

DOI.org/10.5281/zenodo.1119191
УДК 621.397.743.037.37

А.Ф. Ломакин, Г.А. Стеценко

ЛОМАКИН АЛЕКСАНДР ФЕДОРОВИЧ – к.г.н., доцент кафедры электроники и средств связи Инженерной школы, e-mail: lomakin.alex2011@yandex.ru

СТЕЦЕНКО ГЕОРГИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – аспирант Инженерной школы, e-mail: goha-bolshoy@mail.ru

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Возможный алгоритм модернизации сети DVB-T2

Аннотация: Рассматриваются вопросы не требующей существенных затрат оптимизации существующих сетей цифрового телевидения. Разработан алгоритм программного комплекса, позволяющего обеспечить автоматизацию процесса проектирования новой или модернизации существующей сети телевидения и объективно выбрать ее оптимальную конфигурацию. Основу программного комплекса составляет метод математического моделирования; приводится обоснование выбора модели Лонгли–Райса для прогнозирования распространения радиоволн. В дальнейшем планируется переход на использование более точной модели – ITWOM (Irregular Terrain with Obstructions Model). Для проведения расчетов одночастотных сетей телевидения в программном комплексе учитываются особенности их построения, а именно использование предустановленных задержек. Для обеспечения наилучшего эффекта сетевого усиления вводится оптимизация предустановленных задержек для каждого передатчика одночастотной сети телевидения. Обсуждаются особенности разработанного алгоритма комплекса, успешно произведена верификация его прототипа. Данная работа является продолжением предыдущих исследований авторов.

Ключевые слова: напряженность поля DVB-T2, модель Лонгли–Райса, целевая функция.

Введение

Как правило, частотно-территориальное планирование одночастотных сетей представляет собой задачу значительно более сложную по сравнению с типичными многочастотными сетями. Поскольку многочастотные сети лишены большого количества проблем, связанных с синхронизацией передатчиков, для их планирования могут быть использованы простые модели с регулярным расположением передающих станций и регулярным распределением каналов [5, 9, 12]. В то же время корректное планирование одночастотных сетей предполагает обязательный учет взаимного влияния передатчиков синхронной зоны, и, если данное обстоятельство не было в достаточной степени учтено при проектировании сетей либо практические исследования действующей сети демонстрируют проблемы с приемом в зонах с высоким уровнем сигнала, необходимы работы по оптимизации уже построенной сети. За счет правильного выбора некоторых параметров сети можно добиться не только увеличения размеров зоны обслуживания, но и качества приема сигнала внутри зоны без существенных затрат.

Возможные способы оптимизации на этапе модернизации существующих сетей DVB-T2, развернутых на территориях со сложным рельефом, разрабатываются, в том числе с участием авторов данной статьи, в течение ряда лет [10, 14]. В данной статье представлен разработанный

алгоритм программного комплекса, позволяющего обеспечить автоматизацию процесса проектирования новой или модернизации существующей сети телевидения и объективно выбрать ее оптимальную конфигурацию. Следует отметить, что комплекс позволит решить задачу поиска оптимальных значений лишь некоторых параметров сети, таких как мощность (предусмотрено только снижение), предустановленная задержка, углы наклона и поворота для каждого передатчика. Остальные параметры сети либо стандартизированы, либо их изменение потребует существенных затрат.

Имитационная модель сети DVB-T2

Под целью модернизации действующей сети DVB-T2 будем понимать повышение процента ее охвата при заданных численных значениях критерия надежности и качества сигнала в точке приема без существенных капитальных затрат. Качество сети будем выражать через этот обобщенный критерий – размер зоны покрытия, который определяется через совокупность таких параметров, как уровень сигнала и отношение сигнал/шум во всех точках приема сети. Оценка названных параметров возможна либо проведением непосредственных полевых измерений, либо методами математического моделирования. Очевидно, что проведение измерений для оптимизации сети требует многократной оценки характеристик сигнала при различных параметрах работы сети, что нереально, поэтому для данной задачи логично использовать методы математического моделирования. Особенности расчета обобщенного критерия рассмотрим на основе имитационной модели эфирной сети вещания, которую условно можно представить в виде нескольких модулей:

- 1) модуль прогнозирования распространения радиоволн, использующий современные параметрические и статистические модели и позволяющий рассчитать ослабление радиосигнала на пути от передающей до приемной антенны;
- 2) модуль передающей станции, определяющий параметры радиосигнала в точке вещания;
- 3) модуль приемной станции, обуславливающий возможность приема сигнала в заданной точке;
- 4) ГИС – специализированная геоинформационная система, осуществляющая сбор, хранение, обработку и отображение пространственно-распределенной информации.

Модуль прогнозирования может включать несколько моделей распространения радиоволн, используемых для расчета напряженности поля в точке приема. Главной особенностью одночастотных сетей является наличие большого количества полезных сигналов в точке приема, прямых сигналов от различных передатчиков либо отраженных сигналов. В работе [11] показано, что результат сложения различных сигналов зависит не только от временных характеристик отдельных каналов, но и от алгоритмов синхронизации, используемых в приемнике. В идеальном случае такая модель должна учитывать как прямые, так и отраженные каналы распространения. Кроме того, расчетные данные должны быть представлены в виде функции от времени прихода сигнала и от угла его падения. Такие модели существуют, однако для крупных эфирных сетей значительные объемы расчетов существенно ограничивают возможность их практического применения.

Для практических расчетов зон обслуживания эфирных телевизионных сетей, в том числе сетей DVB-T2, используются двумерные модели распространения для дальней зоны, такие, например, как модель, изложенная в рекомендациях ITU R.1546 [6]. В то же время рекомендации R.1812 [7] позволяют учесть особенности конкретной трассы. Однако названные методики не отличаются высокой точностью, и в том случае, когда профиль трассы определяется одним или несколькими изолированными препятствиями, расчет ослабления сигнала проводится в соответствии с рекомендациями ITU R.526 [8]. В них содержатся ряд моделей, позволяющих оценить влияние дифракции на ослабление сигнала для различных типов трасс и препятствий. Список моделей, рекомендованных Международным союзом электросвязи (МСЭ), можно продолжить [1, 2, 5, 9, 12].

В многочисленных работах приводятся положительные результаты исследований использования модели Лонгли–Райса в задачах расчета зон покрытия цифровых передатчиков [9, 10, 14]. Модель учитывает ослабление в свободном пространстве, дифракционные эффекты, тропосферное рассеивание, что при наличии цифровых карт территории достаточного разрешения обеспечивает

высокую точность расчета для сложных трасс различной длины. Проведенные натурные измерения характеристик сигнала DVB-T2 показали, что модель Лонгли–Райса обеспечивает удовлетворительную точность для условий сложного рельефа и плотной городской застройки.

Для дальнейших расчетов профилей трасс и зон обслуживания модуль прогнозирования распространения радиоволн использует в качестве основной модель Лонгли–Райса в вариантах точка–область и точка–точка, модели ITWOM [9, 12], а также методики, изложенные в рекомендациях [15].

В модуле передающей станции задаются параметры, определяющие напряженность поля в точке приема, такие как географическое положение, энергетические, частотные и поляризационные характеристики, высоты подвеса и диаграммы направленности антенн. Кроме названных при эксплуатации одночастотных сетей задается такой параметр вещательной подсистемы, как задержка вещания σ_n (далее – предустановленная задержка). Как правило, эту задержку устанавливают в дополнительные (относительно основного) передатчики сети с целью уменьшить или исключить области, в которых будут складываться сигналы с задержками, превышающими длительность защитного интервала. Этот параметр является уникальным для каждого передатчика в сети. Неправильный выбор этого параметра приведет к увеличению уровня межсимвольной интерференции, снизит качество приема и уменьшит зону обслуживания. Принцип появления межсимвольной интерференции более подробно будет рассмотрен в модуле приемника.

В модуле принимающей станции задаются параметры, характеризующие поведение приемника, такие как чувствительность, высота подвеса и диаграмма направленности антенны, а также особенности работы в зависимости от режима вещания. В общем случае приемник работает в условиях многолучевого приема, когда на приемную антенну в одно время поступает оригинальный сигнал и несколько сдвинутых во времени его копий. Система OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) может эффективно работать в условиях многолучевого приема благодаря введению защитного интервала (ЗИ) – копии окончания сигнала, размещаемого перед полезным символом. Применение ЗИ позволяет практически полностью исключить влияние отраженных сигналов на прием. В случае использования только одного передатчика влияние отраженных сигналов будет нивелироваться работой ЗИ, а основной вклад в напряженность поля на входе приемной антенны вносит сигнал от единственного передатчика, т.е. наличие либо отсутствие приема определяется только уровнем и отношением сигнал–шум наиболее сильного сигнала. Граничные значения этих величин для различных параметров модуляции можно найти в [13].

В случае использования нескольких передатчиков, работающих на одной частоте, сеть называется одночастотной [4]. Тогда приемник также работает в режиме многолучевого приема, однако на приемную антенну поступают примерно равные по уровню и с различной временной задержкой сигналы, не попадающие в защитный интервал. Это приводит к появлению внутрисимвольной интерференции (ISI). Первый способ борьбы с ней рассмотрен в модуле передатчика, он заключается в установке задержки в дополнительные передатчики. Второй способ применяется уже на приемной стороне и заключается в выборе определенного момента времени внутри символа для начала демодуляции OFDM-сигнала. Он называется синхронизацией окна БПФ (быстрое преобразование Фурье).

В системах DVB-T2 для когерентного детектирования используется частотный интерполяционный фильтр. Временная полоса пропускания этого фильтра T_r , также называемая окном БПФ, всегда превышает защитный интервал $\Delta = T_u/4$, где T_u – полезная длина символа [4, 11]. Максимальное теоретически допустимое значение T_r составляет $T_u/3$, в реальных приемниках $T_r = 7/24 T_u$. Относительная задержка представляет собой разность между временем прибытия данного сигнала и временем прибытия основного сигнала, с которого начинается демодуляция. В том случае, если относительная задержка сигнала превышает Δ , но не превышает T_r , сигнал оказывается частично полезным (сигнал № 2 на рис. 1).

Любой сигнал, относительная задержка которого превышает T_r , считается помехой (см. сигнал № 3 на рис. 1) и повышает количество фазовых ошибок MER (modulation error rating). В таком случае полезный вклад n -го сигнала можно выразить в виде весовой функции [3]:

$$\omega_n(t) = \begin{cases} \left(\frac{T_u - t}{T_u}\right)^2, & (\Delta - T_p) < t \leq 0 \\ 1, & 0 < t \leq \Delta \\ \left(\frac{T_u + \Delta - t}{T_u}\right)^2, & \Delta < t \leq T_p \\ 0, & \text{в других случаях} \end{cases}, \quad (1)$$

где T_u – полезная длина символа, Δ – длина защитного интервала и T_p – интервал, в течение которого принимаемые сигналы вносят полезный вклад, t – относительная задержка.

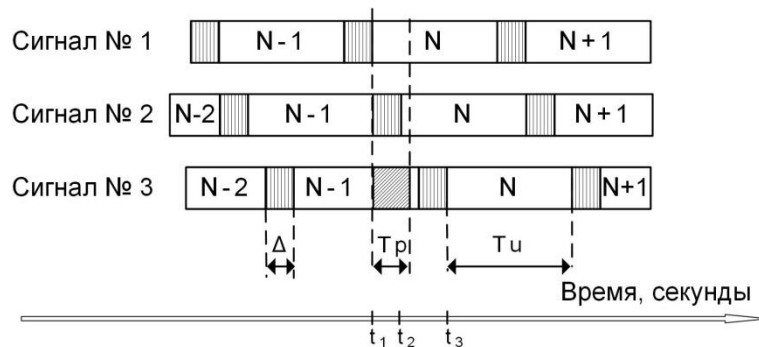


Рис. 1. Расположение сигналов во временной области в приемном тракте приемника в ОЧС: вертикальные линии – ЗИ, Δ ; T_p – окно БПФ; T_u – полезная длительность символа; t_1 , t_2 и t_3 – абсолютное время прибытия сигналов 1, 2 и 3. Диагональные линии – область сигнала № 3, являющаяся помехой – межсимвольная интерференция.

Если одночастотная сеть состоит из $A = \{1, \dots, N\}$ передатчиков и есть M передатчиков других сетей, работающих на той же частоте $B = \{1, \dots, M\}$, соотношение несущая–шум (C/I) может быть описано в терминах предыдущей функции (1) [3]:

$$\frac{C}{I} = \frac{\sum_{n \in A} P_n}{\sum_{n \in A} P_n (1 - \omega_n(\tau_n - \tau_0)) + \sum_{n \in B} P_n + N_0}, \quad (2)$$

где P_n – мощность, принимаемая от n -го передатчика, ω_n – значение весовой функции, τ_n – задержка сигнала n -го передатчика, τ_0 – задержка основного сигнала, N_0 – уровень фонового шума.

Сигнал, относительно которого была произведена синхронизация, будет основным, он всегда является полностью полезным (сигнал № 1 на рис. 1). Очевидно, что относительная задержка, и, соответственно, степень полезности каждого сигнала зависят от времени синхронизации, которое, в свою очередь, определяется стратегией синхронизации [11]. Практические исследования [2] показали, что наиболее часто производителями используется стратегия, называемая «первый сигнал выше порогового уровня», в которой позиционирование окна БПФ осуществляется относительно первого принятого сигнала, мощность которого превышает установленный пороговый уровень. Поэтому в приемниках при моделировании одночастотной сети мы будем использовать вышеназванную стратегию.

Последним модулем представлена геоинформационная система – система, осуществляющая сбор, хранение и обработку пространственно-координированных данных, в нашем случае это информация о рельефе в исследуемой области, плотности застройки и растительности, координаты расположения передатчиков и набор геодезических параметров, влияющих на распространение радиоволн.

В качестве геодезических параметров используются учитываемые в модели распространения: поверхностная рефракция, удельная электропроводность почвы, относительная диэлектрическая проницаемость почвы, тип климата.

В этот модуль также входит географическая карта, которая будет взята за основу для отображения результатов расчета зоны покрытия исследуемой сети.

Параметры сети, подлежащие оптимизации, и целевая функция

Из постановки задачи следует, что оптимизации подлежат следующие параметры сети: мощность каждого передатчика в SFN – single frequency network (предполагается уменьшение мощностей передатчиков до тех пор, пока не начнет уменьшаться зона покрытия); временная задержка излучения сигнала каждым передатчиком, входящим в синхронную зону относительно главного передатчика; углы поворота и наклона панельных антенн; распределение мощностей, подаваемых на каждую панель. Несмотря на ряд сложностей, связанных с поиском оптимальной комбинации мощностей, подаваемых на каждую панель, их углов наклона и азимутов, данный подход не предусматривает высоких финансовых затрат при модернизации сети [1].

В работе предлагается вариант целевой функции (3), которая оценивает долю обслуживаемой территории, при этом расчётные характеристики сигнала в каждой точке исследуемой области сравниваются с пороговыми значениями уровня сигнала C_{min} и отношения сигнал-шум $\frac{C}{N_{min}}$ (4).

$$F = 1 - \sum_{r=1}^R \frac{Cov_r}{R}, \quad (3)$$

$$Cov_r = \begin{cases} 0, & (C \geq C_{min}) \wedge (\frac{C}{N} \geq \frac{C}{N_{min}}) \\ 1 & \end{cases} \quad (4)$$

где R – количество расчетных точек в области, Cov_r – характеристика точки, отражающая ее отношение к зоне обслуживания.

Для повышения качества предлагаемого решения, в целевую функцию могут быть введены весовые коэффициенты, учитывающие тип подстилающей поверхности (населенный пункт, лес, море, пресный водоем и т.д.), плотность застройки. В простейшем случае можно выделить три типа точек с различными весами: наличие застройки, отсутствие застройки, и принципиально не застраиваемые (поверхности водоемов, горы и т.д.). В этом случае функция (4) примет вид:

$$Cov_r = - \begin{cases} 0, & (C \geq C_{min}) \wedge (\frac{C}{N} \geq \frac{C}{N_{min}}) \\ a & \end{cases} \quad (5)$$

где a – весовой коэффициент, характеризующий тип подстилающей поверхности:

$$a = \begin{cases} 1, & \text{застройка} \\ 0,5, & \text{незаселенная территория} \\ 0,1, & \text{водная поверхность} \end{cases} \quad (6)$$

Кроме того, через весовые коэффициенты может быть обеспечено выполнение условий электромагнитной совместимости и других возможных административных ограничений уровня сигнала.

Описание программного комплекса

С учетом вышесказанного нами была составлена схема работы программного комплекса (рис. 2). На предварительном этапе вводятся постоянные параметры элементов сети, необходимая информация в ГИС и требования к сигналу согласно ГОСТ [13] для модернизируемой сети. К постоянным параметрам передатчика и приемника относятся все параметры, не подлежащие оптимизации – координаты, высоты антенн, диаграммы направленности и т.п. Затем задаются границы и шаг изменений переменных параметров передающих станций.

После этого начинается этап моделирования работы сети и вычисления процента покрытия территории для каждой конфигурации сети. Результат каждого вычисления вместе с описанием текущей конфигурации сети заносится в базу, которая в дальнейшем будет использоваться для поиска оптимальной конфигурации сети.

Сначала предполагается этап оптимизации мощности, который заключается в поочередном снижении мощности каждого передатчика до начала уменьшения зоны покрытия. Следующий шаг – поиск оптимального угла наклона и поворота, а заключительным – нахождение комбинации предустановленных задержек всех передатчиков в сети, обеспечивающей минимальные интерференционные искажения.

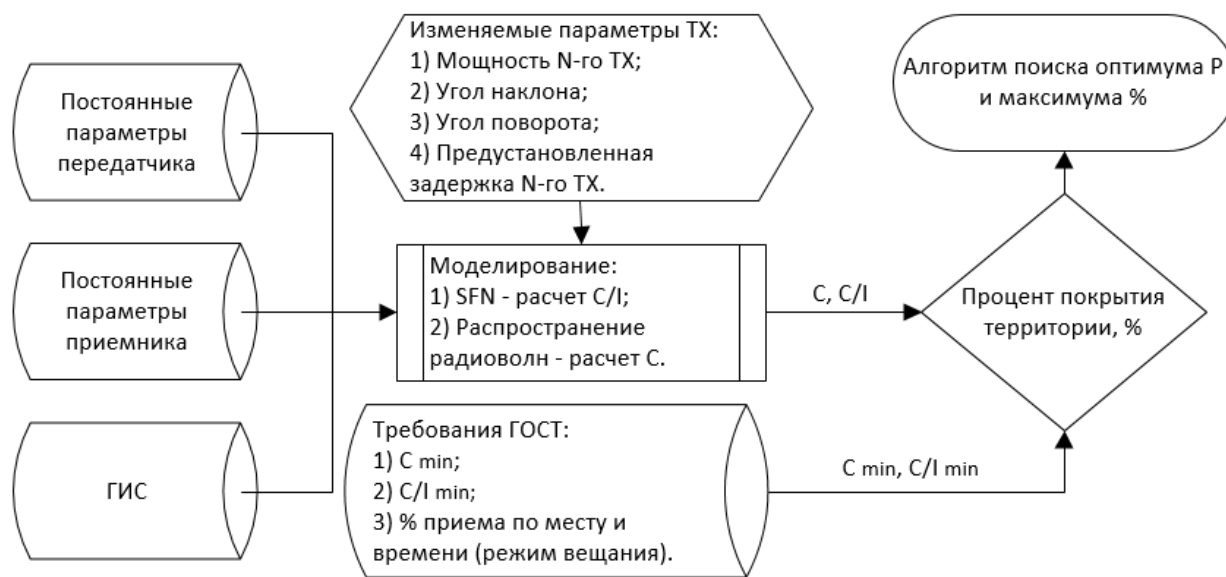


Рис. 2. Обобщенная схема программного комплекса.

При широком диапазоне изменения переменных параметров сети количество расчетов и требуемое время работы комплекса могут быть очень большими. Для ускорения работы в данном случае рекомендуется произвести предварительный этап расчета со значительно увеличенным шагом, в результате отбросив явно неэффективные конфигурации сети, тем самым сузив изначально широкий диапазон параметров. На данном этапе реализации комплекса эта операция проводится вручную экспертом, выполняющим расчеты.

Также комплекс позволяет задавать точность вычислений, устанавливая размер элементарной области для расчета (в пикселях). Одним из входных параметров в комплексе являются размеры исследуемой области, а именно длина и ширина в метрах и длина в пикселях. Из этих параметров вычисляется реальная площадь одного пикселя. Соответственно, наивысшая точность достигается при размере элементарной области, равной одному пикселю, однако такое вычисление может занять большое количество времени – десятки часов.

По завершении работы комплекс определит оптимальную конфигурацию сети с минимальной мощностью передатчиков и максимальным размером зоны обслуживания. Есть возможность отобразить и сохранить в графический файл рассчитанную зону обслуживания сети с обозначением ее границы.

Верификация программного комплекса

Для верификации программного комплекса на первом этапе была проведена серия предварительных опытов, включающих моделирование реально существующей сети DVB-T2 в г. Владивостоке, а также моделирование и оптимизацию эталонной сети [10, 14].

Одночастотная зона сети DVB-T2 Владивостока включает шесть передатчиков, работающих на частоте 598–606 МГц (37-й телевизионный канал), расположение передатчиков

показано на рис. 3. Основной передатчик сети мощностью 5 кВт расположен на сопке Орлиное гнездо в центре города. Высота сопки составляет 196 м, собственная высота антенны – 198 м. Зона обслуживания сети характеризуется сложным рельефом, большими перепадами высот и морскими территориями.

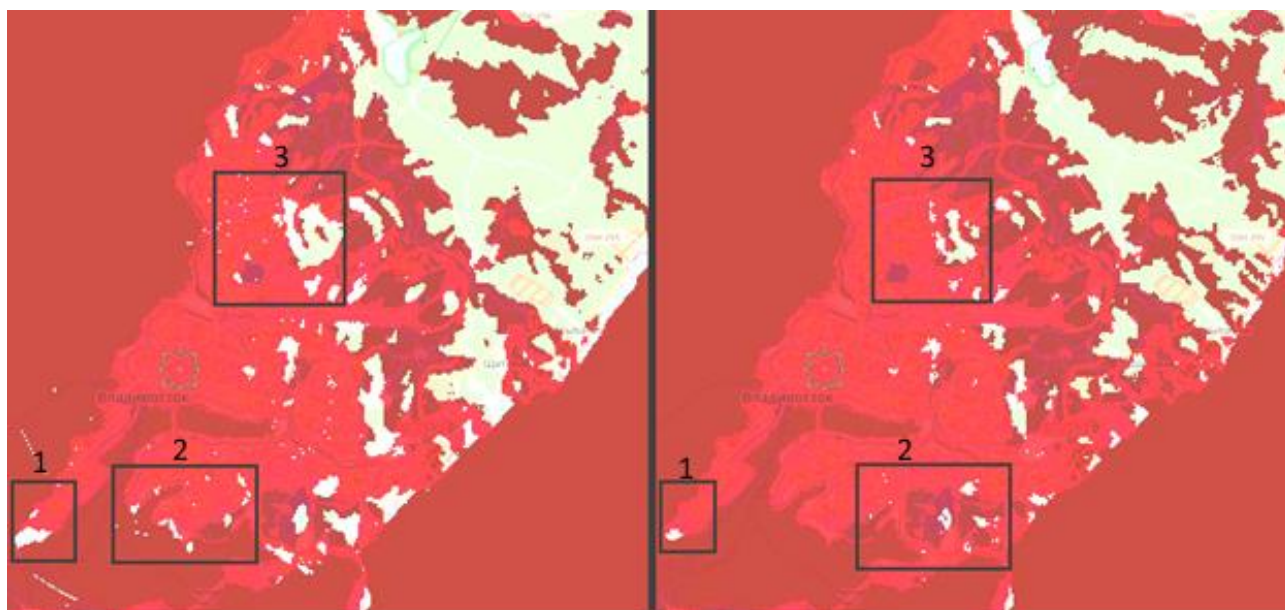


Рис. 3. Вариант возможной модернизации сети DVB-T2 в г. Владивостоке.

Анализ результатов работы программного комплекса позволил определить, что текущая конфигурация сети не является оптимальной. На рис. 3 слева изображена зона покрытия сети до модернизации, а справа – после нее. Красным цветом закрашены области, в которых уровень сигнала достаточен для качественного приема, а незакрашенные соответствуют зонам тени. Самые значительные зоны тени, расположенные в густозаселенных районах города, обозначены прямоугольниками. Было определено, что снижение мощности основного передатчика с 5 до 2 кВт не приводит к существенному уменьшению зоны покрытия в городе, а изменение угла наклона передающей антенны на о. Русском и сопке Орлиной приводит к небольшому улучшению зоны покрытия (рис. 3). Например, в районе улицы Крыгина (1 на рис. 3) и Снеговой пади (3 на рис. 3) наблюдается уменьшение, а в районе бухты Тихой (2 на рис. 3) – практически полное исчезновение зон тени.

Выводы

В данной работе рассмотрен возможный алгоритм оптимизации существующих сетей DVB-T2. Суть оптимизации сводится к достижению максимального размера и качества зоны обслуживания сети путем изменения некоторых параметров вещания, которое не сопряжено с большими затратами либо с юридическими сложностями. При этом увеличение зоны обслуживания достигается и за счет использования такой особенности одночастотных сетей, как сетевое усиление.

Суть использования предлагаемого алгоритма сводится к получению множества решений, каждое из которых представляет возможную конфигурацию сети. Для количественной оценки решений была разработана целевая функция, которая осуществляет связь физической проблемы и математического аппарата алгоритма. Целевая функция оценивает долю обслуживаемой территории, при этом расчетные характеристики сигнала в каждой точке исследуемой области сравниваются с заданными пользователем значениями C_{min} и $\frac{C}{N_{min}}$. Для определения значения напряженности поля в точке приема используется модель Лонгли–Райса. Кроме того, модель сети включает уравнения, позволяющие оценить эффект сетевого усиления при приеме сигнала от нескольких передатчиков, работающих на одной частоте.

Разработан вариант программного комплекса, который реализует предложенный метод выбора оптимальных решений, включая совокупность показателей качества. Его применение позволяет исключить субъективность при выборе оптимальных проектных вариантов сети, а также автоматизировать процесс проектирования сетей и сократить сроки модернизации сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beutler R. Frequency Assignment and Network Planning for Digital Terrestrial Broadcasting Systems. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2004.
2. Brugger R., Hemingway D. OFDM receivers - impact on coverage of inter-symbol interference and FFT window positioning. EBU Tech. Review, 2003, p. 1–12.
3. Dreo J., Petrowski A., Siarry P., Taillard E. Metaheuristics for hard optimization. Methods and case studies. Berlin, Springer, 2006, 369 p.
4. Guide on SFN Frequency Planning and Network Implementation with regard to T-DAB and DVB-T. N 1.0, July 2005.
5. Hufford G., Longley A., Kissick W. Guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode. NTIA, Tech. Rep., 1982, pp. 82–100.
6. ITU-R R.1546-3 Recommendation. Planning criteria for terrestrial digital television services in the VHF. UHF bands. Geneva, 2010.
7. ITU-R R. 1812 Recommendation. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands.
8. ITU-R R. 526 Recommendation. Propagation by diffraction.
9. Kasampalis, S., Lazaridis, P.I., Zaharis, Z.D., Bizopoulos, A., Zettas, S., Cosmas, J. Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM broadcasting. WPMC, 2013, pp. 1–6.
10. Lomakin A.F., Stetsenko G.A. Some features of the single-frequency DVB-T2 network in the city of Vladivostok // FEFU: School of Engineering Bulletin. 2016;4:25-38. URL: <https://www.dvfu.ru/-vestnikis/archive-editions/-4-29/3.-05.09.2017>
11. Lomakin A.F., Stetsenko G.A. On possible ways to synchronize the FFT window of the demodulator DVB-T2 // Scientific session of TUSUR-2014: Russian. scientific-techn. Tomsk, 2014;2:52-54. URL: http://old.tu-sur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/events/session/2014_2.pdf
12. Perez-Fontan F., Hernando-Rabanos J.M. Comparison of irregular terrain propagation models for use in digital terrain data based radiocommunication system planning tools. IEEE Transactions on Broadcasting. 1995(41);2.
13. Russian GOST P 54715-2011. Planning of terrestrial networks for digital television broadcasting. Technical basis.
14. Shkol'nyj S.I. Method for upgrading SFN DVB-T. T-COMM – telecommunications and transport. 2015(9);5:57-62.
15. Technique of frequency planning of radio electronic means of digital television broadcasting of DVB-H standard / NIIR. Moscow, 2011, p. 63–77.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

DOI.org/10.5281/zenodo.1119191

Lomakin A., Stetsenko G.

ALEKSANDR LOMAKIN, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Department of Electronics and Communication, e-mail: lomakin.alex2011@yandex.ru
GEORGIY STETSENKO, Graduate Student, e-mail: goha-bolshoy@mail.ru
School of Engineering
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

The conceivable algorithm for upgrading the DVB-T2 network

Abstract: The article is concerned with the issues of the optimisation of the existing digital TV broadcasting networks that do not require any significant expenses. The algorithm of the software complex has been developed enabling one to perform automatic searching of the optimal network configuration. The verification of the prototype of the software complex has been successfully performed. The paper is a continuation of the previous work of authors.

Key words: single-frequency DVB-T network, service zone, Longley-Rice model, target functions.

REFERENCES

1. Beutler R. Frequency Assignment and Network Planning for Digital Terrestrial Broadcasting Systems. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2004.
2. Brugger R., Hemingway D. OFDM receivers - impact on coverage of inter-symbol interference and FFT window positioning. EBU Tech. Review, 2003, p. 1–12.
3. Dreoj J., Petrowski A., Siarry P., Taillard E. Metaheuristics for hard optimization. Methods and case studies. Berlin, Springer, 2006, 369 p.
4. Guide on SFN Frequency Planning and Network Implementation with regard to T-DAB and DVB-T. N 1.0, July 2005.
5. Hufford G., Longley A., Kissick W. Guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode. NTIA, Tech. Rep., 1982, pp. 82–100.
6. ITU-R R.1546-3 Recommendation. Planning criteria for terrestrial digital television services in the VHF. UHF bands. Geneva, 2010.
7. ITU-R R. 1812 Recommendation. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands.
8. ITU-R R. 526 Recommendation. Propagation by diffraction.
9. Kasampalis, S., Lazaridis, P.I., Zaharis, Z.D., Bizopoulos, A., Zettas, S., Cosmas, J. Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM broadcasting. WPMC, 2013, pp. 1–6.
10. Lomakin A.F., Stetsenko G.A. Some features of the single-frequency DVB-T2 network in the city of Vladivostok // FEFU: School of Engineering Bulletin. 2016;4:25-38. URL: <https://www.dvfu.ru/-vestnikis/archive-editions/-4-29/3.-05.09.2017>
11. Lomakin A.F., Stetsenko G.A. On possible ways to synchronize the FFT window of the demodulator DVB-T2 // Scientific session of TUSUR-2014: Russian. scientific-techn. Tomsk, 2014;2:52-54. URL: http://old.tu-sur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/events/session/2014_2.pdf
12. Perez-Fontan F., Hernando-Rabanos J.M. Comparison of irregular terrain propagation models for use in digital terrain data based radiocommunication system planning tools. IEEE Transactions on Broadcasting. 1995(41);2.
13. GOST P 54715-2011. Planning of terrestrial networks for digital television broadcasting. Technical basis.
14. Shkol'nyj S.I. Method for upgrading SFN DVB-T. T-COMM – telecommunications and transport. 2015(9);5:57-62.
15. Technique of frequency planning of radio electronic means of digital television broadcasting of DVB-H standard / NIIR. Moscow, 2011, p. 63–77.