиям. Такие присвоения действительно равноценны по отношению к присвоению канала  $K$  передатчику  $A$ , поэтому проблема выбора отпадает.

Выберем из координационного кольца передатчик  $B$  (рис. 4.17). Присвоим ему частотный канал  $K$  и сформируем вокруг него новое координационное кольцо. Теперь для очередного присвоения канала  $K$  нужно выбирать передатчик, находящийся на пересечении координационных колец передатчиков  $A$  и  $B$ . Действительно, назначение канала  $K$  передатчику  $C$ , выбранному из этого пересечения, удовлетворяет критерию оптимальности частотных присвоений по отношению сразу к двум передатчикам  $A$  и  $B$ , которым уже присвоен канал  $K$ . Дальнейший ход присвоения канала  $K$  очевиден [4, 5].

Аналогично можно распределить каждый частотный канал, предварительно сформировав координационные кольца действующих передатчиков. Если полученный в результате работы автоматизированной системы частотный план не удовлетворяет заданным требованиям (число каналов больше допустимого, низкий коэффициент использования передатчиков), необходимо повторить процесс частотного планирования, изменив значения величин  $\varepsilon$  и  $\delta$  — параметров координационного кольца.

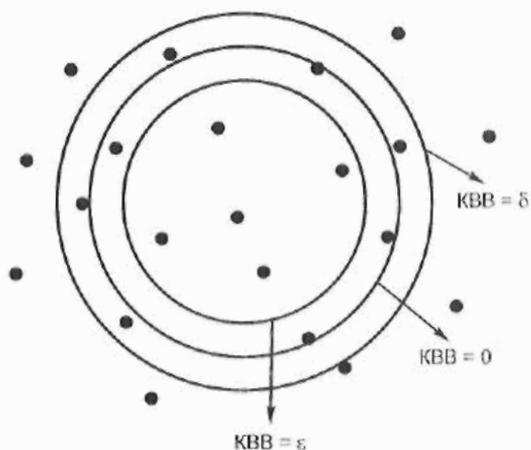


Рис. 4.16. Построение координационного кольца

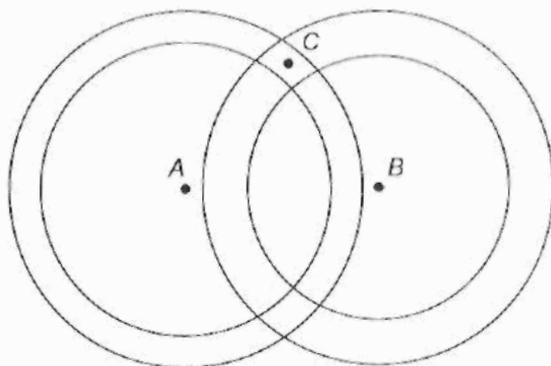


Рис. 4.17. Пересечение координационных колец

Таким образом, метод координационных колец позволяет решить задачу оптимального частотного планирования передающих сетей радиосвязи с учетом всех ограничений действующей сети. Хотя вычислительная сложность метода высока (основную долю составляют расчеты показателя оптимальности частотных присвоений — коэффициента взаимного влияния), его реализация на существующих типах ПК вполне допустима.

**Алгоритм распределения частотных каналов методом координационных колец.** Структурная схема алгоритма распределения частотных каналов методом координационных колец приведена на рис. 4.18. Согласно приведенной схеме, последовательность проведения частотных присвоений будет следующей.

1. Вначале в системе формируется массив номеров каналов передатчиков  $GR$ , число элементов  $M$  которого равно общему числу действующих и планируемых передатчиков. Для действующих передатчиков в данном массиве фиксируются номера их каналов; значения элементов массива для планируемых передатчиков равно нулю. Номер очередного присваиваемого канала  $NK$  обнуляется.

2. Далее проверяется условие: если есть элементы массива  $GR$ , равные нулю, то переходим на следующий номер очередного присваиваемого канала  $NK = NK + 1$ . Иначе, если всем передатчикам присвоен частотный канал, алгоритм заканчивает свою работу.

3. Формируется массив помех  $BG$  для очередного присваиваемого канала. В него заносятся номера всех передатчиков, работающих в каналах  $NK - 1$ ,  $NK + 1$  и  $NI$ .

4. Создается массив признаков  $PR$ , в котором помечаются действующие и распределенные станции, передатчики которых имеют канал несовместимый с текущим присваиваемым в одном пункте (несовместимость по совмещенному, соседнему, зеркальному и гетеродинамному каналам).

5. Формируется массив свободных передатчиков  $S$ . Для этого на станциях, не помеченных в массиве  $PR$ , выбирается по одному передатчику, и их номера заносятся в массив  $S$ .

6. Если массив  $S$  пуст, переходим на пункт 2. Иначе формируется координационное кольцо вокруг очередной помехи из массива  $BG$  до тех пор, пока все мешающие передатчики не будут рассмотрены. Кроме того, после каждого присвоения канала  $NK$  очередному передатчику из массива  $S$  данный передатчик переходит в разряд помех, его номер записывается в массив  $BG$  и вокруг него формируется координационное кольцо. Если учтено влияние всех помех, т.е. вокруг всех передатчиков из массива  $BG$  сформированы координационные кольца, производится распределение канала  $NK$  очередному передатчику из массива  $S$ .

7. Формирование координационного кольца вокруг очередного мешающего передатчика  $BG(i)$ :

а) рассчитываются коэффициенты взаимного влияния (КВВ)  $BG(i)$ -го передатчика с каждым свободным из массива  $S$ ;

б) из массива  $S$  исключаются те передатчики, КВВ которых с помехой больше  $\varepsilon$  — внутренней границы координационного кольца. Присвоим таким передатчикам название «черные»;

в) определяются и записываются в массив  $SS$  состояния свободных передатчиков, КВВ которых меньше  $\varepsilon$ . Планируемым передатчикам, попавшим в координационные кольца ( $\delta \leq \text{КВВ} \leq \varepsilon$ ) двух и более мешающих передатчиков, присвоим название «красные». Название «розовые» присвоим планируемым передатчикам, попавшим в координационное кольцо одного  $BG(i)$ -го передатчика. Свободным передатчикам, коэффициенты взаимного влияния которых со всеми мешающими передатчиками меньше  $\delta$ , присвоим название «белые»;

г) заполняем массив  $SSS$ , в который для каждого передатчика из массива  $S$  записываем максимальный из всех коэффициент взаимного влияния этого свободного с мешающими передатчиками;

д) переходим на пункт 6.

8. Распределение канала  $NK$  очередному передатчику из массива  $S$ :

а) в массиве  $SS$  ищется первый «красный» передатчик, т.е. планируемый передатчик, имеющий наибольшее количество запретов на частотные присвоения от действующих и запланированных на предыдущих этапах работы данного алгоритма. Переходим на пункт 8г;

б) при отсутствии «красного» ищется первый «розовый». Переходим на пункт 8г;

в) при отсутствии «розового» передатчика определяется «белый» с максимальным КВВ из массива  $SSS$ , т.е. берется для планирования свободный передатчик, наиболее близко расположенный к координационному кольцу, что обеспечивает частое использование рассматриваемого канала. Переходим на пункт 8г;

г) присваиваем канал  $NK$  выбранному передатчику, заносим этот передатчик в массив помех  $BG$ , исключая его из массивов  $S$ ,  $SS$ ,  $SSS$ . Переходим на пункт 6.

9. Конец алгоритма.

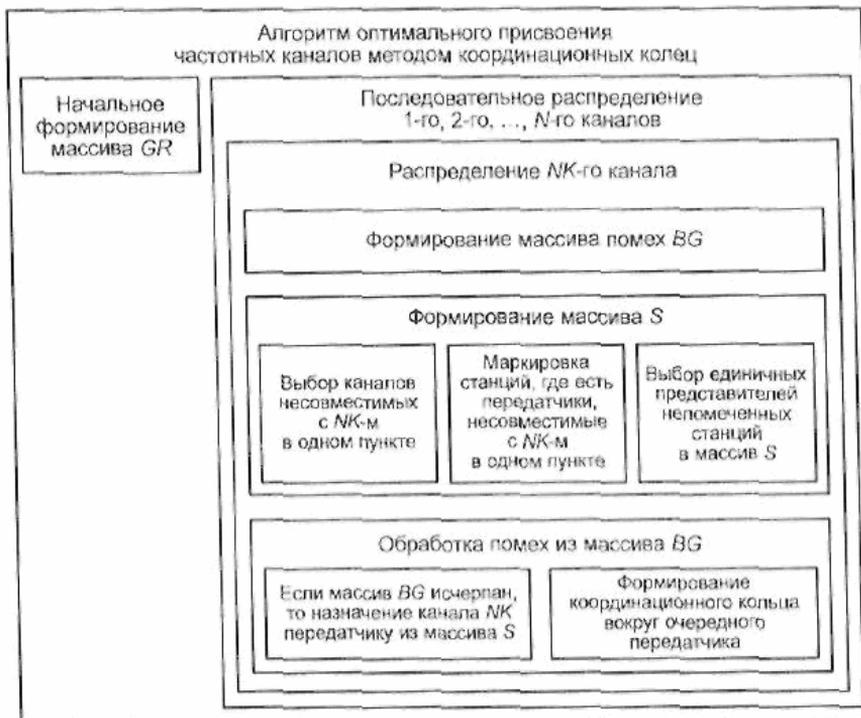


Рис. 4.18. Структурная схема алгоритма метода координационных колец

**Результаты машинных экспериментов распределения частотных присвоений в ТВ сети методом координационных колец.** На основе предложенного метода была разработана автоматизированная система частотного планирования, с помощью которой проведено распределение частотных каналов в однородной регулярной сети, состоящей из 900 передатчиков. Полученный результат совпал с известным оптимальным распределением частотных каналов в такой сети [2].

Разработанная автоматизированная система была также использована для оптимизации частотного плана фрагмента действующей сети. Этот фрагмент содержит 350 станций (986 передатчиков), расположенных в Европейской части РФ, и включает территорию в 2736 тыс. км<sup>2</sup>, на которой обеспечивается трехпрограммное ТВ вещание; 260 передатчиков —

действующие, остальные — планируемые. Частотные присвоения действующих передатчиков оставались без изменения. При распределении частот планируемым передатчикам учитывались несовместимости каналов в одном пункте, а также помехи от передатчиков, работающих в совмещенных и смежных каналах.

В результате при  $\epsilon = 0,08$  и  $\delta = 0$  был получен новый вариант частотного плана указанного фрагмента. Был произведен анализ распределения передатчиков по частотным каналам в новом и существующем частотных планах. В новом используются только каналы 21–51 дециметрового диапазона, а в действующем — 21–60. Кроме того, по сравнению с действующим планом возросло число передатчиков, которым присвоены каналы метрового диапазона (с 68 до 118).

Таким образом, при заданных параметрах  $\epsilon$  и  $\delta$  новый частотный план обеспечивает экономию спектра, отведенного для ТВ вещания, и увеличивает число передатчиков, работающих в метровом диапазоне волн, затраты на единицу площади вещания в котором значительно ниже, чем в дециметровом диапазоне.

После синтеза ТВ сети был проведен анализ существующего и вновь разработанного планов. В результате было получено, что среднее значение коэффициента использования передатчика для существующего плана

$$Q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_p}{\sum_{i=1}^N S_{\text{ис}}}} = 0,97.$$

Частотный план, составленный с использованием метода координационных колец, обеспечивает приращение площади вещания  $\Delta S_p = 220$  тыс. км<sup>2</sup> и  $Q_{\text{ср}} = 0,98$ . При этом с учетом множественности помех минимальное значение коэффициента использования  $Q$  планируемых передатчиков оказалось равно 0,92. Как видно, по эффективности использования каналов и по сетевым параметрам  $Q_{\text{ср}}$  и  $\sum S_p$  частотный план ТВ сети, полученный с использованием метода координационных колец, превосходит действующий. Необходимо подчеркнуть, что из-за отсутствия исходных данных при автоматизированном составлении нового варианта частотного плана не учитывались ограничения, накладываемые на использование частот при совмещении с другими службами, а также граничные условия рассматриваемого региона.

**Выводы.** Проведенные машинные эксперименты позволяют сделать вывод о возможности использования разработанной на основе метода координационных колец автоматизированной системы частотных присвоений для пересмотра действующих частотных планов, их оптимизации, а также для составления новых частотных планов при вводе новых диапазонов. Кроме того, небольшие временные затраты позволяют синтезировать несколько вариантов частотного плана, из которых можно выбрать оптимальный по заданным критериям.

#### 4.2.4. Технические основы планирования цифровых систем вещания

**Система цифрового звукового вещания.** Цифровая система звукового вещания DAB предназначена для получения мультисервисного звукового вещания для приема на мобильные, переносные и стационарные приемники в условиях пересеченной местности. Она предназначена для работы на любой частоте до 3000 МГц в сетях наземного (T-DAB), спутникового (S-DAB) и кабельного (C-DAB) вещания. Система DAB разработана как гибкая многоцелевая цифровая вещательная система, которая может поддерживать широкий диапазон источников сообщений со скоростями от 8 до 320 кбит/с и несколько уровней допол-

нительного канального кодирования [7, 8]. В тяжелых условиях многолучевости, которые существуют в условиях мобильного и портативного приема, появляются селективные замирания, поэтому для минимизации влияния многолучевости на прием сигналов в системе DAB используется широкополосный сигнал с шириной полосы 1,54 МГц.

Один из путей обеспечения качественного приема в рассматриваемых условиях — использование многочастотного сигнала COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), в котором:

- используется временное и частотное перемежение и коды, корректирующие ошибки (буква «С» в аббревиатуре COFDM);
- ортогональность несущих обеспечивается математической компоновкой разделения несущих  $\Delta f$  и использованием длительности символа  $T_U = 1/\Delta f$ ;
- используется дополнительный защитный интервал  $T_G$  для уменьшения межсимвольной интерференции;
- используется QPSK-модуляция каждой из несущих частот с последующей дифференциальной демодуляцией в приемнике.

В системе DAB в целях борьбы с доплеровским сдвигом частоты и изменением задержки сигнала для мобильного приема в условиях многолучевости (пассивное эхо) и активного эха, создаваемого соканальными передатчиками в одночастотных сетях, предусмотрена работа в четырех режимах. Характеристики этих режимов приведены в табл. 4.8.

**Таблица 4.8.** Режимы работы DAB

Режим	Режим I	Режим IV	Режим II	Режим III
Типичное использование	Наземное вещание, VHF диапазон	Наземное вещание в городе, L диапазон	Наземное вещание, L диапазон	Спутниковое вещание, L диапазон
Число несущих $n$	1536	768	384	192
Разнос несущих $\Delta f$ , кГц	1	2	4	8
Длительность символа $T_U$ , мкс	1000	500	250	125
Длительность защитного интервала $T_G$ , мкс	246	123	62	31
Общая длительность символа $T_S = T_U + T_G$ , мкс	1246	623	312	156

Для исправления ошибок в системе DAB используется сверточное кодирование каждого источника. В стандарте ETSI предусматривается пять уровней защиты для звуковых сигналов со скоростями кодирования от 1/3 до 3/4 и восемь уровней защиты для служебных данных с использованием процедуры прореживания в сверточном кодере.

В табл. 4.9 приведены параметры системы DAB для различных уровней защиты звуковых сигналов. В таблице приводятся значения отношения сигнал/шум на входе приемника по радиочастоте при условии, что на выходе декодера сверточного кода (декодера Витерби) обеспечивается коэффициент ошибок  $P_{ош} = 10^{-4}$ . При этом рассматриваются три типа канала распространения: гауссовский, райсовский и релейевский. Необходимо заметить, что суммарная скорость передачи сигнала DAB с учетом корректирующего кода для всех уровней защиты составляет 2,3 Мбит/с.

Таблица 4.9. Уровни защиты в DAB

Уровень защиты	Скорость кода, Мбит/с	С/Ш, дБ, при $P_{\text{ош}} = 10^{-4}$ для канала			Скорость передачи, Мбит/с
		гауссовского	райсовского	релеевого	
1	0,34	5,9	7,1	12,1	0,78
2	0,43	6,7	8,0	12,6	0,99
3	0,5	7,4	8,8	13,3	1,15
4	0,6	8,4	10,0	14,9	1,38
5	0,75	10,2	12,0	18,6	1,73

При планировании сети DAB обычно используется третий уровень защиты.

Структурная схема обработки входных сигналов при получении DAB сигнала приведена на рис. 4.19.

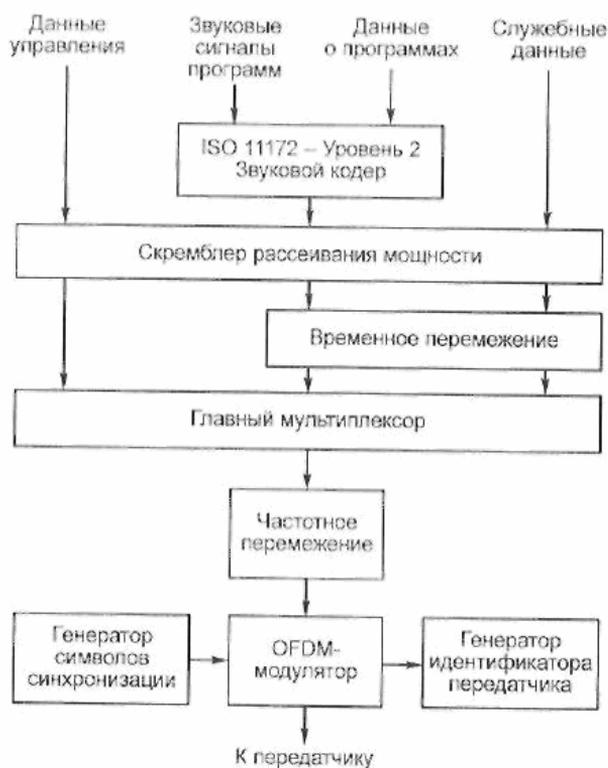


Рис. 4.19. Формирование DAB сигнала

При планировании сети цифрового вещания необходимо знать минимальную мощность сигнала на входе приемника, при которой на выходе декодера Витерби обеспечивается коэффициент ошибок  $P_{\text{ош}} = 10^{-4}$ . Она определяется шириной полосы пропускания приемника и его коэффициентом шума:

$$P_{\text{п}} = F + 10 \log k T_0 B, \quad P_{S_{\text{min}}} = P_{\text{п}} + C/N = U_{S_{\text{min}}}^2 / Z_f, \quad (4.19)$$

где  $B$  — шумовая полоса приемника, Гц;  $C/N$  — отношение сигнал/шум на радиочастоте, дБ;  $f$  — радиочастота, МГц;  $F$  — коэффициент шума приемника, дБ;  $P_{\text{п}}$  — мощность шума на входе приемника, дБВт;  $P_{S_{\text{min}}}$  — минимальная мощность сигнала на входе приемника,

дБВт;  $U_{\text{min}}$  — минимальное напряжение на входе приемника, дБмкВ;  $Z_i = 75$  Ом — входной импеданс приемника;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц·град — постоянная Больцмана;  $T_0 = 290$  К — абсолютная температура.

Результаты расчетов, проведенных по формулам (4.19) для третьего уровня защиты и гауссовского канала (табл. 4.9), приведены в табл. 4.10.

**Таблица 4.10.** Минимальная мощность сигнала на входе приемника

Частоты (диапазоны III и L) $f$ , МГц	200	1470
Эквивалентная шумовая полоса приемника $B$ , Гц	$1,536 \cdot 10^6$	$1,536 \cdot 10^6$
Коэффициент шума приемника $F$ , дБ	7	6
Мощность шума на входе приемника $P_n$ , дБВт	-135,1	-136,1
Отношение сигнал/шум $C/N$ , дБ	7,4	7,4
Минимальная мощность сигнала на входе приемника $P_{\text{сигн}}$ , дБВт	-127,4	-128,4
Минимальное напряжение на входе приемника $U_{\text{min}}$ , дБмкВ	11	10

**Система цифрового телевизионного вещания.** В системе цифрового телевизионного вещания (Digital Video Broadcasting, DVB) передаваемые данные включают информацию об изображении и звуковом сопровождении, а также любые дополнительные сведения. Условие передачи этой информации в системе DVB-T только одно — данные должны быть закодированы в виде пакетов транспортного потока MPEG-2. В этом смысле стандарт описывает контейнер, приспособленный для доставки пакетированных данных в условиях наземного телевидения [9].

Для системы DVB-T ни содержание контейнера, ни происхождение данных не имеют значения, она лишь приспособливает выходные данные транспортного мультиплекса MPEG-2 к свойствам и характеристикам канала передачи наземного ТВ вещания, стремясь наиболее эффективно донести их к приемнику. То есть стандарт определяет структуру передаваемого потока данных, систему канального кодирования и модуляции для мультипрограммных служб наземного телевидения, работающих в форматах ограниченной, стандартной, повышенной и высокой четкости.

Особенностью DVB-T, как и T-DAVB, при передаче транспортных пакетов MPEG-2 является гармоничное сочетание системы канального кодирования и способа модуляции OFDM. В системе DVB-T используется сочетание двух видов кодирования — внешнего и внутреннего, рассчитанных на борьбу с ошибками различной структуры, частоты и статистических свойств и обеспечивающих при совместном применении практически безошибочную работу. Если благодаря работе внутреннего сверточного кодирования частота ошибок на выходе внутреннего декодера не превышает  $P_{\text{ош}} = 2 \cdot 10^{-4}$ , то система внешнего кодирования, где используется код Рида–Соломона, доводит частоту ошибок на входе демультиплекса MPEG-2 до значения  $P_{\text{ош}} = 10^{-11}$ , что соответствует практически безошибочной работе (ошибка появляется примерно один раз в течение часа).

Стандарт DVB-T допускает два режима работы OFDM: с 2048 несущими частотами (режим 2k) и с 8192 несущими частотами (режим 8k). Режим 2k подходит для одиночных передатчиков и малых сетей, а режим 8k предпочтительнее использовать в больших сетях, хотя он может использоваться и для одиночных передатчиков.

Важным фактором является высокая степень общности системы наземного ТВ вещания DVB-T с другими системами цифрового телевидения — кабельного (DVB-C) и спутникового (DVB-S).

**Параметры системы DVB-T.** Основные параметры, характеризующие передачу данных в системе DVB-T, приведены в табл. 4.11. Число несущих, передающих полезную информацию, зависит только от режима и равно 1512 для режима 2k и 6048 для режима 8k. Число «полезных» несущих в обоих режимах отличается ровно в четыре раза. Если учесть, что длительность полезного интервала при переходе от режима к режиму также меняется в четыре раза, то такой важный параметр, как частота следования символов данных  $R_S$ , оказывается в двух режимах одинаковым и равным 6,75 млн символов в секунду ( $R_S = 1512/224 \text{ мкс} = 6048/896 \text{ мкс} = 6,75 \text{ МГц} = 6,75 \text{ Мсимв/с}$ ).

**Таблица 4.11.** Основные параметры системы DVB-T

Параметры	Режим	
	8k	2k
Число несущих	6817	1705
Длительность полезного интервала $T_U$ , мкс	896	224
Длительность защитного интервала $T_G$ , мкс	224, 112, 56, 28	56, 28, 14, 7
Интервал между несущими, кГц	1,116	4,464
Интервал между крайними несущими, МГц	7,61	7,61
Модуляция несущих	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Скорость внутреннего кода	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8

Используя величину  $R_S$ , нетрудно найти скорость передачи данных в разных режимах и при различных сочетаниях параметров системы DVB-T:

$$R_b = R_S \frac{\gamma}{2} CR_1 CR_S \frac{T_U}{T_S}, \quad (4.20)$$

где  $\gamma$  — спектральная эффективность метода модуляции,  $\gamma = 2$  при QPSK,  $\gamma = 4$  при 16-QAM,  $\gamma = 6$  при 64-QAM;  $CR_1$  — скорость внутреннего сверточного кода;  $CR_S$  — скорость внешнего кода Рида-Соломона, равная 188/204,  $T_U/T_S$  — отношение длительности полезного интервала к общей длительности символа.

Результаты расчетов скорости передачи полезных данных приведены в табл. 4.12. В таблице приведены также расчетные значения отношения сигнал/шум  $C/N$  на входе приемника для канала связи с гауссовым шумом. Приведенные значения отношения  $C/N$  являются минимально допустимыми. Если отношение сигнал/шум выше приведенных в таблице, то внутренний декодер способен довести частоту ошибок до значения, меньшего  $P_{\text{ош}} = 2 \cdot 10^{-4}$ , а внешний — до  $P_{\text{ош}} = 2 \cdot 10^{-11}$ .

**Таблица 4.12.** Скорости передачи данных в системе DVB-T

Модуляция	$CR_1$	$C/N$ , дБ	Скорость передачи данных, Мбит/с, при $T_G/T_U$			
			1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,1	4,98	5,54	5,87	6,05
QPSK	2/3	4,9	6,67	7,42	7,87	8,11
QPSK	3/4	5,9	7,46	8,31	8,80	9,08
QPSK	5/6	6,9	8,30	9,23	9,78	10,08
QPSK	7/8	7,7	8,71	9,69	10,26	10,58
16-QAM	1/2	10,25	9,95	11,08	11,74	12,10
16-QAM	2/3	12,051	13,34	14,84	15,74	16,22

Модуляция	$CR_1$	C/N, дБ	Скорость передачи данных, Мбит/с, при $T_G/T_U$			
			1/4	1/8	1/16	1/32
16-QAM	3/4	13,05	14,92	16,62	17,60	18,16
16-QAM	5/6	14,05	16,6	18,46	19,56	20,16
16-QAM	7/8	14,85	17,42	19,38	20,52	21,16
64-QAM	1/2	16,49	14,94	16,62	17,61	18,15
64-QAM	2/3	18,29	20,01	22,26	23,61	24,33
64-QAM	3/4	19,29	22,38	24,93	26,4	27,24
64-QAM	5/6	20,29	24,9	27,69	29,34	30,24
64-QAM	7/8	21,09	26,13	29,07	30,78	31,74

**Построение сетей наземного цифрового вещания.** В наземном вещании для покрытия участка территории, который не может быть обслужен с помощью одной станции, используется сеть из нескольких передающих станций. Для предотвращения помех между ними для разных станций приходится задействовать различные частотные каналы, при этом строится многочастотная сеть с низкой эффективностью использования частотного ресурса.

Попытка совместной работы нескольких близко расположенных передатчиков аналогового вещания (синхронно передающих одну и ту же программу) на одной частоте приводит к появлению взаимных помех, обусловленных относительным сдвигом по времени моментов прихода сигналов от этих станций в точку приема. Сдвиг по времени вызывается неодинаковой длиной трасс распространения сигналов от передающих станций до места приема. Поскольку для разных точек приема в зоне обслуживания значения этого сдвига будут отличаться, он не может быть скомпенсирован введением линий задержки на передающих станциях.

Системы наземного цифрового вещания, в которых используется модуляция COFDM и введен защитный интервал между последовательно передаваемыми символами, обладают возможностью приема наряду с основным (полезным) сигналом (ПС) также запаздывающих (например, отраженных от препятствий на местности) сигналов в том случае, если величина запаздывания не превышает величину защитного интервала. При достаточно большой величине защитного интервала (в DVB-T он может оставлять до 1/4 длительности полезного символа) это позволяет осуществлять также прием сигналов других полезных станций, работающих в том же частотном канале. При этом все принятые на ненаправленную антенну ПС складываются в приемнике, что позволяет значительно улучшить качество приема. Эффект суммирования сигналов от разных передатчиков называют усилением сети. Сеть передающих станций, синхронно работающих на одной частоте и передающих одну и ту же программу, называется одночастотной сетью (Single Frequency Network, SFN).

Одночастотная сеть, как правило, строится из нескольких станций меньшей мощности по сравнению с мощностью одиночной передающей станции, требуемой для обслуживания такой же территории. Эти станции размещают на антенных опорах небольшой высоты и, как правило, являются необслуживаемыми. В одночастотной сети должна использоваться ненаправленная приемная антенна.

Повышение процента мест уверенного приема сигнала в одночастотной сети по сравнению с приемом сигнала одной полезной станции особенно заметно в случае пересеченной местности или городской высотной застройки, когда наличие нескольких ПС, приходящих с разных направлений, позволяет скомпенсировать негативный эффект от ослабления одного или нескольких из них препятствиями на местности. В одночастотной сети благодаря

значительному сокращению числа локальных зон неуверенного приема и зон тени становится возможным обеспечение непрерывного приема в движении (мобильного или портативного приема) в сложных условиях.

Если запаздывание ПС превышает защитный интервал, это приводит к возникновению помехи или внутрисетевой интерференции. Внутрисетевой интерференцией называется эффект, при котором сигнал одного передатчика одночастотной сети становится мешающим сигналом (МС) для другого передатчика. Возникновение зон внутрисетевой интерференции возможно в любой одночастотной сети при недостаточно тщательном подборе параметров передатчиков или учете специфики трасс распространения сигналов.

При расчете ЭМС одночастотной сети напряженность поля сигнала, вышедшего за пределы защитного интервала и приводящего к внутрисетевой интерференции, должна учитываться в качестве помехи, так как его воздействие аналогично МС от другой сети, но с учетом поправки на взаимную корреляцию сигналов станций одночастотной сети.

Возможность появления внутрисетевой интерференции накладывает существенные ограничения на размеры и конфигурацию одночастотных сетей. В настоящее время в Европе имеется опыт эксплуатации одночастотных сетей, состоящих из нескольких станций (не более десяти) и обслуживающих ограниченную территорию (до 200 км в диаметре). Расчеты позволяют предположить, что разработка крупных одночастотных сетей с достаточно мощными станциями (покрывающих территорию нескольких регионов) представляется нецелесообразной ввиду высокого уровня внутренних помех от передающих станций сети, удаленных на значительное расстояние от места приема и имеющих большую задержку прихода сигнала. Для защиты от внутренних помех в такой сети приходится использовать режимы модуляции с большей помехоустойчивостью и с меньшей пропускной способностью цифрового канала. Кроме того, такие сети не обеспечивают возможности распространения региональных программ. Поэтому в настоящее время ведется планирование и строительство одночастотных сетей, не выходящих за рамки отдельного региона или его части (например, региональный центр и пригороды).

Перспективным направлением является внедрение локальных одночастотных сетей, призванных покрыть зону обслуживания, эквивалентную зоне обслуживания одной более мощной передающей станции. Строительство таких сетей оправдано в случае необходимости обеспечения качественного мобильного приема или при наличии технических ограничений, запрещающих строительство одной более мощной передающей станции (например, ограничения ввиду электромагнитной несовместимости с другими РЭС или отсутствие возможности размещения передающей антенны на высотной опоре). Использование одночастотных сетей перспективно также в горных районах, граничащих с морем, или на равнине, поскольку позволяет значительно снизить расход дефицитного частотного ресурса многочисленными передающими станциями, установленными в горах для обслуживания отдельных населенных пунктов, и в то же время исключить появление взаимных помех между этими станциями на открытых участках местности.

Эталонной моделью одночастотной сети является модель, приведенная на рис. 4.20. Параметры такой эталонной сети:

- шестиугольная структура (замкнутая);
- расстояние между передатчиками — 60 км;
- высота передающей антенны — 150 м;
- излучаемая мощность центрального передатчика — 100 Вт;
- антенна центрального передатчика — ненаправленная;
- излучаемая мощность периферийного передатчика — 1 кВт;
- антенна периферийного передатчика — направленная на центральный передатчик (рис. 4.21).

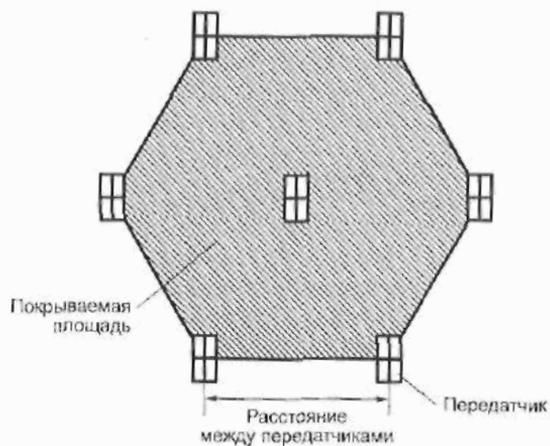


Рис. 4.20. Структура эталонной одночастотной сети

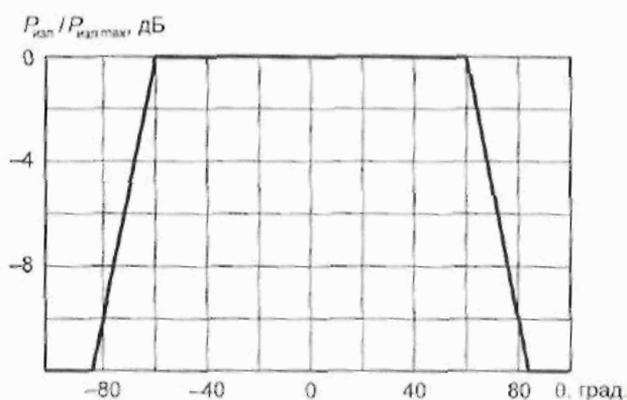


Рис. 4.21. Диаграмма направленности антенны периферийного передатчика

На рис. 4.22 показано соотношение мощностей одиночной передающей станции и станций одночастотной сети.

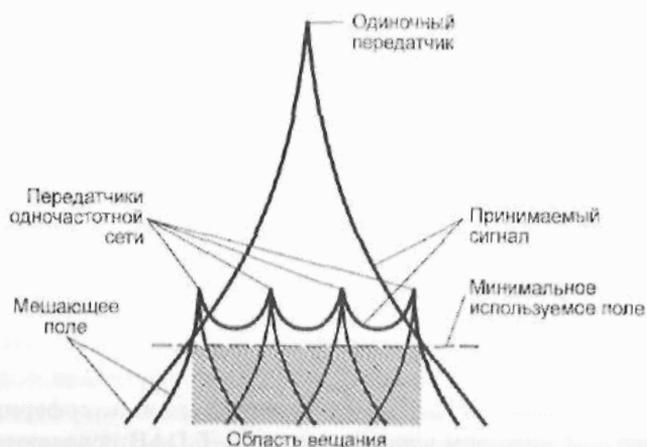


Рис. 4.22. Использование малых мощностей передатчиков в одночастотной сети

Использование передатчиков меньшей мощности требует принципиально новых подходов к строительству передающей инфраструктуры. В качестве опор для подвеса передающих антенн таких станций могут быть использованы имеющиеся высотные здания и сооружения или естественные возвышения на местности. Средством доставки программ на передающие станции является спутниковый канал. Синхронизация передающих станций, как правило, также осуществляется по спутниковому сигналу.

Таким образом, построение одночастотных передающих сетей цифрового вещания требует тщательного проектирования. Неверный выбор параметров модуляции, мощностей, расстояний между передающими станциями и других параметров приводит к более сильным взаимным помехам между сигналами различных станций, чем в случае многолучевого распространения сигнала одного передатчика, при этом относительные задержки в одночастотной сети могут быть значительно больше при сопоставимой мощности сигналов. В то же время использование таких сетей дает значительный выигрыш по качеству приема и уменьшает расход дефицитного частотного ресурса.

**Основные параметры, используемые для планирования сетей цифрового вещания.** Метод определения напряженности поля, также как и для аналогового вещания, основан на кривых распространения для 50% мест и 50% времени для ПС и 50% мест и 1% времени для МС (рис. 4.9, 4.10, 4.11). При этом приемная антенна, используемая для мобильного и портативного приема, ненаправленная и имеет коэффициент усиления немного меньший, чем у диполя.

Требуемый процент мест при обслуживании цифровым вещанием составляет 99%, а кривые распространения построены для 50% мест, поэтому при использовании этих кривых для расчета напряженности поля для 99% мест необходимо ввести поправочный коэффициент 13 дБ.

Кривые распространения, используемые для расчета напряженности поля, построены для высоты приемных антенн 10 м над уровнем земли. Цифровое вещание будет планироваться в основном для мобильного приема, где высота приемной антенны 1,5 м. Поэтому в полученную по кривым распространения напряженность поля необходимо внести поправку в 10 дБ, чтобы учесть прием на антенну высотой 1,5 м вместо 10 м.

Минимально необходимая напряженность поля, используемая при планировании в III ОВЧ диапазоне для мобильного приема цифрового вещания, с учетом приведенных выше поправочных коэффициентов приведена в табл. 4.13.

**Таблица 4.13.** Минимально необходимая напряженность

Частотный диапазон	III
Минимальная эквивалентная напряженность поля, дБ/мкВ/м	35
Поправочный коэффициент при переходе от 50% к 99% мест, дБ	+ 13
Поправочный коэффициент при переходе от высоты антенны 10 м к 1,5 м, дБ	+ 10
Минимальная эквивалентная напряженность поля планирования мобильного приема цифрового вещания, дБ/мкВ/м	58

При планировании сети цифрового вещания необходимо определять допустимую величину интерферирующего поля от мешающих передатчиков сети, для чего необходимо знать защитное отношение, определяемое отношением полезного и интерферирующего сигналов.

В цифровом наземном звуковом вещании сигналы T-DAV передаются частотными блоками (табл. 4.14). Ширина частотного блока составляет 1,536 МГц, защитный частотный интервал между соседними блоками — 176 кГц. В каждом ТВ канале с шириной полосы

частот 7 МГц размещается четыре частотных блока T-DAB. Защитное отношение для со-  
 мещенных частотных блоков T-DAB равно 10 дБ, а для соседних блоков –30 дБ.

Таблица 4.14. Частотные блоки T-DAB

Номер блока T-DAB	Центральная частота, МГц	Частотный диапазон, МГц	Нижний защитный интервал, кГц	Верхний защитный интервал, кГц
5A	174,928	174,160...175,696	–	176
5B	176,640	175,872...177,408	176	176
5C	178,352	177,584...179,120	176	176
5D	180,064	179,296...180,832	176	336
6A	181,936	181,168...182,704	336	176
6B	183,648	182,880...184,416	176	176
6C	185,360	184,592...186,128	176	176
6D	187,072	186,304...187,840	176	320
7A	188,928	188,160...189,696	320	176
7B	190,640	189,872...191,408	176	176
7C	192,352	191,584...193,120	176	176
7D	194,064	193,296...194,832	176	336
8A	195,936	195,168...196,704	336	176
8B	197,648	196,880...198,416	176	176
8C	199,360	198,592...200,128	176	176
8D	201,072	200,304...201,840	176	320
9A	202,928	202,160...203,696	320	176
9B	204,640	203,872...205,408	176	176
9C	206,352	205,584...207,120	176	176
9D	208,064	207,296...208,832	176	336
10A	209,936	209,168...210,704	335	176
10B	211,648	210,880...212,416	176	176
10C	213,360	212,592...214,128	176	176
10D	215,072	214,304...215,840	176	320
11A	216,928	216,160...217,696	320	176
11B	218,640	217,872...219,408	176	176
11C	220,352	219,584...221,120	176	176
11D	222,064	221,296...222,832	176	336
12A	223,936	223,168...224,704	336	176
12B	225,648	224,880...226,416	176	176
12C	227,360	226,592...228,128	176	176
12D	229,072	228,304...229,840	176	176

При расчете максимально допустимой напряженности поля интерферирующего сигнала необходимо учитывать защитное отношение, приведенное выше. Также необходимо учитывать, что требуется защита ПС от интерферирующего в 99% мест, а не в 50%, определяемых по кривым распространения. Поэтому для учета защиты в 99% времени вводится поправочный коэффициент 18 дБ

С учетом защитного отношения, поправочного коэффициента и минимальной напряженности поля полезного сигнала (см. табл. 4.13) определяется максимально допустимая напряженность поля interfering сигнала (табл. 4.15).

**Таблица 4.15.** Максимально допустимое поле interfering сигнала

Частотный диапазон	Минимальная напряженность поля полезного сигнала, дБ/мкВ/м	Защитное отношение, дБ	Поправочный коэффициент для 99% мест, дБ	Максимально допустимое поле interfering сигнала, дБ/мкВ/м
III	58	-10	-18	30