

Исследование метода многопараметрической оптимизации сети наземного цифрового ТВ-вещания

К.В. Сартаков, В.И. Носов

В настоящей статье приведено исследование метода оптимального построения сети наземного цифрового телевизионного вещания на основе однородной сети с применением программных средств, основанных на математических алгоритмах оптимизации. В 2006 году состоялась сессия региональной конференции радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ) по планированию цифровой наземной радиовещательной службы в частях районов 1 и 3 (куда входит и Россия) в полосах частот 174 – 230 МГц и 470 – 862 МГц (РКР-06) [1]. С учётом полученных по итогам сессии рекомендаций МСЭ проведено всестороннее исследование метода оптимального построения сети наземного цифрового телевизионного вещания на основе однородной сети на примере территории Новосибирской области, путём введения показателя эффективности сети, характеризующего затраты на обслуживание наземным цифровым телевизионным вещанием 1 км² покрываемой территории.

Ключевые слова: метод оптимального построения сетей наземного цифрового телевизионного вещания; математические алгоритмы оптимизации; эталонная сеть; показатель эффективности сети.

1. Введение

В настоящее время на территории субъектов Российской Федерации, а также на территории стран ближнего и дальнего зарубежья полным ходом осуществляется внедрение сетей наземного цифрового телевизионного вещания (сетей НЦТВ).

Существующая практика планирования передающей сети НЦТВ исходит из принципа поэтапного решения задачи внедрения такой сети. На первом этапе на основе анализа факторов политического, экономического, социального характера с учётом географии и особенностей местности определяются количество, месторасположения и размеры требуемых зон обслуживания, планируемых цифровых телевизионных станций, которые обеспечивают необходимый охват территории (или населения) цифровым телевидением с заданным качеством и числом телевизионных каналов.

На следующем этапе выбираются основные параметры передающих телевизионных станций, которые обеспечивают требуемые размеры зон обслуживания и решается задача частотно-территориального планирования [2, 3, 4].

При частотно-территориальном планировании сетей НЦТВ, при строительстве новых или модернизации действующих передающих станций всегда возникает задача определения оптимального метода построения сети исходя из заданных параметров. Особенную важность данная задача приобретает при переходе Российской Федерации с аналогового стандарта телерадиовещания на наземное цифровое телевизионное вещание стандарта «DVB-T2» [4, 9]. Поэтому неизбежно возникает проблема выбора оптимального метода построения сети НЦТВ для территории определённого региона. На сегодняшний день в существующей лите-

ратуре не предложено инструмента для всесторонней оценки эффективности проектируемого и внедряемого того или иного метода построения сети НЦТВ на заданной территории. Решение этой задачи в общем виде возможно в рамках системы автоматизированного проектирования с использованием математических методов оптимизации технико-экономических показателей анализируемой сети. Исследования проводятся на основе однородных сетей, в основу построения которых заложена модель с регулярным расположением передающих станций и регулярным распределением каналов. Передатчики такой однородной сети телевизионного вещания расположены в узлах регулярной решётки, в которой каждая передающая станция находится в равных условиях по расположению и уровню помех. Сплошное обслуживание территории обеспечивается при мозаичном покрытии, когда за зону обслуживания передающей станции принимается равносторонний шестиугольник с центром в точке её расположения. Поскольку реальная зона обслуживания передающей станции в рассматриваемых условиях является кругом, то использование в модели зоны шестиугольника обеспечивает минимальное перекрытие зон соседних передающих станций. Такая модель, в силу её простоты, является довольно эффективным инструментом при решении теоретических задач различной направленности, в том числе и задач оптимизации технических параметров сетей телевизионного вещания [1, 2, 3, 4, 5, 8].

В статье рассматривается вариант решения актуальной задачи оценки эффективности проектируемого и внедряемого того или иного метода построения сети НЦТВ современного стандарта «DVB-T2» и нахождения оптимального метода построения сети НЦТВ для территории Новосибирской области с применением математических алгоритмов оптимизации.

Решение данной задачи сводится к поэтапному решению следующих подзадач:

1. разработке показателя всесторонней оценки эффективности сетей НЦТВ с учётом рекомендаций, сформулированных отделением Радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-R);
2. реализации и сравнению эффективности современных математических алгоритмов оптимизации для оптимального использования временных ресурсов и ресурсов ЭВМ при вычислении большого количества значений показателя эффективности сети НЦТВ;
3. разработке и применению программного продукта моделирования конфигураций (методов) оптимального построения сетей НЦТВ с использованием цифровой двумерной карты местности (на примере карты Новосибирской области);
4. анализу полученных результатов моделирования в сравнении с показателями уже реализованной на территории Новосибирской области сети НЦТВ и моделированию оптимального проекта сети НЦТВ для территории Новосибирской области.

2. Постановка задачи многопараметрической оптимизации сети НЦТВ

Для решения задачи многопараметрической оптимизации сети, т.е. сравнения всех возможных методов построения сети НЦТВ и определения оптимального способа построения сети НЦТВ (определения минимальной стоимости квадратного метра сети НЦТВ (руб/км²)) исходя из заданных параметров сети, необходим критерий оценки эффективности внедряемой сети НЦТВ.

Пусть есть множество значений исходных параметров сети НЦТВ:

1. $p \in [1, \dots, P]$ – мощность передатчиков, обеспечивающая минимальную напряжённость поля ($E_{\min}$) на расстоянии прямой видимости ($R_{\text{пр}}$), Вт;
2. $h \in [1, \dots, H]$ – высота подвеса передающих антенн, м;
3. $f \in [1, \dots, F]$ – используемый частотный канал в соответствии с диапазоном частот (№ ТВК);

4. $m \in [1, \dots, M]$ – вид используемой модуляции, включающий позиционность модуляции, скорость внутреннего кода и межсимвольный защитный интервал.

Соответственно, параметр множества значений имеет вид $x \in \{P_p, F_f, M_m, H_h\}$.

Сумма всех капитальных затрат K_Σ на внедрение передающей сети НЦТВ может быть представлена в следующем виде:

$$K_\Sigma = \sum_{i=1}^k K_{ni}(f, h, p). \quad (1)$$

Сумма всех эксплуатационных расходов C_Σ может быть представлена в следующем виде:

$$C_\Sigma = \sum_{j=1}^c C_{nj}(f, h, p). \quad (2)$$

Необходимо отметить, что величины капитальных и эксплуатационных затрат на передающую сеть НЦТВ зависят от использования тех или иных номиналов радиочастотного канала f , высоты подвеса передающих антенн h и мощности цифровых передатчиков p . Остальные параметры сети НЦТВ – технические здания, сооружения, системы жизнеобеспечения остаются неизменными.

Соответственно, общие затраты на сеть НЦТВ с учётом необходимого количества передающих станций сводится к выражению:

$$3_\Sigma = \sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} \left(\sum_{i=1}^k K_{ni}(f, p, h) + \sum_{j=1}^c C_{nj}(f, p, h) \right). \quad (3)$$

Сумма затрат на передающую сеть в совокупности складывается из суммы всех затрат на строительство и эксплуатацию сети НЦТВ и затрат на приобретение права и эксплуатацию радиочастотного спектра.

В соответствии с [8] суммарная площадь зон обслуживания передатчиков сети НЦТВ рассчитывается с учётом зон перекрытия (в процентном соотношении зона перекрытия составляет 16,8%):

$$S_{обсл\Sigma} = \sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} S_{обсл\ n}(f, p, h) - \sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} S_{пер\ n}(f, p, h) = 0.832 \sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} S_{обсл\ n}(f, p, h) \quad (4)$$

В итоге задача многопараметрической оптимизации сети НЦТВ сводится к поиску минимального значения функции $F(x)$ сети НЦТВ (рублей за км²), представляющей отношение суммы всех затрат на передающую сеть НЦТВ и на использование радиочастотного ресурса к суммарной площади обслуживания цифровых передатчиков сети:

$$F(x) = \min \Psi(f, m, p, h) = \min \left\{ \frac{\sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} \left(\sum_{i=1}^k K_{ni}(f, p, h) + \sum_{j=1}^c C_{nj}(f, p, h) \right)}{0.832 \sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} S_{обсл\ n}(f, p, h)} + \right. \\ \left. + \frac{\sum_{l=1}^L \left(\sum_{i=1}^k K_{li}(f, p, h) + \sum_{j=1}^c C_{li}(f, p, h) \right)}{0.832 \sum_{n=1}^{N_{cr}(f, m, p, h)} S_{обсл\ n}(f, h)} \right\}, \quad (5)$$

где $l = 1, \dots, L$ – размерность кластера.

Итак, пусть необходимо минимизировать целевую функцию $F(x) \rightarrow \min$ переменных x . Итерационный процесс вычисления функции $F(x)$ имеет v шагов, тогда, если для исследуемой целевой функции $F(x)$ каждая из Z переменных принимает D значений, то для отыскания « $\min$ » функции $F(x)$ в процессе полного перебора значений x потребуется рассмотреть $(Z \times D) \times v$ комбинаций [7].

Будем считать, что первый шаг задёт начальный вектор x^0 , тогда шаг x^1 находится путём решения задачи одномерной минимизации за Z шагов следующим образом:

На первом шаге при фиксированных значениях вектора x_n^0 , $n = 2, 3, 4, \dots, Z$, функция $F(x)$ минимизируется по переменной x_1 :

$$F_1(x_1) = \min_{x_1} F(x_1, x_2^0, x_3^0, \dots, x_Z^0), \quad (6)$$

в результате чего находится первое значение x_1^1 вектора x_n^1 .

На втором шаге функцию $F(x)$ минимизируем при фиксированных значениях вектора x_n^0 , $n = 3, 4, \dots, Z$ и найденном значении x_1^1

$$F_2(x_2) = \min_{x_2} F(x_1^1, x_2, x_3^0, \dots, x_Z^0). \quad (7)$$

На n -шаге при фиксированных значениях вектора x_n^0 , $n = n+1, n+2, \dots, Z$ и полученных значениях вектора x_n^1 , $n = 1, 2, 3, \dots, n-1$ отыскивается функция $F_n(x_n)$

$$F_n(x_n) = \min_{x_n} F(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n, x_{n+1}^0, x_{n+2}^0, x_Z^0). \quad (8)$$

Таким образом, в результате Z шагов процедуры одномерной минимизации:

$$F_Z(x_Z) = \min_{x_Z} F(x_1^1, x_2^1, \dots, x_{Z-2}^0, x_{Z-1}^0, x_Z^0), \quad (9)$$

получим вектор x_n^1 , $n = 1, 2, 3, \dots, Z$, для которого значение целевой функции не больше, чем x^0

$$F(x^1) \leq F(x^0). \quad (10)$$

Вектор x_n^1 используется в качестве исходного для следующего этапа общего итерационного процесса.

Критерием оптимальности построения сети НЦТВ примем затраты на сеть НЦТВ, приведённые к км² зоны обслуживания, т.е. предлагается подход к построению проекта сети НЦТВ с минимальной стоимостью на единицу площади, основанный на показателе эффективности сети НЦТВ – $F(x)$.

Решение задачи оптимизации технических параметров для реальной сети НЦТВ представляется достаточно трудоёмким процессом, поэтому задача построения проекта сети НЦТВ решается в соответствии с рекомендациями (РКР-06) на основе однородной одностотной сети телевизионного вещания (рис. 1, на следующей странице) [1, 8].

Исходя из современных возможностей ЭВМ, применение точных алгоритмов оптимизации, а именно «метода прямого перебора», становится не столь трудоёмким и затратным по времени, как отмечается в [7], а при условии, что множество всех возможных значений радиуса зоны обслуживания передатчика ограничено условием расстояния прямой видимости, то применение «метода прямого перебора» является необходимым для моделирования сети НЦТВ и нахождения точного значения $F(x)$.

Стоит отметить, что по итогам проведённого сравнительного анализа среди приближённых алгоритмов оптимизации наибольшую эффективность демонстрируют так называемые вероятностные метаэвристики: «алгоритм поиска с запретами», «алгоритм имитации отжига» и «генетический алгоритм». По сути, эти алгоритмы являются разной реализацией одной и той же идеи: организации стохастического марковского процесса на подходящем множестве состояний. Несомненным достоинством метаэвристик является

получение «хороших» приближённых решений уже на первых итерациях, однако получение точного решения реализуется за достаточно большое число итераций.

С помощью прямого перебора всегда можно, по крайней мере теоретически, найти оптимальное решение. Поэтому простой перебор можно считать универсальным способом решения дискретных экстремальных задач [12].

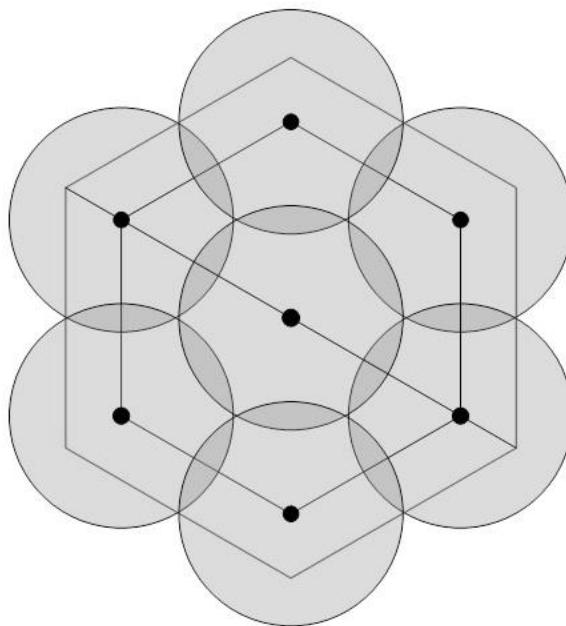


Рис. 1. Эталонная сеть (одночастотная сеть с большой зоной обслуживания)

3. Расчёт показателя эффективности сети НЦТВ с применением параллельного и последовательного алгоритмов оптимизации

Для расчёта показателя эффективности сети разработана программа построения оптимального проекта сети наземного цифрового телевизионного вещания с регулярным размещением передающих станций на основе полного перебора всех возможных методов построения сети НЦТВ с применением как последовательного алгоритма оптимизации, так и параллельного алгоритма оптимизации, т.е. на основе процесса «расщепления» последовательного алгоритма оптимизации на параллельные процессы, которые производят расчёт и поиск оптимального показателя эффективности сети НЦТВ синхронно [11, 12].

Основу программы при использовании последовательного алгоритма оптимизации составляет блок перебора комбинаций пяти параметров (4 вложенных цикла), которые задают вариант построения сети:

1. p – мощность передатчика;
2. f – № частотного канала передающей станции сети НЦТВ;
3. h – высота подвеса передающих антенн;
4. G – коэффициент усиления передающих антенн;
5. m – вид модуляции.

Остальные параметры и показатели в программе рассчитываются и вводятся на основе значений этих параметров.

Программа с каждым следующим циклом вычисления функции $F(x)$ запоминает значение рассчитанной функции и сравнивает его с предыдущим значением функции, которое было отложено в памяти программы, и если новое рассчитанное значение функции окажется меньше отложенного значения функции, то в памяти программы отложится наименьшее значение функции. Тем самым, при полном переборе всех возможных комбинаций сетей

НЦТВ в итоге будет найден оптимальный проект сети НЦТВ. Всего в программе обрабатывается более 19 миллионов вариантов построения сети.

Понятие параллельного алгоритма (Parallel Algorithm) относится к фундаментальным в теории вычислительных систем (ВС). Параллельный алгоритм – это описание процесса обработки информации, ориентированное на реализацию в коллективе вычислителей [11, 12]. Такой алгоритм при решении задачи нахождения оптимального проекта сети НЦТВ из многомиллионного множества проектов, в отличие от последовательного, предусматривает одновременное выполнение множества операций в пределах одного шага вычислений и, как в последовательном алгоритме, сохраняет полученное значение проекта сети НЦТВ, сравнивая его с предыдущим.

Качество параллельного алгоритма (или его эффективность) определяется методикой распараллеливания сложных задач. Существует два подхода при распараллеливании задач: локальное и глобальное (крупноблочное) распараллеливание. Первый подход ориентирован на расщепление алгоритма решения сложной задачи на предельно простые блоки (операции или операторы) и требует выделения для каждого этапа вычислений максимально возможного количества одновременно выполняемых блоков.

Второй подход (глобальное или крупноблочное распараллеливание) ориентирован на разбиение сложной задачи на крупные блоки – подзадачи, между которыми существует слабая связность. Тогда в алгоритмах, построенных на основе крупноблочного распараллеливания, операции обмена между подзадачами будут составлять незначительную часть по сравнению с общим числом операций в каждой подзадаче.

Задачу, которая имеет небольшой объём вычислений и, следовательно, не допускает эффективного распараллеливания, называется простой [11, 12]. Простая задача требует для своего решения одного вычислителя.

Параллельная программа решения сложной задачи допускает своё представление в виде композиции:

$$P_1 \times P_2 \times \dots \times P_i \times \dots \times P_n, \quad (11)$$

в которой P_i – i -я ветвь программы, а n – допустимое число ветвей $\{P_j\}, j \neq i$. Необходимо отметить, что каждая из ветвей P_i реализуется только на одном вычислителе коллектива, а информационные связи между её операторами и операторами других ветвей осуществляются при помощи специальных операторов обмена информацией.

Параллельный алгоритм (или Р-программа) представляет собой композицию связных ветвей. Каждая ветвь – последовательность операторов как обычных (например, вычислительных и логических), так и реализующих взаимодействия (обмены информацией) между данной ветвью и другими.

Аксиоматически ясно, что все взаимодействия между ветвями – это «накладные расходы»; следовательно, чем меньше взаимодействий, тем выше эффективность параллельного алгоритма [11, 12].

Для оценки эффективности работы алгоритмов введём следующие показатели:

1. Коэффициент ускорения, как общепринято, для параллельного алгоритма вычисляется по формуле

$$S = \tau_1 / \tau_n, \quad (12)$$

где τ_1 – время решения задачи на одном вычислителе; τ_n – время выполнения соответствующего Р-алгоритма в системе из n вычислений.

2. Коэффициентом ускорения параллельного алгоритма по сравнению с наилучшим последовательным алгоритмом называется отношение:

$$S' = \tau'_1 / \tau_n. \quad (13)$$

Здесь τ'_1 – время реализации самого быстрого последовательного алгоритма на одном вычислителе.

3. Наряду с коэффициентом ускорения (13) в параллельном программировании используют коэффициент эффективности Р-алгоритма:

$$E = S/n. \quad (14)$$

4. Коэффициент эффективности Р-алгоритма по отношению к наилучшему последовательному алгоритму:

$$E' = S'/n. \quad (15)$$

Как правило, $S \leq n$, $S' \leq n$, следовательно, $E' \leq E \leq 1$. Если Р-алгоритм обеспечивает максимальное ускорение вычислительного процесса, т.е. если $S = n$, то коэффициент эффективности параллельного алгоритма $E = 1$.

Одной из целей распараллеливания сложных задач является достижение максимума коэффициента ускорения: $\max S = n$. Однако на практике этот максимум достигается не всегда.

На сегодняшний день широкое распространение получили стандарты для создания параллельных программ, в частности стандарт Message Passing Interface (MPI), система Parallel Virtual Machine (PVM), IBM Message Passing Library (MPL), P4 и др. [12].

В данной статье представлены различные программные реализации параллельных алгоритмов оптимизации в стандартах «MPI» и «OpenMP»: 1. Версия «OpenMP.1», 2. Версия «OpenMP. Static, 4», 3. Версия «OpenMP. Dynamic», 4. Версия «MPI.S», 5. Версия «MPI-1», 6. Версия «MPI.NB».

Организованы экспериментальные исследования функции $F(x)$ на базе существующего в ФГБОУ ВПО «СибГУТИ» вычислительного кластера F «Jet»:

Кластер F «Jet» укомплектован 18 вычислительными узлами, управляющим узлом, вычислительной и сервисной сетями связи, а также системой бесперебойного электропитания. Узлы построены на базе серверной платформы «Intel SR2520SAF». На каждом узле размещено два процессора «Intel Quad Xeon E5420» с тактовой частотой 2.5 ГГц. Пиковая производительность кластера – 1.4 TFLOPS.

В общем случае, в алгоритмах вместо 5 циклов (последовательный алгоритм) реализован 1 цикл, в котором идёт перебор номеров всех проектов сетей. Итерации этого цикла распределены между параллельными ветвями. Способы же распределения итераций по ветвям различны.

Каждая ветвь, зная номер проекта (итерации), получает по номеру параметры – значения p, f, h, G и m , через специальную функцию.

При прямом («наивном») распараллеливании циклов (например, цикла по параметру p) масштабируемость алгоритма будет ограничена количеством значений, которые может принимать параметр p (в текущей версии – 50).

В нашем же случае ВС имеет 144 вычислительных ядра, и такой способ распараллеливания цикла не является оптимальным. Организация одного цикла перебора около 19 000 000 итераций позволяет задействовать большее количество процессорных ядер.

Каждая ветвь по завершению своей работы передаёт в корневую ветвь номер оптимального проекта и значение функции $F(x)$.

Далее, после того как все ветви прекратят свою работу, корневая ветвь, собрав информацию со всех ветвей, выбирает оптимальный проект и выводит на экран модель сети НЦТВ и его параметры.

Для измерения времени выполнения ветвей и/или программы целиком в OpenMP-версиях программ использовалась функция «*omp_get_wtime*»; в MPI-версиях программ функция «*gettimeofday*».

Как видно из рис. 2, наилучшими показателями эффективности математических алгоритмов при расчёте показателя эффективности сети НЦТВ $F(x)$ обладают параллельные алгоритмы оптимизации, в частности алгоритм версии «MPI.NB».

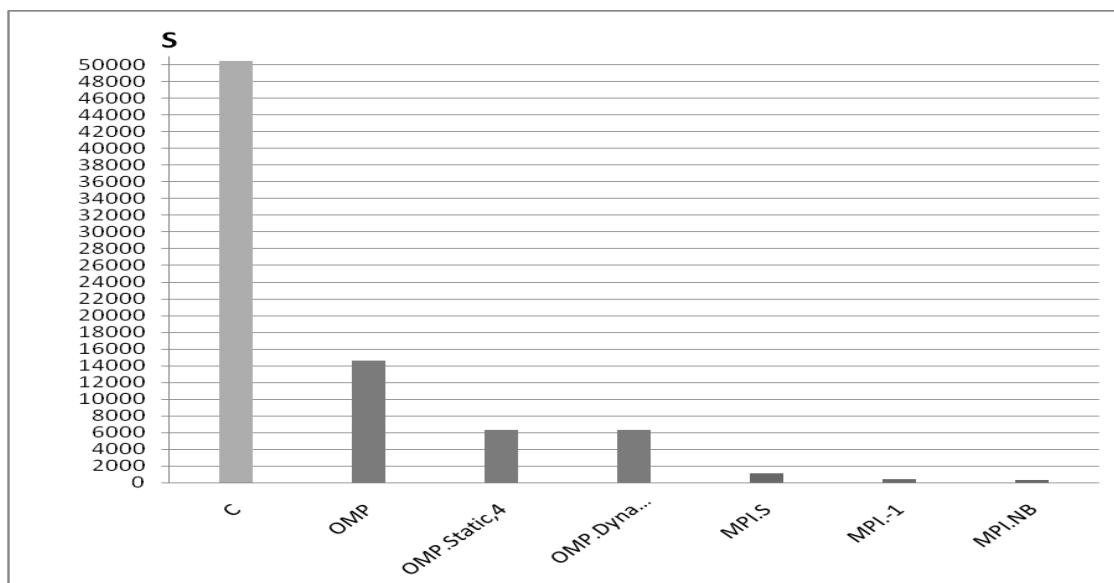


Рис. 2. Время работы программы на основе последовательного (C) и параллельного алгоритмов (OMP и MPI)

Распараллеливание сложной задачи расчёта $F(x)$ привело к тому, что:

- время расчёта $F(x)$ уменьшилось в 50 раз относительно времени расчёта $F(x)$ с помощью последовательного алгоритма;
- коэффициент ускорения параллельных S' программ относительно последовательной увеличился в среднем в 100 раз;
- коэффициент эффективности E параллельных программ близок к 100%.

4. Результаты моделирования конфигураций сети НЦТВ на территории Новосибирской области

Моделирование конфигурации сети НЦТВ, а также расчёт показателя эффективности сети НЦТВ $F(x)$ осуществлялись на специально разработанном программном продукте «Программа построения оптимального проекта сети наземного цифрового телевизионного вещания с регулярным размещением передающих станций» [13].

По итогам работы программы представлены параметры моделей оптимальных способов построения сети НЦТВ (табл. 1). Данная модель с помощью программы реализована на цифровой двумерной карте Новосибирской области (рис. 3).

Показатель качества покрытия, определяемый процентом охвата местоположений, для сетей НЦТВ выбирается не менее 70%, чтобы обеспечить приём на стандартное оборудование большему количеству домохозяйств.

В частности, в табл. 1 приведены некоторые результаты моделирования оптимальных проектов сети НЦТВ в зависимости от используемого вида модуляции (M). Расчёты производились для зоны обслуживания радиоэлектронных средств (РЭС) наземного цифрового

телевизионного вещания системы DVB-T2 фиксированного приёма в полосах частот 174 – 230 и 470 – 790 МГц. В соответствии с рекомендациями «EBU-TECH 3348» в табл. 1 значения приведены с заданными критериями: 99% времени и 70% местоположений в типовых условиях приёма.

Таблица 1. Параметры оптимальных вариантов сети НЦТВ

№ проекта	$P_{\text{прд}}, \text{Вт}$	$f, \text{МГц}$	$H_A, \text{м}$	$G, \text{дБ}$	$M, (\text{вид модуляции})$	$R_{\text{зоны прд}}, \text{км}$	Количество станций, n (шт.)	Размерность кластера, $(C_{\text{кл}})$	$F(x), \text{руб./км}^2$	$R_0, \text{км}$
417022	100	795	68	12	QPSK	47	26	4	19 083.4	81.4
417029	100	795	68	12	16-QAM	37	42	7	49 746.8	64
417034	100	795	68	12	64-QAM	32	56	9	88 672.4	55.4
417040	100	795	68	12	256-QAM	23	108	13	330 932.4	39.8

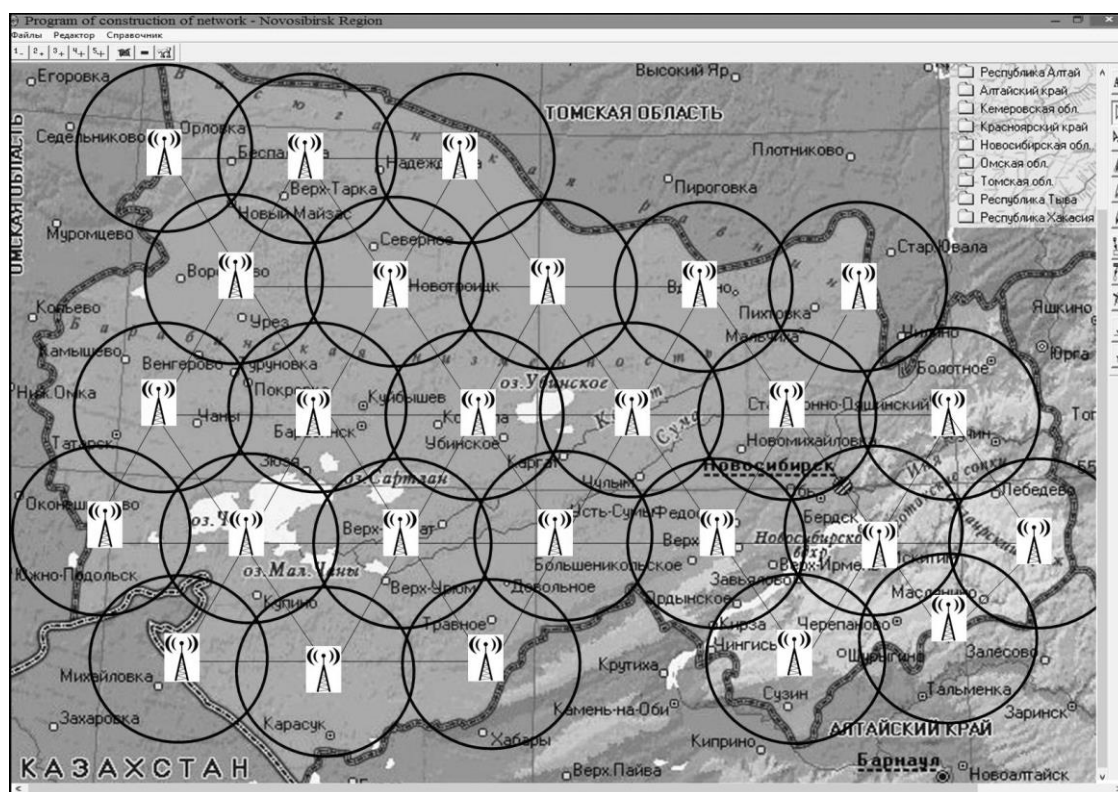


Рис. 3. Картографическая программная реализация варианта сети НЦТВ № 417022 для модуляции QPSK применительно к территории Новосибирской области

Также с помощью программы произведено частотно-территориальное планирование (ЧТП) на основе универсальной модели однородной сети. Напомним, что в системах сотовой связи, теле- и радиовещания зона обслуживания передающих станций представляется в виде шестиугольника, называемого сотой. При ЧТП соты формируют кластер, а кластер – это совокупность ближайших сот, в которых используются не повторяющиеся частотные каналы. Число таких сот в кластере называется его размерностью [2, 3, 8] и определяется выражением:

$$C_{\text{кл}} = \text{int} \left(\frac{D_{\kappa}}{R_0} \right)^2, \quad (16)$$

где R_0 – модуль сети, определяющий расстояние между соседними узлами (передатчиками) регулярной сети;

$$R_0 = \sqrt{3} \cdot R_{\zeta}; \quad (17)$$

D_{κ} – координационное расстояние между соседними передатчиками, т.е. минимальное расстояние между передатчиками, при котором их взаимное влияние не уменьшает радиус зоны вещания R_3 передатчиков по сравнению с максимальной [2].

На начальном этапе нахождения размерности кластера D_{κ} принимается равным модулю сети R_0 , а на заключительном этапе D_{κ} корректируется, добиваясь, в конечном итоге, выполнения на границе зоны обслуживания полезного передатчика защитного отношения A_3 при учёте помех от ближайших 6 мешающих передатчиков совмещённого канала.

В соответствии с полученными результатами моделирования для покрытия территории Новосибирской области цифровым телевизионным вещанием стандарта DVB-T2 с применением модуляции 64-QAM необходимое количество частотных каналов составляет $C_{\text{кл}} = 9$. Следует отметить, что при реализации одного телевизионного мультиплекса в сети НЦТВ требуемая скорость цифрового потока составляет около 30 Мбит/с. Соответственно, по техническим причинам, не все виды модуляции могут обеспечить требуемую для передачи телевизионного мультиплекса скорость цифрового потока. Как показывает практика, для передачи телевизионного мультиплекса с указанной скоростью целесообразно применять модуляции вида 64-QAM и 256-QAM (рис. 3).

Указанные в табл.1 значения подтверждают, что предложенная модель расчёта и оценки эффективности сети НЦТВ позволяет в полной мере использовать как частотный ресурс, так и лимитированный финансовый бюджет для реализации сети НЦТВ на заданной территории. Для сравнения, в существующей сети НЦТВ, реализованной на территории Новосибирской области с применением модуляции вида 64-QAM на базе первого мультиплекса (1 MUX – 10 ТВ-программ и 3 РВ-программы), размерность кластера составляет $C_{\text{кл}} = 13$.

Программная картографическая реализация на рис. 3 показывает примерное расположение 26 телевизионных станций на территории Новосибирской области, находящихся в равных условиях по расположению, техническим параметрам и уровню помех по отношению друг к другу.

На основании полученных с помощью программы результатов можно сделать выводы о том, что оптимальным методом построения сети НЦТВ является метод, основанный на применении маломощных ($P_{\text{прд}} = 100$ Вт) передатчиков с высотой подвеса передающих антенн, равной 68 м.

В качестве рекомендаций в соответствии с [9, 10] нужно сказать, что применение конфигурации сети НЦТВ, состоящей из мощных станций и высоко подвешенных антенн (метод №1) использовать нецелесообразно, т.к. в среднем, стоимость сети НЦТВ для территории Новосибирской области составляет около 530 миллиардов рублей, при этом конфигурация сети НЦТВ, состоящей из станций средней мощности и антенн на высоте подвеса около 150 м (метод №2) обойдётся бюджету примерно в 106 миллиардов рублей, а конфигурация сети НЦТВ, состоящей из маломощных станций и низко подвешенных антенн (метод №3) обойдётся бюджету в среднем 18 миллиардов рублей.

При использовании методов № 1 и № 2 целесообразно использовать данные конфигурации совместно с маломощными одночастотными ретрансляторами, т.к. при использовании указанных методов на пересечённой местности возникают, так называемые, «мёртвые зо-

ны» – это зоны, где вещание ТВ-каналов сети НЦТВ отсутствует из-за неровности рельефа местности, а также целесообразно использовать указанные методы при модернизации уже существующих аналоговых сетей телевидения [6].

5. Заключение

В статье предложен метод многопараметрической оптимизации сети НЦТВ, основанный на минимизации целевой функции $F(x)$. На базе вычислительного кластера F«Jet» разработана и реализована «Программа построения оптимального проекта сети наземного цифрового телевизионного вещания с регулярным размещением передающих станций», основанная на «методе полного перебора» с применением как последовательного, так и параллельного математических алгоритмов оптимизации, и сделан вывод о том, что для решения сложных задач, в том числе и задачи вычисления $F(x)$, целесообразно использовать параллельные алгоритмы оптимизации, основанные на распараллеливании циклов задачи, с последующим синхронным программным решением циклов.

Произведён анализ результатов оптимизации показателя эффективности сети НЦТВ $F(x)$ для разных способов построения сети НЦТВ на основе модели однородной (эталонной) сети и смоделированы оптимальные проекты сети НЦТВ в зависимости от используемого вида модуляции для территории Новосибирской области с применением с цифровой двумерной карты местности Новосибирской области.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что оптимальным способом построения сети НЦТВ является построение сети, состоящей из маломощных передатчиков ($P_{\text{прд}} = 100$ Вт) с высотой подвеса передающих антенн, равной 68 м.

Также по итогам моделирования сделаны выводы о том, что сеть НЦТВ, состоящую из мощных станций и высоко подвешенных антенн, использовать нецелесообразно, ввиду её дороговизны (почти в 30 раз относительно смоделированного программой оптимального проекта сети НЦТВ).

Предложенная в статье модель расчёта и оценки эффективности сети НЦТВ, в сравнении с уже реализованным ФГУП «РТРС» способом построения сети НЦТВ на территории Новосибирской области, позволяет более эффективно использовать как частотный ресурс, так и лимитированный финансовый бюджет для реализации сети НЦТВ на заданной территории.

Литература

1. Заключительные акты региональной конференции радиосвязи по планированию цифровой наземной радиовещательной службы в частях районов 1 и 3 в полосах частот 174 – 230 МГц и 470 – 862 МГц. МСЭ-R РКР-06, – Женева, 15 мая – 16 июня, 2006. С. 304.
2. Носов В.И. Оптимизация параметров сетей телевизионного и цифрового вещания. – Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 257 с.
3. Носов В.И. Эффективность секторных антенн и методов модуляции в сетях радиосвязи. – Новосибирск: СибГУТИ. 2008. – 235 с.
4. Носов В.И., Сартаков К.В. Оптимальное построение наземной сети цифрового телевизионного вещания// Вестник СибГУТИ. – 2009. – №2. – С.46-54.
5. Одночастотные сети // Broadcasting Телевидение и радиовещание. – 2006 – № 2. – 77–80 с.
6. Омельянюк И.В. Цифровое эфирное телевидение. Практика, новые направления развития цифрового эфирного телевидения и создания цифровых эфирных телесетей. – Санкт-Петербург: Изд-во «Телеспутник». 2010. – 152 с.

7. *Спирина Е.А.* Проектирование сетей телевизионного и звукового вещания на основе параметрической оптимизации и геоинформационных технологий: дис. канд. тех. наук. - Казань, 2003. – 145 с.
8. *Носов В.И., Штанюк Л.А., Бактеев В.Н.* Оптимизация параметров радиотелевизионных передающих станций и сети цифрового ТВ вещания на основе геоинформационной системы: Монография / СибГУТИ. Новосибирск, 2012 г. - 355 стр.
9. ГОСТ Р. Телевидение вещательное цифровое. Передающее оборудование для цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T/T2. Технические требования. Основные параметры. Методы измерения. – Москва, 2013. – 36 с.
10. Цифровое наземное телевизионное вещание в диапазонах ОВЧ/УВЧ: Справочник. М.: МСЭ – Бюро радиосвязи, 2002.
11. *Хорошевский В.Г.* Архитектура вычислительных систем: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 520 с. – (Информатика в техническом университете, ISBN 987 5 7038 3175 5).
12. *Курносков, М.Г.* Модели и алгоритмы вложения параллельных программ в распределённые вычислительные системы: дис. канд. тех. наук – Новосибирск, 2008. – 140 с.
13. *Носов В.И., Курносков М.Г., Сартаков К.В.* Программа построения оптимального проекта сети наземного цифрового телевизионного вещания с регулярным размещением передающих станций / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014615853 Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, от 04 июня 2014 года.

Статья поступила в редакцию 13.10.2014.

Сартаков Константин Валерьевич

аспирант СибГУТИ, главный специалист-эксперт отдела РЭС и ВЧУ Управления Роскомнадзора по СФО (630099, г. Новосибирск, ул. Советская, д. 33), тел. (383) 269-82-54, e-mail: skw28@yandex.ru.

Носов Владимир Иванович

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

Research of the method of multi parameter network optimization of terrestrial digital TV broadcasting

K.Sartakov, V.Nosov

In this paper, we present a research of optimal networking method of digital terrestrial television broadcasting standard DVB-T2 based on an idealized homogeneous network using software based on mathematical optimization algorithms. In 2006, a session of the Regional Radiocommunication Conference of the International Telecommunication Union (ITU) on planning digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3 (including Russia) within the bands 174 – 230 MHz and 470 – 862 MHz (RRC-06) [1] took place. Following the session's guidelines, ITU carried out a comprehensive research of the optimal networking method of terrestrial digital TV broadcasting based on the standard (homogeneous) network as an example in Novosibirsk region by introducing network efficiency index characterizing the cost of digital terrestrial television broadcasting maintenance of 1–2 km covered by Novosibirsk region.

Keywords: method of optimal networking of digital terrestrial television broadcasting, mathematical optimization algorithms, reference network, network efficiency index.