

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СЕТЯХ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КООРДИНАЦИОННЫХ КОЛЕЦ

В. И. Носов, Н. В. Носкова

При организации работы сети радиосвязи одной из основных задач является назначение рабочих частот радиосредствам сети. При этом оптимальным является частотно-территориальный план (и порождающий его алгоритм), обеспечивающий удовлетворение максимально возможного числа частотных заявок. При этом не существует единого алгоритма оптимизации, поскольку в каждом конкретном случае необходимо учитывать количество и степень взаимовлияния между радиоэлектронными средствами (РЭС), диапазон выделяемых частот и ограничения, накладываемые на его использование. Процедура частотного планирования осложняется и тем, что данная задача относится к классу NP-трудных задач, попытки решения которых при большой размерности связаны с экспоненциальным увеличением времени, затрачиваемым на поиск решения.

На данный момент для решения задач оптимизации широко используются методы комбинаторной оптимизации и игровые методы. Остановимся на каждом из них более подробно.

Методы комбинаторной оптимизации сводятся к построению эффективных алгоритмов поиска оптимального решения (алгоритмический подход), то есть алгоритмов, дающих оптимальное решение за такое число шагов, которое с увеличением количества РЭС растёт не быстрее, чем полином от числа РЭС. Однако очень часто при решении практической задачи невозможно найти эффективные алгоритмы, дающие точный оптимум. Поэтому наиболее универсальным методом решения подобных задач является метод ветвей и границ, суть которого заключается в разбиении начальной сложной задачи на некоторое число подзадач, имеющих меньший размер и поэтому проще разрешимых. Процедура ветвления дополняется процедурой сравнительной оценки ветвей, на основе которой идёт отбрасывание неперспективных ветвей решения.

Вместе с тем существуют методы комбинаторной оптимизации, формирующие эффективные алгоритмы, позволяющие находить за счётное время приближённое решение задачи, которые используются при назначении частотных каналов сетям большой размерности [1]. Существует несколько подходов к созданию приближённых алгоритмов. Наибольшее распространение получил метод пошаговой оп-

тимизации: присвоение частот производится последовательно (по шагам) и оптимизация решения производится на каждом шаге (а не по совокупности частотных присвоений). При этом на каждом шаге решаются две задачи: выбирается РЭС, которому будет присваиваться частотный канал, и производится само присвоение. Принципы оптимизации локальных присвоений могут быть сформированы по-разному: в задаче коммивояжера используется принцип «ближайшего соседа», в задаче раскраски графа – максимум числа окрашиваемых одним цветом вершин. При этом никакие смежные вершины не должны быть окрашены в один цвет, а число красок, необходимых для этого, должно быть минимальным. Минимальное число красок называется хроматическим числом графа – χ .

Основным достоинством метода оптимального присвоения частот, основанное на использовании алгоритмов раскраски графов, является его простота и высокое быстродействие, но он применим лишь для групп однородных РЭС и только при релейной аппроксимации функции частотно-территориального разнота (которая в реальности является монотонно убывающей). Метод коммивояжера применим для разнородных РЭС и использует реальные монотонно убывающие функции, но имеет меньшее быстродействие и в силу большой вычислительной сложности позволяет решить задачу присвоения частотных каналов лишь при малом числе РЭС.

В игровой постановке задача оптимального присвоения частот рассматривается как многошаговая бескоалиционная игра нескольких лиц с непротивоположными интересами. Каждое РЭС группы условно наделяется способностью к адаптивному выбору частот, и на имитационной математической модели воспроизводится процесс коллективного поведения частотно-адаптивных РЭС до достижения состояния устойчивого равновесия, когда никому не выгодно производить перестройку частоты. Номиналы частот в состоянии равновесия и принимаются за искомое решение задачи [9]. В игровой постановке задачи понятие оптимальности решения непосредственно связано не с отысканием минимума необходимой группы станций полосы частот, а с достижением согласованного оптимума, когда при перестройке частот не может быть улучшена помеховая обстановка для всех РЭС

одновременно (оптимальность по Парето) либо достижением состояния устойчивого равновесия (оптимальность по Нэшу). Следует отметить, что чем бóльшая полоса частот выделяется группе РЭС, тем быстрее достигается состояние оптимума; с уменьшением же заданной полосы частот время поиска оптимума увеличивается.

Алгоритмы частотной адаптации, которые могут использоваться в игровых методах, можно разделить на две группы: к первой группе относятся алгоритмы, позволяющие каждому РЭС учитывать только свои интересы, ко второй группе – алгоритмы, в которых РЭС учитывают как свои, так и интересы других РЭС. Необходимо отметить, что при малом числе РЭС проигрыш игровых методов методам комбинаторной оптимизации, а в частности методам раскраски графа, невелик: 3 – 5 процентов, но в более сложных случаях значительно снижается быстродействие игровых методов по сравнению с методами раскраски.

Таким образом, учитывая все положительные и отрицательные стороны рассмотренных методов, для дальнейшего рассмотрения и анализа выбираем один из методов комбинаторной оптимизации – метод раскраски графа. Базой для его использования является метод координационных колец [2, 3, 4, 5, 6, 7], суть которого заключается в присвоении частотных каналов в соответствии с рассчитанными частотно-пространственными ограничениями, т.е. определяются координационные расстояния в зависимости от защитных отношений и соответствующие этим расстояниям частотные разности. В основу метода координационных колец положена универсальная модель однородной сети, в которой каждая передающая станция находится в равных условиях по расположению и уровню помех. Отказ от использования косоугольной системы координат в регулярной треугольной решётке (как в линейных методах) позволил значительно расширить ранее известный ряд ромбических чисел (таблица 1), что в дальнейшем даст возможность более гибко планировать сети радиосвязи. В таблице 1 приняты следующие обозначения: кск – косоугольная система координат, умос – универсальная модель однородной сети.

Таблица 1

Модель сети	Значение ромбических чисел											
кск	3		7			13		19	21			
умос	3	4	7	9	12	13	16	19	21	25	27	28

В универсальной модели сети расстояния между всеми соседними станциями одинаково – обозначим его через R_0 и назовём модулем сети. Если за зону вещания передающей станции принять круг, в который вписан шести-

угольник, то ее радиус R_3 связан с модулем сети R_0 соотношением:

$$R_3 = \frac{R_0}{\sqrt{3}}.$$

Тогда требуемое число частотных каналов будет определяться из выражения

$$C = \frac{R_K^2}{3R_3^2}.$$

Расстояния между передатчиками, работающими в одном частотном канале, называемые координационными расстояниями R_K , определяются из геометрии сети.

Основными критериями, необходимыми для планирования системы радиовещания и обеспечивающими приём с заданным качеством, являются защитное отношение A_3 и минимальная напряжённость поля $E_{\min}$. В таблице 2 представлены результаты определения защитных отношений при различных кратностях модуляции при разноте сигнала и помехи $\Delta F = 1,712 \text{ МГц}$. Такой разнос для соседних частотных блоков принят для наземного цифрового звукового вещания [8]. Анализ полученных результатов показал, что при увеличении кратности модуляции требуется большее защитное отношение на входе приемника, следовательно, расстояние между станциями, работающими в одном частотном канале, необходимо увеличивать.

Таблица 2

Разнос несу- щих частот	Величина защитного отношения, дБ					
	$\Delta F \cdot 10^5,$ $\Gamma\text{ц}$	Вид модуляции				
		4-ОФМ	8-ОФМ	16-КАМ	32-КАМ	64-КАМ
0	10	14,66	18	20,09	22,64	
1,713	9,73	14,39	17,73	19,82	22,37	
3,426	9,022	13,682	17,022	19,112	21,662	
5,1139	7,915	12,575	15,915	18,005	20,555	
6,852	6,288	10,948	14,288	16,378	18,928	
8,565	3,86	8,52	11,06	13,95	16,5	
10,28	-0,161	4,499	7,839	9,928	12,478	
11,99	-7,198	-2,538	0,802	2,891	5,441	
13,7	-16,371	-11,711	-8,371	-6,292	-3,742	
15,42	-24,748	-20,088	-16,748	-14,744	-12,194	
17,12	-31,781	-27,121	-23,781	-22,146	-19,596	

Для оценки корректности данной методики определения величины защитных отношений проведено сравнение рассчитанных с её использованием данных и нормируемой величины. Для сетей Н-ЦЗВ нормируемые значения защитного отношения равны 10дБ и минус 30 дБ при разноте несущих частот полезного и мешающего сигналов 0 Гц и 1,712 МГц соответственно при использовании 4-ОФМ [8]. Полученные

значения защитных отношений при выше обозначенных условиях составляют 10 дБ и минус 31,781 дБ соответственно. При разноте несущих частот в 1,712 МГц отличие полученного и нормируемого значений защитного отношения составляет 1,78 дБ, что позволяет говорить о возможности использования разработанной методики при иных кратностях модуляции.

В таблице 3 приведены результаты определения минимальной напряжённости поля в сетях Н-ЦЗВ при различных кратностях модуляции.

Полученное значение минимально допустимой напряжённости поля для сетей Н-ЦЗВ при 4-ОФМ для сельской местности равно $E_{\min} = 27,87 \text{ дБмкВ/м}$, а нормируемое значение минимально допустимой напряжённости поля [8] составляет величину $E_{\min} = 30 \text{ дБмкВ/м}$. Отличие полученного и нормируемого значений составляет 2,13 дБ, что позволяет использовать данную методику при иных кратностях модуляции.

При использовании метода координационных колец для ЧТП сетей Н-ЦЗВ получение оптимального решения с точки зрения минимизации числа используемых частотных каналов достигалось при значительном числе итераций [4].

Таблица 3

вид модуляции	Величина минимально допустимой напряжённости поля, дБмкВ/м
	сельская местность
4-ОФМ	27.87
8-ОФМ	31.54
16-КАМ	34.88
32-КАМ	36.97
64-КАМ	39.52

Для устранения данного недостатка предлагается модификация метода координационных колец алгоритмом неявного перебора, основанном на методе ветвей и границ (МВ и Г) [6, 9, 10], суть которого заключается в последовательном разбиении допустимого множества на подмножества (ветвление) и вычисление оценок (границ), позволяющем отбрасывать подмножества, заведомо не содержащие решения задачи.

В зависимости от специфики задачи выбирается способ вычисления оценок снизу $A(M_i)$ функции f на множествах $M_i \subset M$.

Причём

$$f(m) \geq d(M_i), m \in M_i.$$

Оценка снизу часто вычисляется путём релаксации: замены задачи минимизации функции f по множеству M_i задачей минимизации по

более широкому множеству. Кроме того, выбирается правило ветвления, состоящее в выборе разветвляемого подмножества M_i из числа подмножеств, на которые к данному шагу разбито множество M .

В этих условиях можно организовать перебор элементов множества M с целью минимизации функции на этом множестве так:

- разобьём множество M на части (любым способом) и выберем ту из его частей M_1 , на которой функция f минимальна;
- разобьём на несколько частей множество M_1 и выберем ту из его частей M_2 , на которой минимальна функция f ;
- разобьём M_2 на несколько частей и выберем ту из них, где минимальна f , и так далее, пока не придём к какому-либо одноэлементному множеству $\{m_i\}$ (рисунок 1).

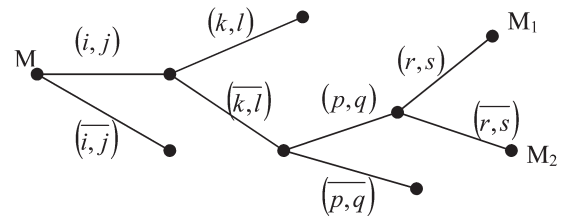


Рисунок 1 – Иллюстрация метода ветвей и границ

Для определения накладываемых частотно-пространственных ограничений предлагается следующая методика: сопоставим передатчикам вершины плоской треугольной решётки, которая является бесконечным регулярным графом степени 6 (поскольку наиболее сильное негативное влияние на рабочую станцию оказывают шесть ближайших станций) [4].

Разрешённые частоты представим как линейно упорядоченный интервал $I = [1, c]$, которые далее будем называть цветами. Обозначим через $d(x, y)$ расстояние между точками (вершинами) x и y плоской треугольной решётки, а через $f(x)$ и $f(y)$ сопоставленные им цвета упорядоченного интервала $I = [1, c]$. Требования на раскраску состоят в том, что будут учитываться лишь пары вершин, находящиеся на расстоянии не более заданного радиуса R (таблица 4). Отметим, что эти расстояния являются квадратными корнями из последовательных ромбических чисел 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 25, 27, 28, 31, 36,.... Если расстояние $d(x, y) = d_r$, то их цвета должны удовлетворять условию

$$|f(x) - f(y)| \geq k_r, \quad (1)$$

где

$$d_1 < d_2 < \dots < d_r \text{ и } k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_r$$

Таблица 4

D(X, Y)	D ₁	D ₂		D _R
$ f(x) - f(y) $	K ₁	K ₂		K _R

Расстояния d_i – это последовательные относительные координационные расстояния $1, \sqrt{3}, 2, \sqrt{7}, 3, \sqrt{12}, \sqrt{13}, 4, \sqrt{19}, \sqrt{21}, 5, \dots$

Назовём радиохроматическим числом $\chi_p(k_1, k_2, \dots, k_r)$ следующий минимакс от $f(x)$, где максимум берется по всем x , а минимум – по всем раскраскам $f(x)$, удовлетворяющим (1). Строятся радиораскраски $\langle \chi_p(k_1, k_2, \dots, k_r), h_1, h_2 \rangle$.

Задаваясь стандартными относительными координационными расстояниями для сети регулярной структуры d_i , определяются радиохроматические числа – минимальное необходимое число частотных каналов при учёте всех накладываемых ограничений.

Метод ветвей и границ используется здесь при построении последовательно улучшающихся верхних границ с помощью конструкций периодических параллелограммных радиораскрасок.

На основе изложенной методики строятся координационные кольца, по которым и определяются частотно-пространственные ограничения.

В таблице 5 и на рисунке 2 представлены результаты расчётов координационных расстояний и координационных колец при использовании 16-КАМ и 32-КАМ и радиусе зоны обслуживания для двух значений защитного отношения при использовании каналов с неперекрывающимися спектрами (разнос несущих частот равен 1,712 МГц), а также значения радиохроматических чисел для данных видов модуляции.

Таблица 5

Параметры	Значения параметров при различных кратностях модуляции			
	16-КАМ		32-КАМ	
	$A_3=18\text{ дБ}$	$A_3=-23.781\text{ дБ}$	$A_3=20.09\text{ дБ}$	$A_3=-22.14\text{ дБ}$
$R_z, \text{ км}$	75			
$R_{\text{кр}}, \text{ км}$	316,525	111,164	347,7	111,847
r_0	2,437	0,856	2,677	0,861
$i-j$	1	0	1	0
	(1, 1, 1, 0)		(1, 1, 1, 1, 0)	

В таблице 5 разность $i-j$ есть разнос по частоте в зависимости от координационного расстояния. На рисунке 2 сплошной линией показаны нормированные относительные координационные расстояния, пунктирной линией – рассчитанные относительные координационные расстояния.

Используя предложенный модифицированный метод координационных колец, разработано программное обеспечение, позволяющее

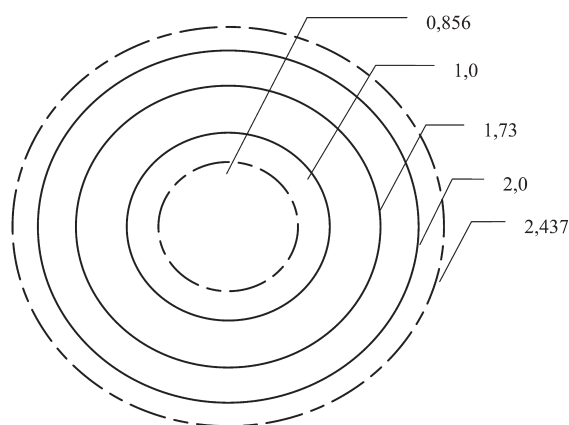


Рисунок 2 – Координационные кольца для случая 16-КАМ,

определять требуемое число частотных каналов в регулярной однородной сети из 900 передатчиков при условии, что действующих передатчиков нет и на каждой станции планируется установить по одному передатчику. Исходя из радиуса предполагаемой зоны обслуживания, рассчитываются координационные расстояния. Зная требуемые защитные отношения для конкретных видов модуляции, координационные расстояния и ромбические числа, в программе определяются частотно-пространственные ограничения, в соответствии с которыми и производится распределение заданного числа каналов в сети.

Алгоритм программы представлен на рисунке 3.

Исходными данными для работы подпрограммы являются определённые выше радиохроматические числа (частотно-пространственные ограничения). Алгоритм работы подпрограммы сводится к следующему.

Вводится заданный радиус зоны обслуживания;

1. Определяется расстояние от мешающей станции до границы зоны обслуживания рабочей станции, рассчитывается координационное расстояние R_k и значение модуля сети $R_0 = R_k \sqrt{3}$;
2. Определяется суммарная напряжённость поля помех всех шести мешающих станций;
3. Определяется расстояние от i -ой мешающей станции до границы зоны обслуживания рабочей станции d_i и её географическое положение относительно точки приёма;
4. Определяется напряжённость поля помехи от каждой мешающей станции и суммарная напряжённость поля помех;
5. Проверяется выполнение условия $\begin{cases} E_c = E_{\text{мин}}, \\ E_c - E_n = A_3 \text{ дБ на границе зоны обслуживания} \end{cases}$

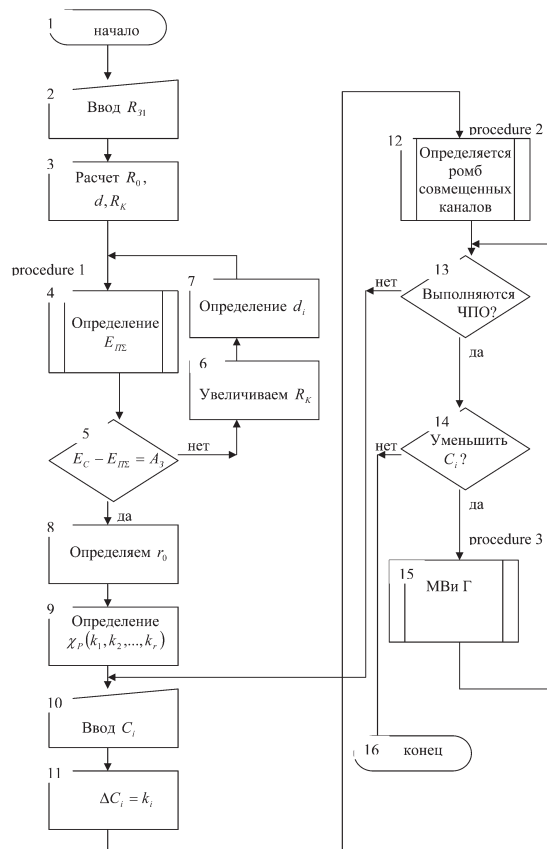


Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма распределения частотных каналов с использованием модифицированного метода координационных колец

живания: если наложенные ограничения не выполняются, необходимо увеличивать координационное расстояние и вновь рассчитывать расстояние от мешающих станций до точки приёма и суммарную напряжённость поля помех;

6. Если наложенные ограничения выполняются, то вычисляется относительное координационное расстояние по формуле: $r_0 = R_k / R_0$;
7. Задаваясь полученными с помощью универсальной модели однородной сети относительными координационными расстояниями $r_0 = 1, \sqrt{3}, 2, \sqrt{7}, 3, \sqrt{12}, \sqrt{13}, 4, \sqrt{19}, \sqrt{21}, 5, \dots$, определяются частотно-пространственные ограничения;
8. Вводится некоторое число используемых частотных каналов C_i в пределах от максимального ограничения до 200;
9. На основании рассчитанных ограничений определяется ромб совмещённых каналов: по относительному координационному расстоянию, где появляется первый «0» в ограничениях, строится кольцо, выбираются три станции, ле-

жащие на нём, которым автоматически присваивается канал с номером 0, и все распределения выполняются для данного ромба;

10. В качестве первоначального частотного разнosa задаётся частотный разнос при относительном координационном расстоянии равном 1: $\Delta C_i = k_i$;
11. В соответствии с первоначальным заданием начинается распределение заданного числа каналов кольцами вокруг каждой вершины ромба;
12. Далее проверяется выполнение частотно-пространственных ограничений. Для этого на последовательных относительных координационных расстояниях $r_0 = 1, \sqrt{3}, 2, \sqrt{7}, 3, \sqrt{12}, \sqrt{13}, 4, \sqrt{19}, \sqrt{21}, 5, \dots$, определяются частотные разнosa. Если какое-либо из условий не выполняется, об этом оповещается пользователь. Необходимо увеличить число каналов C_i , и программа произведет новые назначения и проверку заданных условий;
13. Если все наложенные ограничения выполняются, продолжается дальнейшая оптимизация числа используемых каналов. Для этого заданное ранее множество C_i разбивается на части $C_k = C_i / 2$, на каждом из получившихся подмножеств определяется значение минимизируемой функции и выбирается та его часть C_k , на которой функция ϕ минимальна, и повторяется процесс распределения, но с новым числом частотных каналов (процедура МВ и Г). Если уменьшить число каналов с сохранением накладываемых условий не удаётся, то рассчитанное значение считается оптимальным и работа программы заканчивается.

Таблица 6

Радиус зон обслуживания,	Вид модуляции	Радио-хроматическое число	Размерность ромба совмещенных каналов
75	4-ОФМ	(1, 0)	3
	8-ОФМ	(1, 1, 1, 0)	7
	16-КАМ	(1, 1, 1, 0)	7
	32-КАМ	(1, 1, 1, 1, 0)	9
	64-КАМ	(1, 1, 1, 1, 1, 0)	12

Помимо этого, возможно использовать вновь определённые частотно-пространственные ограничения. Тогда новое число каналов будет подбираться под них. При нажатии на кнопку «Запомнить конфигурацию» происхо-

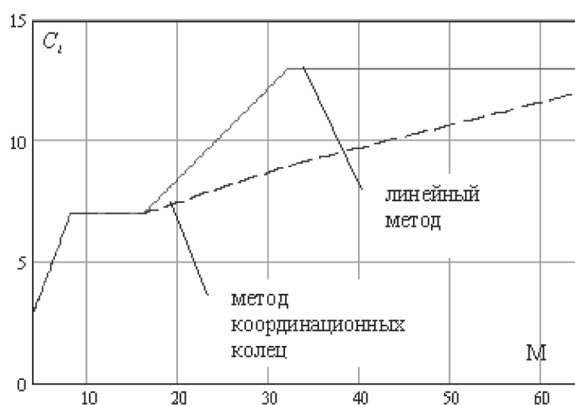


Рисунок 4 – Результаты определения числа частотных каналов в ромбе совмещённых каналов для сетей радиовещания регулярной структуры

дит запись определённых частотных разносов и рассчитанного числа каналов в память с возможностью дальнейшего их использования. Кроме того, существует возможность вывода полученных результатов на печать.

В таблице 6 представлены результаты определения числа необходимых частотных каналов в ромбе совмещённых каналов.

Анализ полученных результатов показал, что при сравнении с линейными методами выигрыш составил от 7,7 % при 64-КАМ и до 30,8% при 32-КАМ (рисунок 4).

Выводы

- 1 Для планирования сетей наземного цифрового звукового вещания при использовании многопозиционных методов модуляции определены необходимые технические параметры A_3 и $E_{\min}$.
- 2 Разработан модифицированный метод координационных колец с использованием метода ветвей и границ.
- 3 Определены радиохроматические числа по частотно-пространственным ограничениям, по которым определяется размерность кластера совмещённых каналов.

Литература

- 1 Носов В. И. Оптимизация параметров сетей телевизионного и звукового вещания: Монография / СибГУТИ. – Новосибирск, 2005 г. – 257 с.

- 2 Носов В.И., Фадеева Н.Е., Минеева Т.В. Новый подход к планированию сети телевизионного и звукового вещания. // Электросвязь. – 1989. – № 9. – с. 18 – 21
- 3 Буга Н.Н., Конторович В.Я., Носов В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Радио и связь, 1993. – 242 с.
- 4 Nosov V.I., Mel'nikov L.S. Allocation of frequencies in a network of terrestrial digital audio broadcasting, 2001 MICROWAVE ELECTRONICS: Measurements, Identification, Applications CONFERENCE PROCEEDINGS MEMIA'2001, September 18–20, 2001, Novosibirsk, Russia, pp. 171–174.
- 5 Мельников Л.С., Носов В.И. Определение оптимального шага структуры частот в сети радиовещания // Проблемы обработки информационных сетей (конференция СО АН СССР), Часть I, Новосибирск (1991), 221–228.
- 6 В.И. Носов, Н.В. Носкова. Об эффективности использования многопозиционных методов модуляции в сотовых сетях связи. // Мобильные системы. – 2005 г. – № 9 – С.44 – 52.
- 7 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
- 8 Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band (Question ITU – R·107/10). Draft new recommendation ITU – R·BS (Doc. 6/378). 2003, p.p. 24.
- 9 Соловьев В.В. Методы оптимального назначения радиочастот. – Москва, 2000. – 131 с.
- 10 Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях, М.: 2000. – 256 с.

Носов Владимир Иванович: д.т.н., профессор, академик МАИ, зав. кафедрой систем радиосвязи, СибГУТИ, тел. (383) 266-46-39

Носкова Наталья Владимировна: к.т.н., доцент кафедры систем радиосвязи, СибГУТИ, тел. (383) 266-46-39