

# ЧАСТОТНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОТОВЫХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ

*В. И. Носов*

В последние годы возрос интерес к использованию в системах радиосвязи многопозиционных методов модуляции. Если в системах радиосвязи, таких как РРЛ, спутниковая связь эффективность использования многопозиционных методов модуляции не вызывает сомнения, то в сетях радиосвязи, построенных по сотовому принципу (наземное цифровое звуковое и телевизионное вещание, сети радиодоступа, сети сотовой мобильной связи), где применяется многократное использование частот, эффективность использования многопозиционных методов модуляции не совсем очевидна.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что с ростом позиционности модуляции увеличивается требуемое отношение сигнал/интерференционная помеха, в результате чего увеличивается расстояние, на которое должны быть разнесены передающие (базовые) станции, использующие одинаковые частоты, т. е. при этом увеличивается размерность кластера. При фиксированной полосе частот, выделенной для сотовых систем радиосвязи, увеличение размерности кластера приводит к уменьшению количества доступных номиналов частот, а, следовательно, и числа физических каналов на каждой базовой станции.

С другой стороны, при увеличении кратности модуляции увеличивается число физических каналов, которое можно организовать в выделенном диапазоне частот. Поэтому эффективность использования многопозиционных методов модуляции в сотовых системах радиосвязи обнаружится только в том случае, если число физических каналов будет расти быстрее, чем растёт размерность кластера [1]. Однако в литературе отсутствует методика расчёта отношения сигнал/интерференционная помеха, по которой можно определить допустимый уровень интерференционных помех, а, следовательно, и выбрать размерность кластера, при котором этот уровень интерференционных помех обеспечивается. Исследованию этого вопроса и посвящена данная статья.

В [2] для частотно-территориального планирования предложено использовать универсальную модель регулярной сети. Рассчитанные на основе универсальной модели однородной сети размерности кластеров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Размерности кластера в универсальной модели сети

Размерность кластера	1	3	4	7	9	12	13	16
$C_{\text{кл}}$	19	21	25	27	28	31	36	19

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ КЛАСТЕРА ПРИ КРУГОВЫХ АНТЕННАХ НА БАЗОВЫХ СТАНЦИЯХ

В универсальной модели однородной сети регулярной структуры зона обслуживания каждого передатчика находится в окружении 18 соканальных помех [2], расположенных в углах трёх правильных шестиугольников с координационными расстояниями соответственно  $D_{k1}$ ,  $\sqrt{3} \cdot D_{k1}$ ,  $2 \cdot D_{k1}$  рис. 1.

Как известно из теории регулярных сетей, такая ситуация справедлива для каждого передатчика регулярной сети при использовании числа  $C_{\text{кл}}$  частот, равного размерности кластера (см. табл. 1). Поэтому решения, полученные для предлагаемой схемы, справедливы для сети в целом.

Размерность кластера определяется исходя из допустимого отношения мощности сигнала к суммарной мощности интерференционных помех, создаваемых передатчиками базовых станций, которые работают в совмещённых (совпадающих) частотных каналах

$$P_{\text{сигн}} / \sum_{i=1}^N P_{i \text{ помех}} \leq (P_{\text{сигн}} / P_{\text{помех}})_{\text{допуст.}} \quad (1)$$

В сотовых сетях связи для определения мощностей сигнала и помех на входе приёмника абонентского терминала для предсказания потерь при распространении сигнала используется модель Окамура-Хата [4].

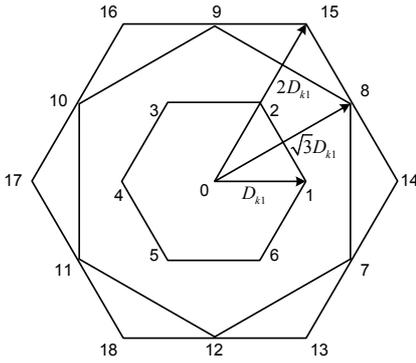


Рис. 1. Расположение помех по совмещённому каналу

В соответствии с этой моделью потери  $L$  (величина обратная затуханию  $A$ ) сигнала при распространении в городских районах

$$L = \frac{1}{A} = 10^{-6,955} \cdot f^{-2,616} \cdot h_{\text{БС}}^{1,382} \times$$

$$\times R^{-(4,49-0,655 \lg h_{\text{БС}})} \cdot 10^{\frac{\alpha(h_{\text{АС}})}{10}},$$

где  $f$  – рабочая частота в МГц;  $h_{\text{БС}}$  – высота подъёма антенны базовой станции в м;  $h_{\text{АС}}$  – высота подъёма антенны абонентской станции в м;  $R$  – дальность связи в км;  $\alpha(h_{\text{АС}})$  – поправочный коэффициент, используемый при высоте антенны абонентской станции, отличной от эталонной, равной 1,5 м.

В соответствии с формулой (2), мощность сигнала на входе приёмника  $P_{\text{пр}}$  абонентской станции, находящейся на расстоянии  $R$  от передатчика, равна

$$P_{\text{пр}}(\theta) = P_{\text{изл}}(\theta) \cdot L(R),$$

где  $P_{\text{изл}}(\theta)$  – излучаемая мощность передатчика в зависимости от направления на абонентскую станцию, при этом предполагается, что антенна абонентской станции имеет круговую диаграмму направленности.

Из (2) и (3) следует, что мощность сигнала на входе приёмника обратно пропорциональна расстоянию до передатчика

$$P_{\text{пр}}(R) = \frac{P_{\text{изл}}(\theta)}{B \cdot R^{(4,49-0,655 \lg h_j)}} = \frac{P_{\text{изл}}(\theta)}{B \cdot R^x},$$

где  $B = 10^{6,955} \cdot f^{2,616} \cdot h_{\text{БС}}^{1,382} \cdot 10^{\frac{\alpha(h_{\text{АС}})}{10}},$

$$x = 4,49 - 0,655 \lg(h_{\text{БС}}).$$

При высоте подвеса антенн базовых станций  $h_{\text{БС}} = 30$  м значение  $x$  равно

$$x = 4,49 - 0,655 \lg(30) = 3,5225.$$

Используя рис. 1, определим степень влияния помех по совмещённому каналу, расположенных в первом, втором и третьем шестиугольниках. Расчёт произведём на примере сети с размерностью кластера  $C_{\text{кл}} = 9$ . Из рис. 1 и (4) следует, что мощность интер-

ференционных помех, создаваемых шестью мешающими передатчиками первого шестиугольника, равна

$$P_{\text{п1}} = 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}}{B \cdot (\sqrt{27} \cdot R_3)^x} =$$

$$= 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}}{B \cdot (R_3)^x} \cdot \frac{1}{(\sqrt{27})^x}.$$

По аналогии с (6) получим мощность интерференционных помех, создаваемых шестью мешающими передатчиками второго шестиугольника

$$P_{\text{п2}} = 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}}{B \cdot (R_3)^x} \cdot \frac{1}{(9)^x}$$

и третьего шестиугольника

$$P_{\text{п3}} = 6 \cdot \frac{P_{\text{изл}}}{B \cdot (R_3)^x} \cdot \frac{1}{(\sqrt{108})^x}.$$

Подставив в (6) – (8) значение  $x$  из (5), рассчитаем относительные величины интерференционных помех, создаваемых базовыми станциями, расположенными в вершинах трёх шестиугольников (рис. 1) при учёте координационных расстояний и размерности кластера  $C_{\text{кл}} = 9$ . Результаты расчётов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Относительные уровни интерференционных помех

Источники помех	$P_{\text{п1}}$	$P_{\text{п2}}$	$P_{\text{п3}}$	$P_{\text{п\Sigma}}$
Относительные величины помех	0,00301	0,00043	0,00026	0,0037
Процент вносимых помех	81,3	11,7	7,0	100,0

Расчёты, проведённые для размерности кластера  $C_{\text{кл}} = 3$ , показали, что расхождение результатов, полученных при учёте координационных расстояний и реальных расстояний между передатчиками, не превышает 3,5 %, поэтому возможно при проведении расчётов интерференционных помех использовать координационные расстояния между мешающими передатчиками.

Из таблицы 2 видно, что наибольшее влияние на зону обслуживания центрального передатчика оказывают помехи, создаваемые двенадцатью ближайшими передатчиками 1 – 12, расположенными на расстояния  $D_{k1}$  и  $D_{k2}$  (рис. 1). Доля создаваемых этими двенадцатью ближайшими передатчиками составляет 93% от напряженности поля помех, создаваемых всеми 18 мешающими передатчиками. Поэтому при определении мощности помех ограничимся учётом этих шести  $i$ -х и шести  $j$ -х передатчиков

$$P_{\text{пом\Sigma}} = \sum_{i=1}^6 P_{\text{пом}i} [G(\theta_i), R_i] + \sum_{j=1}^6 P_{\text{пом}j} [G(\theta_j), R_j],$$

где  $G(\theta_i)$  – зависимость коэффициента усиления антенны базовой станции от угла.

Определим отношение мощности сигнала к суммарной мощности интерференционных помех на границе зоны обслуживания центрального передатчика при различных размерностях кластера, используя формулы (2) – (8). Результаты расчётов приведены в таблице 3.

Теперь, используя полученные результаты, определим необходимую размерность кластера для систем радиосвязи. Размерность кластера определяется исходя из допустимого отношения мощности сигнала к суммарной мощности интерференционных помех, создаваемых передатчиками базовых станций, которые работают в совмещенных частотных каналах (1).

Таблица 3. Зависимость отношения сигнал/интерференционная помеха от размерности кластера при ненаправленных антеннах базовых станций

Размерность кластера, $C_{кл}$	3	7	16	19	27	36
Отношение $P_{сигн}/P_{пом\Sigma}$ , ед.	7,0	31,1	132,5	178,6	335,9	555,5

Допустимое отношение мощности сигнала к суммарной мощности интерференционных помех  $(P_{сигн}/P_{помех})_{допуст.}$  определяется техническими характеристиками конкретных систем радиосвязи, в частности, позиционностью модуляции  $M$ , которая в настоящее время в сетях радиодоступа достигает  $M = 256$ , и допустимым отношением сигнал/шум на входе приёмника

$$h_{ш} = \left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{допуст.} \quad (10)$$

Для определения допустимого отношения сигнал/шум на входе приёмника воспользуемся результатами, полученными в [5] для зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум, при различной позиционности модуляции. Используя методику, изложенную в [5], рассчитаем значения отношений сигнал/шум, необходимые для обеспечения вероятности ошибки на выходе приемника равной  $10^{-3}$ . Результаты проведённых расчётов приведены в таблице 4 и на рис. 2.

Таблица 4. Зависимость отношения  $P_c/P_{ш}$  при  $p_{ош} = 10^{-3}$  от  $M$

Тип модуляции	М-ОФМ			М-КАМ		
Позиционность модуляции, $M$	2	4	8	16	64	256
Отношение $h_0 = P_c/P_{ш}$ , дБ	7,0	10	14	16,5	22,6	28,3

Из таблицы 4 и рис. 2 следует, что требуемое отношение сигнал/шум при восьмипозиционной модуляции

и 8-ОФМ выпадает из общей закономерности для остальных значений позиционности.

Выпадение из общей закономерности модуляции 8-ОФМ наряду с неравномерным распределением размерностей кластеров будет сказываться на характеристиках сотовых систем радиосвязи при использовании многопозиционных методов модуляции. Приведённые в таблице 4 и на рис. 2 данные показывают также, почему при позиционности модуляции  $M > 8$  используется не фазовая, а квадратурная амплитудная модуляция.

При работе в сотовой сети появляются интерференционные помехи от передатчиков базовых станций, работающих на совпадающих частотах (в совмещенных каналах), и в результате на входе приёмника необходимо рассматривать отношение сигнал/(шум + интерференционная помеха)

$$h_{\Sigma} = \frac{P_c}{P_{(ш+п)}} = \frac{P_c}{(P_{ш} + P_{пом\Sigma})}, \quad (11)$$

где  $P_{пом\Sigma}$  – определяется из (9).

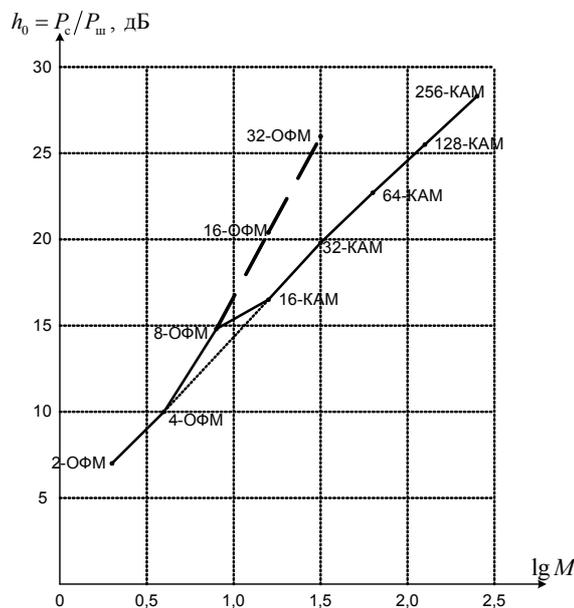


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от позиционности модуляции при  $p_{ош} = 10^{-3}$

Примем следующее обозначение

$$h_{пом\Sigma} = \frac{P_c}{P_{пом\Sigma}}. \quad (12)$$

Тогда (11) можно записать

$$\begin{aligned} h_{\Sigma} &= \frac{P_c}{P_{ш} + P_{пом\Sigma}} = \frac{1}{\frac{P_{ш}}{P_c} + \frac{P_{пом\Sigma}}{P_c}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{h_{ш}} + \frac{1}{h_{пом\Sigma}}} = \frac{h_{ш} \cdot h_{пом\Sigma}}{h_{ш} + h_{пом\Sigma}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из (4) можно получить зависимость радиуса зоны обслуживания от мощности входного сигнала

$$R_3 = \sqrt[3]{\frac{C}{P_c}} \quad (14)$$

Результаты расчётов по (14) сведены в таблицу 5.

Из таблицы 5 при заданной степени уменьшения радиуса (площади) зоны обслуживания можно определить допустимый уровень интерференционных помех, а, следовательно, и выбрать размерность кластера, при котором этот уровень интерференционных помех обеспечивается. Так, если допустимое уменьшение радиуса зоны обслуживания принять равным 5,0%, то отношение сигнал/интерференционная помеха  $h_{\text{пом}\Sigma}$  должно в 5 раз превышать отношение сигнал/шум  $h_{\text{ш}}$ .

Таблица 5. Изменение параметров системы при учёте интерференционных помех

$h_{\text{пом}\Sigma}/h_{\text{ш}}$ , ед	10	9	8	7	6	5
$h_{\Sigma}/h_{\text{ш}}$ , ед	0,91	0,9	0,89	0,875	0,857	0,83
$h_{\text{ш}} - h_{\Sigma}$ , дБ	0,414	0,45	0,51	0,58	0,67	0,95
$R_{3\text{с/п}}/R_{3\text{б/п}}$ , ед	0,973	0,971	0,967	0,963	0,957	0,95
$S_{3\text{с/п}}/S_{3\text{б/п}}$ , ед	0,947	0,943	0,935	0,927	0,916	0,903
Уменьшение $R$ , %	2,7	2,9	3,3	3,7	4,3	5,0

Используя изложенную выше методику, определим требуемую размерность кластера (табл. 6).

Из таблицы 6 следует, что при использовании в сетях радиодоступа четырёхпозиционной модуляции  $M=4$  требуемая размерность кластера  $C_{\text{кл}}=9$ , при  $M=16$  уже требуется размерность кластера  $C_{\text{кл}}=9$ , а при  $M=64$  требуемая размерность кластера  $C_{\text{кл}} > 36$ .

Таблица 6. Определение требуемой размерности кластера

Позиционность модуляции, $M$	2	4	8	16	32	64
Требуемое отношение $h_0 = h_{\text{ш}}$ , ед.	5,0	10,0	30,2	44,7	95,5	182,0
Требуемое отношение $h_{\text{пом}\Sigma}$ , ед.	25,0	50,0	151,1	223,5	477,5	910,0
Требуемая размерность кластера, $C_{\text{кл}}$	7	9	19	25	36	>36

### 3. ЧАСТОТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ

В качестве примера рассмотрим использование в сети радиосвязи многостанционного доступа FDMA/FDD, при котором полоса частот одного из поддиапазонов равна  $W_i$ . Далее осуществляется разбиение полос частот поддиапазона  $W_i$  на полосы частот, отводимых для каждого из  $i = 1, 2, \dots, N$  каналов  $\Delta f_{ki}$ , и защитные полосы частот  $\Delta f_{sk}$  между ними.

Таким образом, полоса частот поддиапазона  $W_i$  разбивается на  $N$  частотных каналов с шириной полосы  $\Delta f_k$ , которые разделяются защитными полосами частот  $\Delta f_s$ . Тогда при использовании многопозиционных методов модуляции полоса частот канала будет равна

$$\Delta f(M) = \frac{\Delta f(M=2)}{\gamma} = \frac{\Delta f(M=2)}{\log_2 M} \quad (15)$$

При неизменной полосе частот поддиапазона  $W_i$  суммарное число каналов при использовании многопозиционных методов модуляции

$$N_{\Sigma}(M) = \frac{W_i}{\left[ \Delta f_k(M) + \sum_{j=1}^K \Delta f_{sj}(M) \right]} \quad (16)$$

Полученное в (16) общее количество доступных каналов делится между базовыми станциями в соответствии с размерностью кластера, которая зависит от позиционности модуляции, используемой в системе. При этом частотная эффективность  $\chi_{FE}(M)$

$$\chi_{FE}(M) = N_{\text{БС}}(M) = \frac{N_{\Sigma}(M)}{C_{\text{кл}}(M)} = \frac{W_i}{\left[ \Delta f_k(M) + \sum_{j=1}^K \Delta f_{sj}(M) \right] \cdot C_{\text{кл}}(M)} \quad (17)$$

Для расчёта коэффициента частотной эффективности  $\chi_{FE}(M)$  зададимся параметрами системы радиосвязи в соответствии с [6], где для сравнения систем многостанционного доступа рассматривалась система радиосвязи с занимаемой полосой частот  $W_i = 12,5$  МГц; полосой частот одного канала  $\Delta f_k(M=2) = 30$  кГц; полосой частот защитного интервала  $\Delta f_s(M) = 0,25 \cdot \Delta f_k(M)$ .

Результаты расчётов частотной эффективности использования многопозиционной модуляции, проведённых с использованием принятых исходных данных, приведены в таблице 7 и на рис. 3.

Анализируя результаты, полученные в табл. 7 и на рис. 3, следует обратить внимание на то, что при переходе от двухпозиционной 2-ОФМ модуляции к четырёхпозиционной 4-ОФМ значение коэффициента частотной эффективности  $\chi_{FE}$  увеличивается с 47 каналов до 74, т.е. в 1,58 раза. А при переходе от четырёхпозиционной модуляции к восьмипозици-

онной 8-ОФМ происходит снижение коэффициента частотной эффективности  $\chi_{FE}$  с 74 до 52 каналов, т. е. в 1,42 раза. Именно при 8-ОФМ здесь появляется «провал» в зависимости  $\chi_{FE}$  от позиционности модуляции, который объясняется тем, что требуемое отношение сигнал/шум при восьмипозиционной модуляции 8-ОФМ выпадает из общей закономерности для остальных значений позиционности (рис. 2). Далее с ростом позиционности модуляции наблюдается снижение коэффициента частотной эффективности  $\chi_{FE}$ , так при 16-КАМ этот коэффициент равен 53 каналам, что в 1,4 раза ниже, чем при 4-ОФМ. При 32-КАМ наблюдается дальнейшее снижение коэффициента частотной эффективности  $\chi_{FE}$ , которое составляет 1,61 раза относительно 4-ОФМ.

Таблица 7. Результаты расчётов частотной эффективности

Позиционность модуляции, $M$	2	4	8	16	32
Спектральная эффективность модуляции, $\gamma$	1	2	3	4	5
Полоса частот канала, $\Delta f_k$ , кГц	30	15	10	7,5	6
Общее количество каналов $N_M$ в полосе $W_i$	333	666	1000	1333	1666
Размерность кластера, $C_{кл}$	7	9	19	25	36
Частотная эффективность, $\chi_{FE}$	47	74	52	53	46

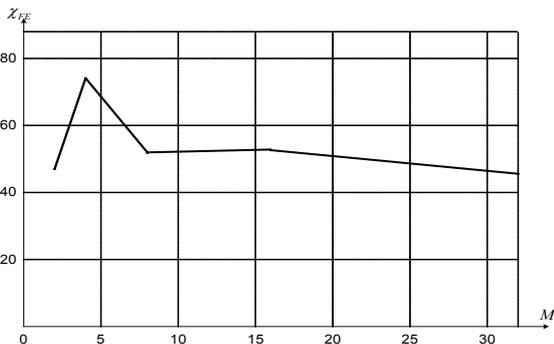


Рис. 3. Зависимость частотной эффективности от позиционности модуляции при круговой диаграмме антенн базовых станций

Таким образом, из табл. 7 и рис. 3 следует, что с ростом позиционности модуляции  $M$  частотная эффективность сетей радиосвязи, определяемая числом частотных каналов, приходящихся на одну базовую станцию в кластере  $N_{БС}$ , падает, так как размерность кластера  $C_{кл}$  растет быстрее, чем увеличивается общее число каналов  $N_{\Sigma}(M)$  при увеличении позиционности модуляции  $M$  (16). Таким образом, использование модуляции с позиционностью  $M > 4$  в сетях радиосвязи, при применении на базовых станциях антенн с

круговой диаграммой направленности, нецелесообразно из-за снижения их частотной эффективности.

#### 4. ЧАСТОТНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ

Частотно-пространственная эффективность  $\chi_{FSE}$  многопозиционных методов модуляции при фиксированной площади обслуживания  $S_{обсл}$  сетью радиосвязи определяется тем, что при уменьшении размерности кластера увеличивается кратность использования  $K_{исп}$  наборов частот кластера на этой площади

$$K_{исп} = \frac{S_{обсл}}{C_{кл}} \tag{18}$$

В соответствии с (15) – (17) частотно-пространственная эффективность сети радиодоступа  $\chi_{FSE}$  будет определяться числом каналов, доступных в кластере  $N_M$ , числом кластеров, которое можно разместить в заданной площади обслуживания

$$\chi_{FSE} = \frac{N_{\Sigma}(M) \cdot K_{исп}}{S_{обсл}} = \frac{N_{\Sigma}(M) \cdot \frac{S_{обсл}}{C_{кл}}}{S} = \frac{N_{\Sigma}(M) \cdot \frac{S_{обсл}}{S_{соты} \cdot C_{кл}}}{S_{обсл}} \tag{19}$$

В качестве зоны обслуживания возьмём зону второго шестиугольника помех (рис. 1), при этом  $S_{обсл} = S_{соты} \cdot 9 \cdot C_{кл}$ .

В соответствии с таблицей 7 максимальная размерность кластера  $C_{кл} = 36$  при кратности модуляции  $M = 32$ , поэтому в соответствии с (19) заданную площадь обслуживания сетью радиосвязи примем равной

$$S_{обсл} = S_{соты} \cdot 9 \cdot C_{кл} = 324 \cdot S_{соты} \tag{20}$$

Результаты расчётов частотно-пространственной эффективности приведены в таблице 8 и на рис. 4. При этом радиус зоны обслуживания одной соты принят равным  $R_3 = 1$  км.

В таблице 9 приведены результаты расчётов частотно-пространственной эффективности для одной соты при тех же условиях, что и при расчёте частотно-пространственной эффективности для заданной зоны обслуживания.

Таблица 8. Результаты расчётов частотно-пространственной эффективности для заданной зоны обслуживания

$M$	2	4	8	16	32
$C_{кл}$	7	9	19	21	36
Количество кластеров, $K_{исп}$	46,29	36,0	17,05	12,96	9,0
$N_{\Sigma}(M)$	333	666	1000	1333	1666

Таблица 8. Результаты расчётов частотно-пространственной эффективности для заданной зоны обслуживания

$N_M \cdot K_{исп}$	15414	23973	17050	17275	14994
$\chi_{FSE}$ , канн/км <sup>2</sup>	18,31	28,48	20,26	20,52	17,81

Таблица 9. Результаты расчётов частотно-пространственной эффективности для одной соты

M	2	4	8	16	32
$C_{кл}$	7	9	19	25	36
Общее количество каналов $N_M$	333	666	1000	1333	1666
$N_{БС}$	47	74	52	53	46
$\chi_{FSE}$ , канн/км <sup>2</sup>	18,08	28,46	20,0	20,39	17,7

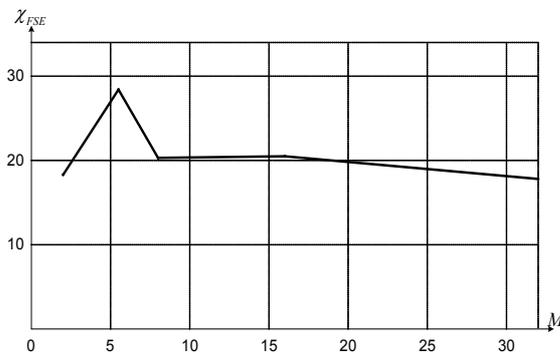


Рис. 4. Зависимость частотно-пространственной эффективности от позиционности модуляции при круговой диаграмме антенн базовых станций

Из таблицы 8 и рис. 4 следует, что частотно-пространственная эффективность сети радиодоступа в любой зоне обслуживания, при рассматриваемых условиях, определяется частотно-пространственной эффективностью одной соты. Т.е. количество кластеров, укладываемых в заданную зону обслуживания, не изменяет частотно-пространственную эффективность, определяемую одной сотой. Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что коэффициенты частотной  $\chi_{FE}$  и частотно-пространственной  $\chi_{FSE}$  эффективности имеют одинаковый характер зависимости от кратности модуляции.

Из таблиц 8, 9 и рис. 4 следует также, что с ростом позиционности модуляции  $M$  частотно-пространственная эффективность, определяемая числом частотных каналов, приходящихся на единицу площади обслуживания. Сетей радиодоступа, падает, так как размерность кластера  $C_{кл}$  растёт быстрее, чем увеличивается общее число каналов  $N_M$  при увеличении позиционности модуляции  $M$ . Таким образом, использование модуляции с позиционностью  $M > 4$  в сетях радиодоступа, при применении на базовых станциях антенн с круговой диаграммой направленности, нецелесообразно из-за снижения их частотно-пространственной эффективности.

Из проведённого анализа частотно-пространственной эффективности  $\chi_{FSE}$  сетей радиодоступа следует, что повышения частотно-пространственной эффективности можно достичь путём использования сот с меньшей площадью обслуживания  $S_{соты}$ .

Зависимость коэффициента частотно-пространственной эффективности от площади обслуживания соты  $S_{соты}$  рассмотрим на примере четырёхпозиционной модуляции  $M = 4$ , основные параметры которой приведены в таблице 9: размерность кластера –  $C_{кл} = 9$ ; общее число каналов, в выделенной полосе частот  $W_i - N_{\Sigma} (M = 4) = 666$ ; число каналов, доступных на одной базовой станции,  $N_{БС} = 74$ . При расчётах  $\chi_{FSE}$  использовалась только целая часть полученного результата  $\chi_{FSE} = \text{int}[N_{БС}/S_{соты}]$ .

Результаты выполненных расчётов приведены в табл. 10 и на рис. 5.

Таблица 10. Зависимость коэффициента частотно-пространственной эффективности от радиуса зоны обслуживания

Радиус зоны	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
Площадь соты,	2,6	1,664	0,936	0,414	0,104	0,026
Коэффициент	28	44	79	178	711	2846
Относительный коэффициент	1	1,57	2,82	6,36	25,39	100,6

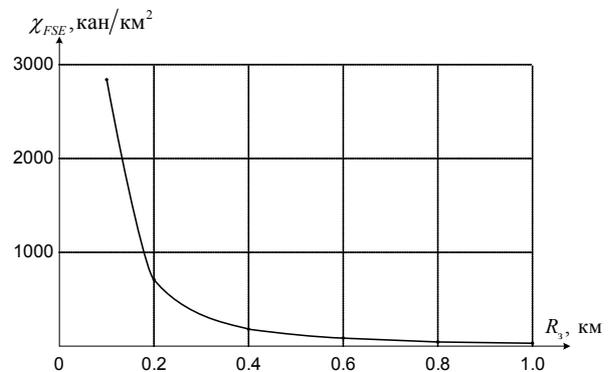


Рис. 5. Зависимость коэффициента частотно-пространственной эффективности от радиуса зоны обслуживания соты

Из таблицы 10 и рис. 5 следует, что с уменьшением радиуса зоны обслуживания базовой станции возрастает значение коэффициента частотно-пространственной эффективности; так, при уменьшении радиуса зоны обслуживания на 20% значение коэффициента эффективности возрастает в 1,57 раза, а при уменьшении на 90% – в 100 раз.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчета отношения сигнал/интерференционная помеха, по которой можно определить допустимый уровень интерференционных

помех, а, следовательно, и выбрать размерность кластера, при котором этот уровень интерференционных помех обеспечивается.

В результате проведённых исследований показано, что с ростом позиционности модуляции частотная эффективность сетей радиосвязи падает, так как размерность кластера растёт быстрее, чем увеличивается общее число каналов при увеличении позиционности модуляции. Таким образом, использование модуляции с позиционностью  $M > 4$  в сетях радиосвязи, при применении на базовых станциях антенн с круговой диаграммой направленности, нецелесообразно из-за снижения их частотной эффективности.

Показано также, что с уменьшением радиуса зоны обслуживания базовой станции возрастает значение коэффициента частотно-пространственной эффективности. Так, при уменьшении радиуса зоны обслуживания на 20% значение коэффициента эффективности возрастает в 1,57 раза, а при уменьшении на 90% – в 100 раз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Носов В.И., Носкова Н.В. Об эффективности использования многопозиционных методов модуляции в сотовых сетях связи. // Мобильные системы. – 2005 г. – № 9 – С.44 – 52.
2. Носов В.И. Оптимизация параметров сетей телевизионного и звукового вещания: Монография / СибГУТИ. – Новосибирск, 2005 г. – 257 с.
3. Носов В.И., Ахтырский В.Н., Воинцев Г.А., Кокорев А.В., Краснощёков Р.А. Использование ЭВМ для расчёта числа частотных каналов сети ТВ вещания. // Электро-связь. – 1985. – № 7. – С. 43 - 46.
4. Управление использованием радиочастотного спектра и обеспечение электромагнитной совместимости радиосредств: Учебное пособие. / М.А. Быховский, Т. В. Иванова, В.И. Носов и др. – М: ЭКО – ТРЕНДЗ, 2006. – 395 с.: ил.
5. Носов В.И. Сети радиодоступа. Часть 2.: Учебное пособие. УМО по специальности связь/ СибГУТИ. – Новосибирск, 2007 г. – 256 стр.
6. Столингс В. Беспроводные линии связи и сети. Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с. : ил.

---

#### Носов Владимир Иванович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой систем радиосвязи СибГУТИ. (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 269-82-54, e-mail: nvi@neic.nsk.su.