

Оптимизация параметров сети цифрового ТВ-вещания на основе коэффициента использования потенциала передающих станций

В. И. Носов, К. В. Сартаков

В данной статье предлагается ввести коэффициент использования потенциальной возможности передающей станции, который определяется отношением радиусов используемой зоны обслуживания и расстоянием прямой видимости. При этом необходимо отметить, что при изменении коэффициента m изменяется не только радиус зоны обслуживания, но и радиус зоны помех (координационное расстояние), от которого зависит эффективность использования выделенного для ТВ-вещания диапазона частот. Разработана методика определения оптимального значения коэффициента использования потенциальной возможности передающей станции на основе удельных капитальных затрат и эффективности использования выделенного диапазона частот по изменению размерности кластера.

Ключевые слова: радиус зоны обслуживания, координационное расстояние, коэффициент использования потенциальной возможности РТПС, расстояние прямой видимости, эффективность использования выделенного диапазона частот, удельные капитальные затраты, размерность кластера.

1. Введение

При частотно-территориальном планировании сети наземного цифрового телевизионного вещания (НЦТВ) в заданном регионе всегда актуальна задача определения оптимальных параметров радиотелевизионных передающих станций для удовлетворения требований к качеству приема полезных сигналов на границе зоны обслуживания D_0 с учётом действующих в сети помех, расположенных на расстоянии D_k от границы зоны обслуживания. Оптимизация проводится на основе определения удельных капитальных затрат на квадратный километр покрываемой НЦТВ территории $K_{уд}$ (руб./км²) и размерности кластера $C_{кл}$, зависящей от отношения координационного расстояния к радиусу зоны: $C_{кл} = \varphi(D_k/D_0)$. Исследования проводятся на основе однородной сети, в основу построения которой заложена модель с регулярным расположением передающих станций и регулярным распределением каналов. Передатчики такой однородной сети телевизионного вещания расположены в узлах регулярной решетки, в которой каждая передающая станция находится в равных условиях по расположению и уровню помех. 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 [1–6].

В статье исследуется оптимизация параметров сети цифрового ТВ-вещания на основе предложенного коэффициента использования потенциальной возможности передающих станций.

2. Постановка задачи определения оптимальных параметров радиотелевизионных передающих станций сети НЦТВ

Для внедрения современных телекоммуникационных технологий, в том числе и сетей НЦТВ стандарта DVB-T2, необходим радиочастотный спектр (РЧС) – весьма дефицитный природный ресурс. Одной из центральных проблем при проектировании и реализации цифрового телевидения является, с одной стороны, создание сети НЦТВ, которая использует РЧС наиболее эффективным образом, а с другой – оптимизация основных параметров радиотелевизионных передающих станций. Эффективность использования РЧС достигается определением территориального разнеса между РТПС сети НЦТВ (D_k) с последующим определением количества частотных каналов, необходимых для реализации сети НЦТВ (определение размерности кластера ($C_{кл}$)). К основным параметрам РТПС безусловно можно отнести мощность передатчика $P_{пд}$ (кВт) и высоту подвеса передающей антенны h_1 (м). Оптимизация этих параметров РТПС вместе с частотным планированием является эффективным инструментом при проектировании и реализации сети НЦТВ.

Между антеннами РТПС и приёмного устройства будет иметь место прямая видимость до тех пор, пока линия, проходящая через электрические центры антенн, на всём протяжении идёт выше уровня земной поверхности. В [10] показано, что при уменьшении величины просвета от H_0 , когда открыта $1/3$ зоны Френеля, до $H = 0$, когда расстояние между приёмником и передатчиком равно расстоянию прямой видимости $D_{пр}$, величина потерь увеличивается на 7–15 дБ.

Для аналогового телевизионного вещания с увеличением расстояния между передатчиком и приёмником качество приёма плавно переходит от хорошего к удовлетворительному, а затем к неудовлетворительному. Поэтому для аналогового вещания граница зоны обслуживания определяется расстоянием прямой видимости $D_0 = D_{пр} = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$, км (h_1 и $h_2 = 10$ м – высоты передающей и приемной антенн соответственно), при этом $m = D_0/D_{пр} = 1$.

В цифровых же системах вещания [1, 10] прием телевизионной программы полностью пропадает при снижении принимаемого сигнала примерно на 1 дБ ниже минимальной напряженности поля. Поэтому в ЦТВ радиус зоны обслуживания D_0 необходимо выбирать равным $0.8 D_{пр}$, то есть $m = D_0/D_{пр} = 0.8$.

На основе данных о сети ЦТВ в [1] предлагается использовать значение коэффициента $m = D_0/D_{пр} = 0.6–0.8$. Необходимо отметить [10], что при уменьшении коэффициента m не только уменьшается радиус зоны обслуживания, но и возрастают удельные капитальные затраты на сеть.

Однако в литературе отсутствуют исследования влияния коэффициента использования станции m на технические характеристики сети ЦТВ и определение его оптимальных значений.

На основе вышеизложенного при проведении исследований будем рассматривать изменение коэффициента $m \leq 0.8$.

3. Оптимизация основных параметров радиотелевизионной передающей станции НЦТВ

При проведении оптимизации параметров РТПС будем использовать модель распространения радиоволн Окамура–Хата [1, 6]. В соответствии с этой моделью потери на трассе распространения радиоволн случайны и распределены по логарифмически нормальному закону:

$$L_{\text{пот}} = L_m(d, h_1, f, h_2) + x_L + x_T, \quad (1)$$

где L_m – медианное значение величины потерь; x_L и x_T – независимые гауссовские случайные величины, характеризующие местностные L и временные T флуктуации потерь распространения. Эти величины имеют средние значения, равные нулю, и среднеквадратические отклонения, равные соответственно σ_L и σ_T .

Медианные потери распространения радиоволн на трассе передающая станция – приемник определяются из выражения [1, 6]:

$$L_m(d, h_1, f, h_2) = 69.55 + 26.16 \cdot \log f + (44.9 - 6.55 \cdot \log h_1) \cdot (\log d)^b - 13.82 \cdot \log h_1 - a(h_2), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где f – частота, на которой ведется передача сигналов, МГц; d – протяженность трассы распространения сигнала между передатчиком и приемником, км.

Кроме того, в формуле (2) обозначено:

$$a(h_2) = (1.1 \cdot \log f - 0.7) \cdot h_2 - (1.56 \cdot \log f - 0.8). \quad (3)$$

$$b_1 = \begin{cases} 1 & \text{для } d \leq 20 \text{ км;} \\ 1 + \left(0.14 + 0.000187 \cdot f + \frac{0.00107 \cdot h_1}{\sqrt{1 + 0.000007 \cdot h_1^2}} \right) \cdot [\log(0.05 \cdot d)]^{0.8} & \text{для } d > 20 \text{ км.} \end{cases} \quad (4)$$

Напряжённость поля в точке приёма E и потери на трассе распространения радиоволн $L_{\text{пот}}$ связаны соотношением [6]:

$$L_{\text{пот}} = 139.3 - E + 20 \log f + P_{\text{trs}}, \text{ дБ}, \quad (5)$$

где P_{trs} – излучаемая мощность передающей станции, дБкВт.

Подставив в выражение (5) значение величины потерь $L_{\text{пот}}$ из (1) и (2), получим выражение для определения напряжённости поля в точке приёма:

$$E(d, h_1, f, h_2) = P_{\text{trs}} + 69.82 - 6.16 \log f + 13.82 \log h_1 + a(h_2) - (44.9 - 6.55 \log h_1)(\log d)^b - \Delta_L - \Delta_T(d), \text{ дБ(мкВ/м)}, \quad (6)$$

где $\Delta_L = \sigma_L Q(L/100)$ – отклонение напряжённости поля от медианного значения в заданном проценте мест L ; $\Delta_T(d) = \sigma_T(d) Q(T/100)$ – отклонение напряжённости поля от медианного значения в заданном проценте времени T ; $Q(x)$ – нормальная интегральная функция распределения.

При планировании сетей вещания наиболее часто требуется вычислить значения функции $Q(x)$ при $x = 50 \%$, 70% , 95% и 99% . Эти значения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения функции $Q(x)$

$x, \%$	50	70	95	99
$Q(x)$	0.00	0.524	1.645	2.327

В (7) среднеквадратическое отклонение местностных флуктуаций потерь распространения σ_L от длины трассы не зависят [1, 2] и в расчетах принимаются $\sigma_L = 5.5$ дБ. Согласно экспериментальным данным [9, 12] среднеквадратическое отклонение временных флуктуаций потерь распространения σ_T зависит от длины трассы и определяется выражением:

$$\sigma_T(d) = 9.6 - 5.5 \cdot e^{-0.045 \cdot d} - 4.3 \cdot e^{-0.0042 \cdot d} - \frac{1.2 \cdot (d^{2.1} + d^{1.1})}{6 \cdot 10^4 + d^{2.1}}. \quad (7)$$

Требования к качеству приема на границе зоны обслуживания определяются следующими условиями [1, 3, 8]:

$$\begin{cases} E_s = E_{\min} \\ E_s - E_I = A \end{cases}, \quad (8)$$

где E_s – напряжённость поля сигнала на границе зоны обслуживания, дБ(мкВ/м); E_{\min} – минимальная напряжённость поля, дБ(мкВ/м); E_I – напряжённость поля интерференционной помехи на границе зоны обслуживания, дБ(мкВ/м); A – защитное отношение, дБ.

Первое условие в (8) должно выполняться на границе ЗО не менее чем в $L_s\%$ мест и $T_s\%$ времени ($L_s\%$ и $T_s\% \geq 50$); второе условие должно выполняться на границе ЗО не менее чем в $L_I\%$ мест и $T_I\%$ времени ($L_I\%$ и $T_I\% \geq 50$). Значения E_{\min} , $L_s\%$, $T_s\%$, $L_I\%$ и $T_I\%$, а также A (в дБ) для цифрового ТВ-вещания определены в [1, 8].

Первое из указанных в (8) требований к качеству приема сигналов позволяет на основе выражения (6) определить необходимую излучаемую мощность P_{irs} вещательной станции, расположенной в ЗО:

$$P_{irs}(m) = E_{\min} + \Delta_L + \Delta_T(m) - 69.82 + 6.16 \cdot \log(f) + \\ + (44.9 - 6.55 \cdot \log(h_1)) \cdot \log[D_0(m)]^b - 13.82 \cdot \log(h_1) - a(h_2), \text{ дБкВт}. \quad (9)$$

По полученному в (9) значению излучаемой мощности вещательной станции можно определить необходимую мощность передатчика для обеспечения заданного радиуса D_0 ЗО:

$$P_{tr}(m) = P_{irs}(m) - G_1 - L_\phi, \text{ дБкВт}, \quad (10)$$

где G_1 – коэффициент усиления антенны передающей станции, дБд; L_ϕ – затухание сигнала в фидере, дБ.

Объективной оценкой эффективности использования потенциальной возможности передающей станции являются суммарные капитальные затраты K_Σ на квадратный километр её зоны обслуживания $S_{\text{обсл}}$ [10, 11, 13]:

$$K_{\text{уд}}(m) = K_\Sigma(m) / S_{\text{обсл}} = K_\Sigma(m) / \pi \cdot D_0^2. \quad (11)$$

С использованием формул (6) – (11) получена зависимость удельных капитальных затрат от коэффициента m при различных высотах подвеса антенны передающей станции (рис. 1). Расчёты проводились для частоты $f = 600$ МГц, $E_{\min} = 56.48$ дБ(мкВ/м), $G_1 = 14$ дБд, $L_s = 95\%$ и $T_s = 50\%$.

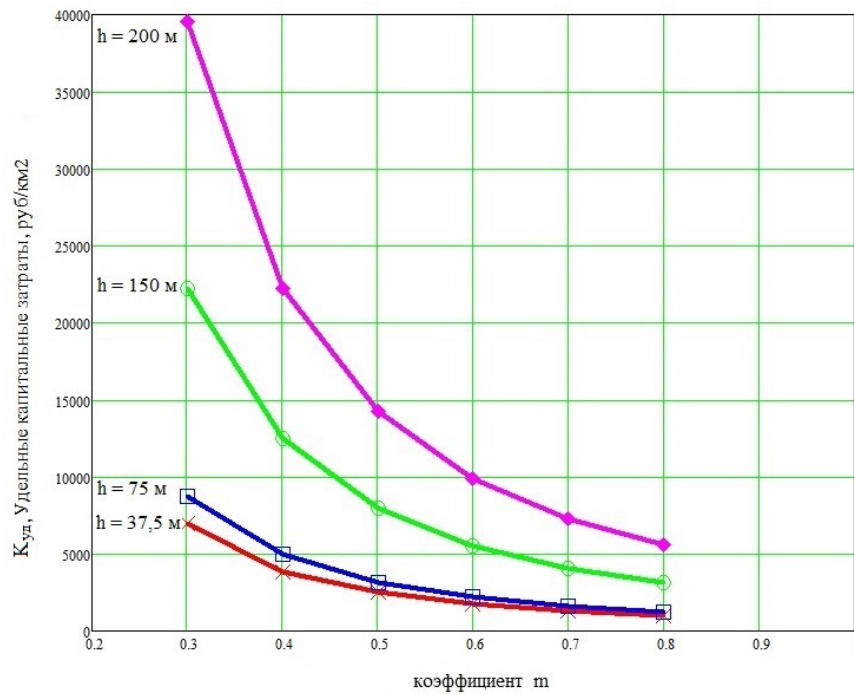


Рис. 1. Зависимость удельных капитальных затрат от коэффициента m при разных высотах подвеса антенны

Из рис. 1 следует, что с увеличением m , т.е. при стремлении радиуса зоны обслуживания D_0 к расстоянию прямой видимости $D_{пр}$, удельные капитальные затраты уменьшаются. Поэтому целесообразно максимально использовать потенциальные возможности передающей станции. Так, если задаться допустимым увеличением удельных капитальных затрат в пределах 25 %, то при высотах подвеса антенн $h_1 = 150$ и 200 м коэффициент m можно выбирать в пределах от 0.7 до 0.8, а при высотах подвеса антенн $h_1 = 37.5$ и 75 м коэффициент m можно выбирать в пределах от 0.55 до 0.8.

4. Оптимизация основных параметров радиотелевизионной передающей станции с учётом помех в сети НЦТВ

Второе из указанных в (8) требований к качеству приема сигналов позволяет определить расстояние $D_k(m)$ между передающими станциями сети НЦТВ, в которых используется один и том же частотный канал. На рис. 2 показан план расположения полезной станции (ПС) в ЗО, имеющей радиус D_0 , и мешающей станции (МС), которая расположена на расстоянии $d_k(m)$ от станции ПС и работает в совмещённом частотном канале. Приемная станция расположена на границе ЗО и её антенна направлена на станцию ПС.

Для выполнения второго условия качественного приёма на границе зоны обслуживания (8) необходимо определить напряжённость поля интерференционных помех от мешающих станций сети НЦТВ.

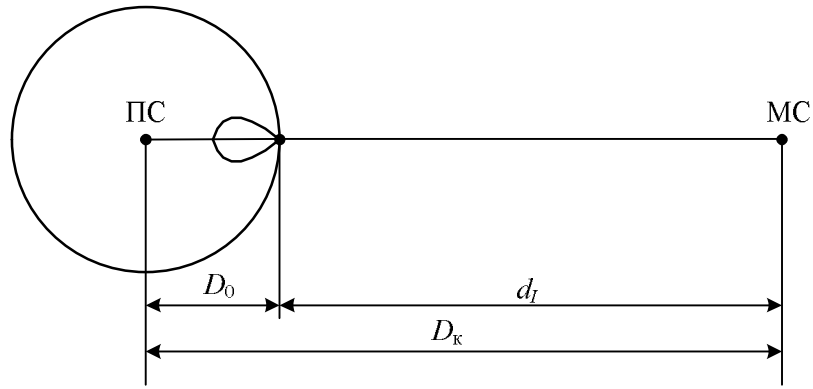


Рис. 2. Расположение полезной и мешающей радиотелевизионных станций сети НЦТВ

Определение оптимальных параметров РТПС производится на основе универсальной модели однородной сети [11], в которой каждая передающая станция находится в равных условиях по расположению и уровню помех. В универсальной модели однородной сети регулярной структуры зона обслуживания каждого передатчика находится в окружении 18 соканальных помех (рис. 3), расположенных в углах трех правильных шестиугольников с координатными расстояниями D_{k1} , $\sqrt{3}D_{k1}$, $2D_{k1}$ соответственно.

Допустимое отношение мощности сигнала к суммарной мощности интерференционных помех (защитное отношение) A определяется техническими характеристиками конкретных систем радиосвязи.

В [7] показано, что наибольшее влияние на зону обслуживания центральной станции (рис. 3) оказывают помехи, создаваемые шестью ближайшими передающими станциями. В соответствии с (6) суммарная напряжённость поля интерференционных помех будет равна:

$$E_{I\Sigma}[D_K(m), h_1, f, h_2, m] = \sum_{j=1}^6 P_{trfj}(m) + 69.82 - 6.16 \log f + 13.82 \log h_1 + a(h_2) - (44.9 - 6.55 \log h_1)[\log D_K(m)]^b - \Delta_{L_{\text{экв}}}(m) - \Delta_{T_{\text{экв}}}(m), \text{ дБ(мкВ/м)}. \quad (12)$$

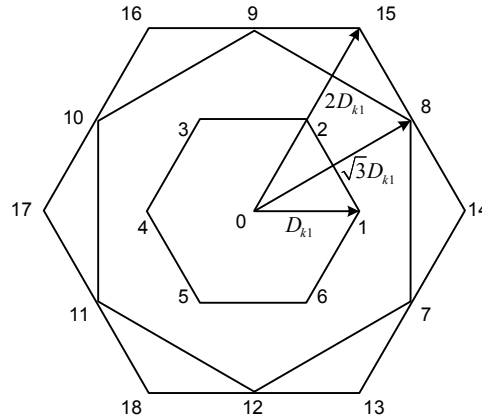


Рис. 3. Расположение помех по совмещённому каналу

Случайная величина, являющаяся суммой независимых логарифмически нормальных случайных величин, может быть аппроксимирована логарифмически нормальным законом [9]. Суммарное среднеквадратическое отклонение будет равно:

$$\sigma_{I\Sigma} = \sqrt{\sigma_{L_{\text{экв}}}^2 + \sigma_{T_{\text{экв}}}^2} = \frac{\sqrt{\ln \cdot \Psi^2}}{\alpha}, \quad (13)$$

Если учесть, что все мешающие передатчики расположены на одинаковом расстоянии D_I от полезного (рис. 3) и имеют одинаковую излучаемую мощность, то Ψ определяется следующей формулой:

$$\Psi^2 = 1 + \sum_{i=1}^n \left\{ \exp \left\{ \alpha^2 \left[\sigma_L^2 + \sigma_{Ti}^2 (D_k(m)) \right] \right\} - 1 \right\}. \quad (14)$$

Суммарная дисперсия $\sigma_{I\Sigma}$ распределяется между $\sigma_{L\text{экв}}$ и $\sigma_{T\text{экв}}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{L\text{экв}} [D_k(m)] &= \sigma_{I\Sigma} \left[\sigma_L / \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_T^2 (D_k(m))} \right], \\ \sigma_{T\text{экв}} [D_k(m)] &= \sigma_{I\Sigma} \left[\sigma_T (D_k(m)) / \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_T^2 (D_k(m))} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

В соответствии с (8) и (12) можно записать:

$$E_{I\Sigma} [D_k(m), h_1, f, h_2, m] = E_{\min} - A, \text{ дБ(мкВ/м)}. \quad (16)$$

Решением уравнения (16) будет такое значение $D_k(m)$, при котором левая и правая его части будут равны.

С использованием формул (12) – (16) получена зависимость координационного расстояния от коэффициента m при различных высотах подвеса антенны передающей станции (рис. 4). Расчёты проводились для частоты $f = 600$ МГц, $E_{\min} = 56.48$ дБ(мкВ/м), $G_1 = 14$ дБд, $L_I = 50$ % и $T_I = 1$ %, защитного отношения с учётом защищённости приёмной антенны $A = 13.8$ дБ.

Как видно из рис. 4, при увеличении коэффициента m требуемое координационное расстояние D_k увеличивается. Так, при высоте подвеса передающей антенны $h_1 = 37.5$ м координационное расстояние увеличивается с 90 км при $m = 0.3$ до 188 км при $m = 0.8$, т.е. в 2.1 раза, а при $h_1 = 200$ м координационное расстояние увеличивается со 156 км до 253 км, т.е. в 1.62 раза. При этом высота подвеса антенны увеличивается в 5.33 раза. Таким образом, при увеличении m с ростом высоты подвеса антенны рост требуемого координационного расстояния замедляется. Таким образом, с точки зрения требуемого координационного расстояния и эффективности использования выделенного диапазона частот целесообразно использовать более высокие антенные опоры.

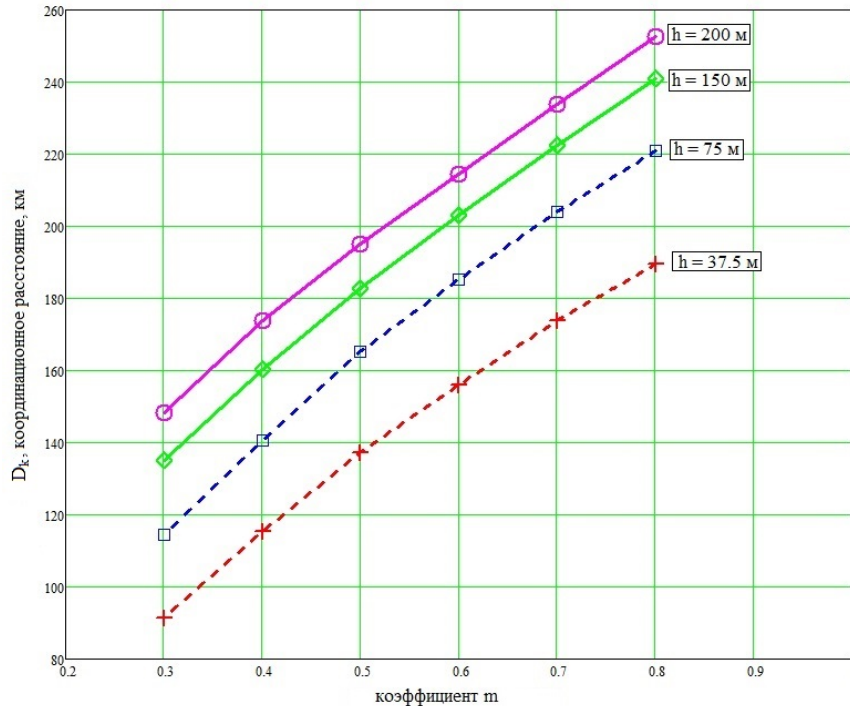


Рис.4. Зависимость координационного расстояния D_k от коэффициента покрытия m

На рис. 5 приведена зависимость необходимого радиуса зоны обслуживания D_0 от координационного расстояния D_k .

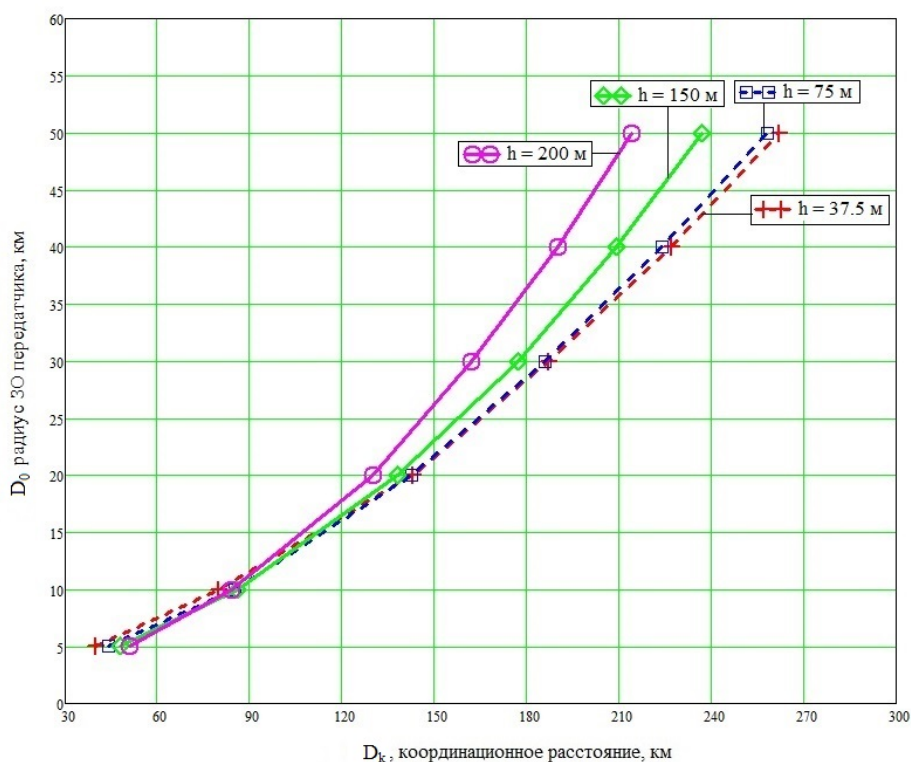


Рис. 5. Зависимость радиуса покрытия D_0 от координационного расстояния D_k

Из рис. 5 видно, что при заданном радиусе зоны обслуживания требуемое координационное расстояние уменьшается с ростом высоты подвеса антенны h_1 . Так, при заданном радиусе $D_0 = 30$ км требуемое координационное расстояние при $h_1 = 37.5$ м составляет $D_k = 187$ км, а при $h_1 = 200$ м $D_k = 160$ км, т.е. уменьшается в 1.17 раза. Таким образом, при заданном радиусе зоны обслуживания для эффективного использования выделенного диапазона частот необходимо использовать большие высоты подвеса антенн.

5. Заключение

В статье предложена методика определения оптимальных параметров радиотелевизионных передающих станций сети наземного цифрового ТВ-вещания на основе коэффициента использования потенциала передающих станций.

Показано, что с увеличением m , т.е. при стремлении радиуса зоны обслуживания D_0 к расстоянию прямой видимости $D_{пр}$, удельные капитальные затраты уменьшаются. Поэтому целесообразно максимально использовать потенциальные возможности передающей станции. Так, если задаться допустимым увеличением удельных капитальных затрат в пределах 25 %, то при высотах подвеса антенн $h_1 = 150$ и 200 м коэффициент m можно выбирать в пределах от 0.7 до 0.8, а при высотах подвеса антенн $h_1 = 37.5$ и 75 м коэффициент m можно выбирать в пределах от 0.55 до 0.8.

Также установлено, что при увеличении коэффициента m требуемое координационное расстояние D_k увеличивается. Так, при высоте подвеса передающей антенны $h_1 = 37.5$ м координационное расстояние увеличивается с 90 км при $m = 0.3$ до 188 км при $m = 0.8$, т.е. в 2.1 раза, а при $h_1 = 200$ м координационное расстояние увеличивается со 156 км до 253 км, т.е. в 1.62 раза. При этом высота подвеса антенны увеличивается в 5.33 раза. Таким образом, при увеличении m с ростом высоты подвеса антенны рост требуемого координационного расстояния замедляется. Таким образом, с точки зрения требуемого координационного расстояния и эффективности использования выделенного диапазона частот целесообразно использовать более высокие антенные опоры.

Установлено, что при заданном радиусе зоны обслуживания требуемое координационное расстояние уменьшается с ростом высоты подвеса антенны h_1 . Так, при заданном радиусе $D_0 = 30$ км требуемое координационное расстояние при $h_1 = 37.5$ м составляет $D_k = 187$ км, а при $h_1 = 200$ м $D_k = 160$ км, т.е. уменьшается в 1.17 раза. Таким образом, при заданном радиусе зоны обслуживания для эффективного использования выделенного диапазона частот необходимо использовать большие высоты подвеса антенн.

Литература

1. Быховский М. А., Дотолев В. Г., Лашкевич А. В., Носов В. И. и др. Основы частотно-территориального планирования сетей телевизионного вещания. Учебное пособие / Под ред. М.А. Быховского. М.: Горячая линия–Телеком, 2015. 368 с.
2. Быховский М. А., Васильев А. В., Носов В. И. и др. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Том 3: Частотное планирование сетей телерадиовещания и подвижной связи. Автоматизация управления использованием радиочастотного спектра. Монография / Под ред. М.А. Быховского. М.: КРАСАНД, 2012. 240 с.
3. Цифровое наземное телевизионное вещание в диапазонах ОВЧ/УВЧ. Справочник МСЭ. Бюро радиосвязи. 2002. 267 с.
4. 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. 304 с.
5. ГОСТ Р 54715-2011 Телевидение вещательное цифровое. Планирование наземных сетей цифрового телевизионного вещания. Технические основы. Москва, 2013. 45 с.
6. Recommendation ITU-R P.1546-5. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz.
7. Носов В. И. Эффективность секторных антенн и методов модуляции в сетях радиосвязи : Монография. СибГУТИ. Новосибирск, 2008. 235 с.
8. Локишин М. Г., Шур А. А., Кокорев А. В., Краснощёков Р. А. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания. Справочник. М.: Радио и связь, 1988. 63 с.
9. Fenton L. F. The sum of lognormal probability distribution in scatter transmission systems // IRE Trans. 1960. CS-8, № 1. 50 p.
10. 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. 355 с.
11. Носов В. И. Оптимизация параметров сетей телевизионного и цифрового вещания: Монография. СибГУТИ. Новосибирск, 2005. 257 с.
12. Носов В. И., Сартаков К. В. Оптимальное построение наземной сети цифрового телевизионного вещания // Вестник СибГУТИ. 2009. № 2. С.46–54.
13. Сартаков К. В., Носов В. И. Исследование метода многопараметрической оптимизации сети наземного цифрового ТВ-вещания // Вестник СибГУТИ. 2014. № 4. С. 46–54.

Статья поступила в редакцию 28.09.2015;
переработанный вариант – 31.05.2016

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@sibsutis.ru.

Сартаков Константин Валерьевич

аспирант СибГУТИ, заместитель начальника отдела РЭС и ВЧУ Управления Роскомнадзора по СФО, тел. (383) 269-82-54, e-mail: skw28@yandex.ru.

Network parameters optimization of digital TV broadcasting on the basis of transmitting stations efficiency potential

V. Nosov, K. Sartakov

In this article, it is offered to introduce efficiency of a potential possibility of transmitting station which is defined by the relation of radiuses of the useful service zone and the line of sight distance. At the same time it should be noted that changing the coefficient m it changes not only the radius of service zone, but also the radius of hindrances (coordination distance) zone. The efficiency of allocated frequency band usage for TV broadcasting depends on it. The determination technique of optimum value of transmitting station potential possibility efficiency on the basis of specific capital expenditure and allocated frequency band usage efficiency for changing cluster dimension is developed.

Keywords: service zone radius; coordination distance; efficiency of a potential possibility of transmitting station; distance of direct visibility; efficiency of use of the allocated range of frequencies; specific capital expenditure; dimension of a cluster.