УДК 621.397

ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО НАЗЕМНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ В СТРАНАХ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ

МИХАЙЛОВ С.А, ДРАГАНОВ В.М., МАКОВЕЕНКО Д.А, ГАССАН ХАЛИЛЬ

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

PLANNING PRINCIPLES OF DIGITAL TERRESTRIAL TV IN THE COUNTRIES WITH A DIFFICULT RELIEF

MIKHAYLOV S.A, DRAGANOV V.M., MAKOVEYENKO D.A.,GASSAN HALIL

Odessa national academy of telecommunications named after A.S. Popov

Аннотация. *Получены количественные результаты дифракционных потерь в условиях горного рельефа. Разработаны рекомендации относительно выбора параметров физического уровня при построении сети цифрового наземного телевизионного вещания в Сирийской Арабской Республике.*

Summary. *Quantitative results losses of diffraction in the conditions of a mountain relief are received. Recommendations concerning a choice of parameters of physical level are developed at construction of a network of a digital terrestrial broadcasting announcement in the Syrian Arab Republic.*

Введение

Моделирование потерь распространения радиоволн остается объектом пристального внимания проектировщиков информационных радиотехнических систем. В условиях горной местности основной проблемой при определении потерь является расчет напряженности вторичного поля в месте приема.

В соответствии с принципом Гюйгенса-Кирхгофа поле в любой точке пространства рассматривается как результат суперпозиции вторичных источников, распределенных на воображаемой замкнутой поверхности, окружающей источник или точку наблюдения [1]. Как показано в работе [2] для таких препятствий как горные вершины, крутые холмы может применяться аппроксимация клином. В соответствии с [3] теория дифракции на клине является общим случаем дифракции на полуплоскости, но в отличие от случая полуплоскости два возникающих при этом пространства и источники не совпадают друг с другом. В работе [3] показано, что при переходе от полуплоскости к клину происходит отражение “физического” пространства в “математическое” и оба пространства образуют многолистное риманово пространство. Однако, в литературных источниках не представлены количественные показатели дифракционных потерь в случае клинообразного препятствия. Кроме того, на данный момент не достаточно рассмотрена возможность компенсации потерь дифракции при планировании цифрового наземного телевидения, поэтому, учитывая широкое внедрение цифрового наземного телевизионного вещания, исследования в данном направлении представляют большой практический интерес.

Целью настоящей работы является получение количественных результатов дифракционных потерь и разработка рекомендаций по выбору параметров физического уровня для стран с преимущественно горным рельефом местности.

1. Математическая модель дифракционных потерь в условиях горной местности

Для определения потерь, вызванных дифракцией в случае сложной местности, представим геометрию участка трассы в виде клиновидного препятствия с конечной проводимостью, как показано на рис. 1 [2].

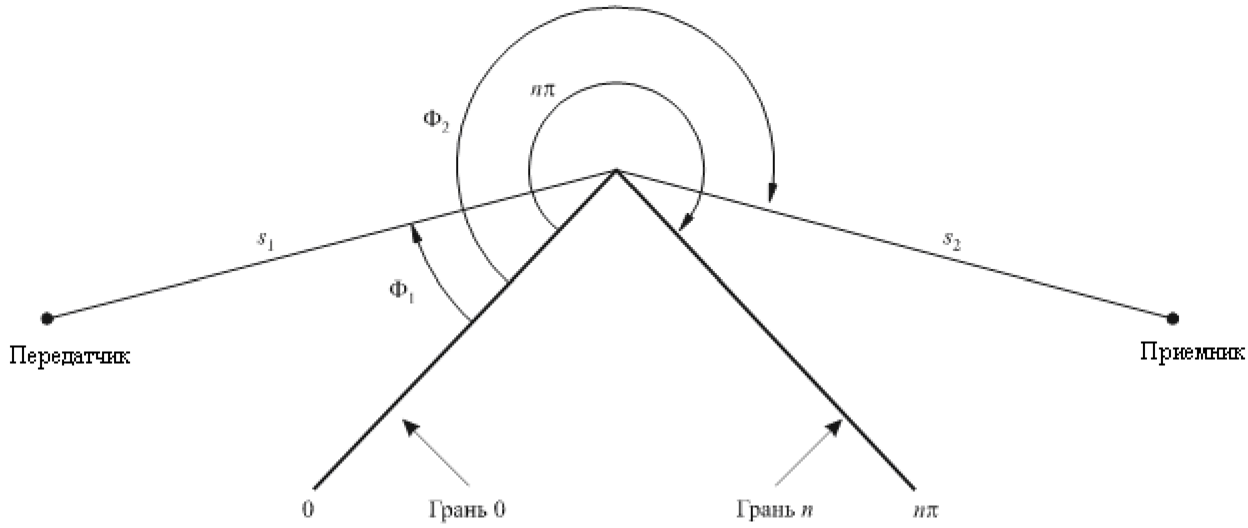

Рисунок 1 – Геометрия применения дифракции над кромкой

В этом результирующая напряженность поля в соответствии с формулировкой однородной теории дифракции в точке расположения приемника имеет вид [2]:

$$E = E_0 \frac{\exp(-\mathrm{j}ks_1)}{s_1} D^{\substack{\perp \\ \|}} \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}} \exp(-\mathrm{j}ks_2)\,, \tag{1}$$

где:

E – электрическое поле в точке поля; E_0 – нормированная амплитуда напряженности электрического поля падающей волны; s_1 – расстояние источника до дифрагирующей кромки; s_2 – расстояние от дифрагирующей кромки до приемника; k – волновое число, равное $2\pi/\lambda$; $D^{\substack{\perp \\ \|}}$ – коэффициент дифракции, зависящий от поляризации (параллельной или нормальной плоскости падения) поля, падающего на кромку.

Коэффициент дифракции для кромки препятствия с конечной проводимостью определяется как [2]:

$$\begin{aligned} D^{\substack{\perp \\ \|}} = \frac{-\exp(-\mathrm{j}\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k}} \Bigg[& \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi + (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) F(kLa\,(\Phi_2 - \Phi_1)) + \\ & + \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi - (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) F(kLa\,(\Phi_2 - \Phi_1)) + R_0^{\substack{\perp \\ \|}} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi - (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) F(kLa\,(\Phi_2 + \Phi_1)) + \\ & + R_n^{\substack{\perp \\ \|}} \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi + (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) F(kLa\,(\Phi_2 + \Phi_1)) \Bigg] \end{aligned} \tag{2}$$

где

Φ_1 – угол падения, измеренный от грани падения (грань 0); Φ_2 – угол дифракции, измеренный от грани падения (грань 0); n – внешний угол кромки как кратное число π радиан (фактический угол = $n\pi$); $F(x)$ – это интеграл Френеля, определяемый как [4]

$$F(x) \;=\; 2\mathrm{j}\sqrt{x}\,\exp(\mathrm{j}x)\int\limits_{\sqrt{x}}^{\infty}\exp(-\mathrm{j}t^2)\;\mathrm{d}t\,, \tag{3}$$

$$\int\limits_{\sqrt{x}}^{\infty}\exp(-\mathrm{j}t^2)\;\mathrm{d}t \;=\; \sqrt{\frac{\pi}{8}}(1\;-\;\mathrm{j})\;-\;\int\limits_{0}^{\sqrt{x}}\exp(-\mathrm{j}t^2)\;\mathrm{d}t\,. \tag{4}$$

$R_0^{\perp||}, R_n^{\perp||}$ – коэффициенты отражения нормальной или параллельной поляризации, соответственно равные:

$$R^{\perp} \;=\; \frac{\sin(\Phi)\;-\;\sqrt{\eta\;-\;\cos(\Phi)^2}}{\sin(\Phi)\;+\;\sqrt{\eta\;-\;\cos(\Phi)^2}} \tag{5}$$

$$R^{||} \;=\; \frac{\eta\sin(\Phi)\;-\;\sqrt{\eta\;-\;\cos(\Phi)^2}}{\eta\sin(\Phi)\;+\;\sqrt{\eta\;-\;\cos(\Phi)^2}}\,, \tag{6}$$

где:

$\Phi\;=\;\Phi_1$ для R_0 и $\Phi\;=\;(n\pi\;-\;\Phi_2)$ для R_n; $\eta\;=\;\varepsilon_r\;-\;\mathrm{j}\,8\cdot10^9\sigma/f$; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала, образующего кромку препятствия; σ – проводимость материала, образующего кромку препятствия; f – частота.

На границах тени и отражения одна из функций котангенса в уравнении (2) становится сингулярной.

Однако $D^{\perp||}$ остается равным конечному значению, и его можно легко оценить. Для этого член, содержащий сингулярную функцию котангенса, определяется для небольшой величины ε как [2]:

$$\mathrm{ctg}\left(\frac{\pi\;\pm\;\beta}{2n}\right)F(kLa^{\pm}(\beta))\;\cong\;n\;\left[\sqrt{2\pi kL}\;\;\mathrm{sign}(\varepsilon)\;-\;2kL\varepsilon\,\exp(\mathrm{j}\pi/4)\right]\exp(\mathrm{j}\pi/4) \tag{7}$$

при ε, определяемом как:

$$\varepsilon\;=\;\pi\;+\;\beta\;-\;2\pi\,nN^{+}\quad\text{для }\beta\;=\;\Phi_2\;+\;\Phi_1 \tag{8}$$

$$\varepsilon\;=\;\pi\;-\;\beta\;+\;2\pi\,nN^{-}\quad\text{для }\beta\;=\;\Phi_2\;-\;\Phi_1. \tag{9}$$

Результирующий коэффициент дифракции будет сохраняться постоянным на границах тени и отражения при условии, что в процессе вычисления отраженных лучей используется один и тот же коэффициент отражения.

Поле E_{DL}, обусловленное дифрагированным лучом, плюс луч на линии прямой видимости для $(\Phi_2-\Phi_1)<\pi$, определяется как:

$$E_{DL}\;=\;\begin{cases}E\;+\;\dfrac{\exp(-\mathrm{j}ks)}{s} & \text{для}\quad\Phi_2\;<\;\Phi_1\;+\;\pi\\ E & \text{для}\quad\Phi_2\;\geq\;\Phi_1\;+\;\pi,\end{cases} \tag{10}$$

При $(\Phi_2-\Phi_1)=\pi$ второй член котангенса в уравнении (2) станет сингулярным и коэффициент дифракции определяется с помощью выражения (7).

Теперь можно определить напряженность поля E_{df} в месте расположения приемника относительно поля, которое будет существовать в этой точке при отсутствии клиновидного препятствия. В этом случае положим в выражении (3) $E_0\;=1$ и запишем:

$$E_{df} = 20\log\left(\left|\frac{s\,E}{\exp(-\mathrm{j}ks)}\right|\right), \qquad (11)$$

2. Количественные результаты дифракционных потерь в условиях горного рельефа

Для случая, когда внешний угол кромки (см. рис. 1) равен $n = 2$, а коэффициенты отражения равны нулю, математическая модель дифракции, описанная формулами (2)-(11) сводится к модели потерь над клиновидным препятствием. Геометрия участка трассы для клиновидного препятствия показана на рис. 2 [2].

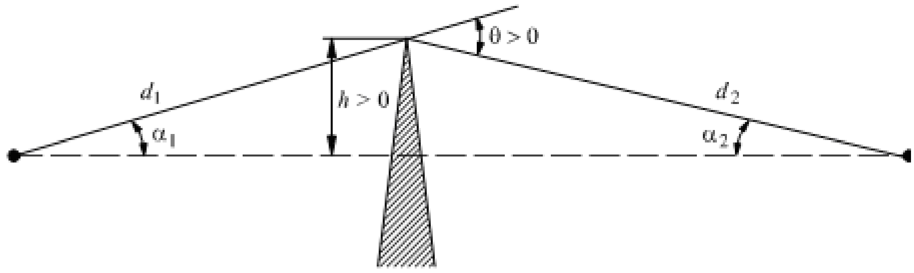

Рисунок 2 – К описанию модели потерь над клиновидным препятствием

В абсолютно идеальном случае все геометрические параметры входят в один безразмерный параметр, обычно обозначаемый через ν, который может быть выражен через следующие параметры [2]:

$$\nu = \sqrt{\frac{2\,h\,\theta}{\lambda}}, \qquad (12)$$

где:

h – высота вершины препятствия над прямой линией, соединяющей два конца трассы. Если вершина находится ниже этой линии, h отрицательна; θ – угол дифракции, имеющий тот же знак, как у h.

Таким образом, дифракционные потери представляет собой зависимость от высот приемной и передающей антенн, расстояния до препятствия, частоты и угла просвета местности.

Дифракционные потери $J(\nu)$ определяются как [2]:

$$J(\nu) = -20\log\left(\frac{\sqrt{[1 - C(\nu) - S(\nu)]^2 + [C(\nu) - S(\nu)]^2}}{2}\right), \qquad (13)$$

где $C(\nu)$ и $S(\nu)$ – действительные и мнимые части, соответственно, комплексного интеграла Френеля, определенного в выражении (5), $F(\nu)$.

Для параметра ν, превышающего –0,78, приближенное значение можно получить как [4]:

$$J(\nu) = 6{,}9 + 20\log\left(\sqrt{(\nu - 0{,}1)^2 + 1} + \nu - 0{,}1\right). \qquad (14)$$

Используя формулы (11)-(14) для различных углов дифракции определены потери распространения радиоволн над клиновидным препятствием. Результаты расчетов представлены на рис 3.

На основе полученных результатов дифракционных потерь было разработано программное обеспечение [5], позволяющее планировать зону покрытия для радиовещательных и подвижных служб. В этом случае учитывается, что полезная напряженность поля, в каждой точке приема будет определена с использованием поправочного коэффициента просвета местности, учитывающего возможное экранирование приемной антенны в условиях сложного рельефа местности.

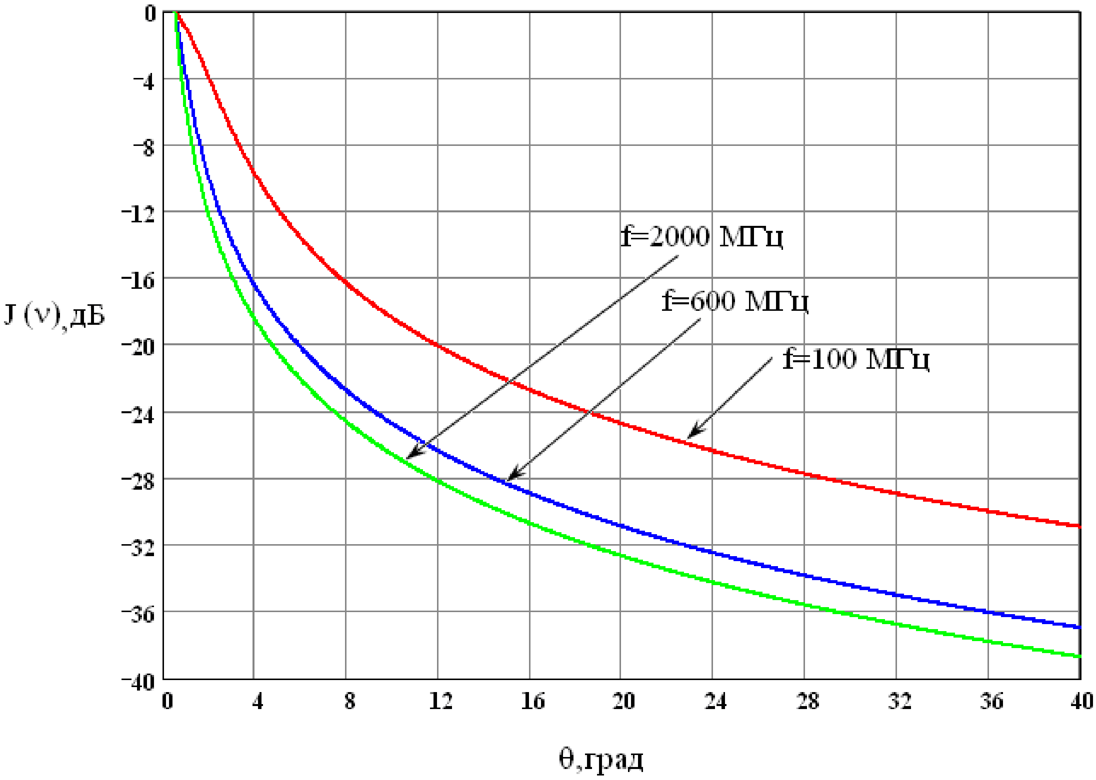

Рисунок 3 – Зависимость дифракционных потерь от угла дифракции

С помощью данного программного обеспечения, смоделирована зона покрытия от передатчика, расположенного в г. Хомс (Сирийская Арабская Республика). Зона покрытия показана на рис. 4. Зеленым цветом показан граничный уровень минимальной напряженности поля (54,2 дБмкВ/м), необходимый для уверенного приема сигнала, как показано в [6].

Исходные данные, для моделирования зоны покрытия, передатчика телевизионного цифрового вещания, расположенного в г. Хомс указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для определения зоны покрытия передатчика в г. Хомс

Параметр	**Значение**
Город	Хомс
Режим передачи	Неиерархический режим
Модуляция и скорость кодирования	64-QAM 3/4
Координаты	34 42 00 N 36 43 12 E
Режим несущих	8k
Значение *C/N*	21,2 дБ
Защитный интервал	1/4
Значения чистой битовой скорости,	22,39 Мбит/с
Минимальная медианная напряженность поля	54,2 дБмкВ/м
ТВ канал	26
Мощность на выходе передатчика	400 Вт
Высота передающей антенны над уровнем поверхности земли	95 м
Коэффициент усиления антенны	8 дБ
Тип приема	Стационарный на направленную антенну на крыше здания, на высоте 10 м

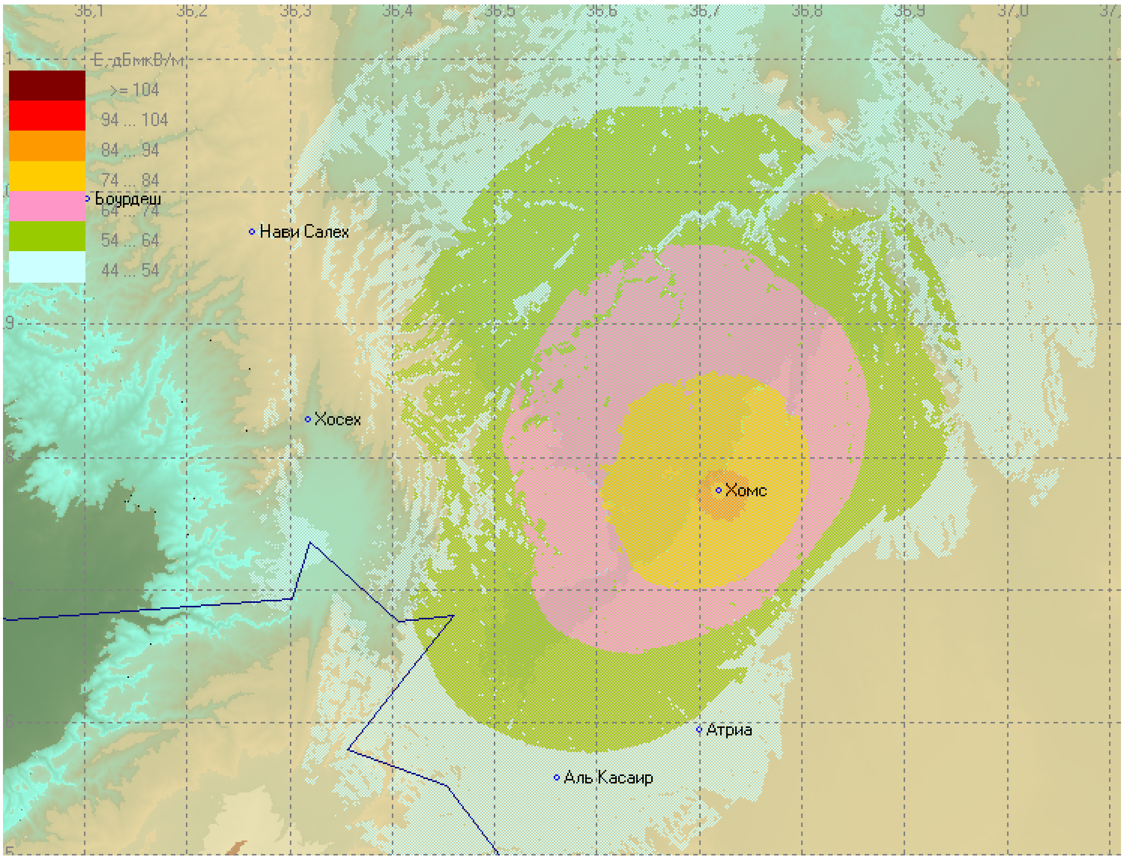

Рисунок 4 – Зона покрытия одного передатчика расположенного в г. Хомс

3. Компенсация дифракционных потерь при планировании цифрового наземного телевизионного вещания

Анализ рисунка 4 показывает, что внутри зоны покрытия одного передатчика в условиях горной местности существует большое количество зон тени, обусловленных дифракционными потерями. Традиционное использование ретрансляторов, работающих на той же самой частоте в аналоговом режиме не гарантирует высокого качества вещания, так как при протяженной трассе в связи с малой напряженностью поля при приеме увеличивается вероятность помех из-за тропосферного распространения сигналов [7].

В работе [6] показано, что одним из основных способов обеспечения покрытия при ограниченном частотном ресурсе является использование одночастотных синхронных сетей (Single Frequency Network - SFN). В соответствии с принципами планирования синхронных сетей, изложенными в [6] разработано программное обеспечение [5], позволяющее адаптивно подбирать параметры физического уровня для стандарта DVB-T, получая заданную зону покрытия при оптимальной конфигурации сети.

Для гористой местности (район города Хомс) Сирийской Арабской Республики разработана сеть, состоящая из 5 передатчиков (см. рис. 5), работающих в режиме одночастотной синхронной сети.

Исходные данные для планирования синхронной сети представлены таблице 2

Анализ зоны покрытия в случае использования 5 передатчиков, показывает, что распределение напряженности поля имеет более равномерный характер, что существенно уменьшает теневые зоны в районах компактного проживания населения в восточной и южной части г. Хомск и его региона.

Таблица 2 – Исходные данные для определения зоны покрытия цифрового наземного телевидения в режиме SFN для стандарта DVB-T в Хомском регионе

Параметр	**Значение**				
Город	Хомс	Нави Салех	Атриа	Аль-Касаир	Хосех
Режим передачи	Неиерархический режим				
Модуляция и скорость кодирования	64-QAM 3/4				
Координаты	34 42 00 N 36 43 12 E	34 55 30 N 36 15 43 E	34 33 00 N 36 42 00 E	34 30 48 N 37 40 00 E	34 47 00 N 36 19 00 E
Режим несущих	8k				
Значение *C*/*N*	21,2 дБ				
Защитный интервал	1/4				
Значения чистой битовой скорости,	22,39 Мбит/с				
Минимальная медианная напряженность поля	54,2 дБмкВ/м				
ТВ канал	26				
Мощность на выходе передатчика	400 Вт	200 Вт	1 Вт	1 Вт	100 Вт
Высота передающей антенны над уровнем поверхности земли	95 м	156 м	54 м	35 м	54 м
Коэффициент усиления антенны	9 дБ	9 дБ	8 дБ	8 дБ	9 дБ
Тип приема	Стационарный на направленную антенну на крыше здания, на высоте 10 м				

Основные параметры синхронных ретрансляторов для Хомской области были выбраны исходя из указанных ниже условий.

1. Главный передатчик, расположенный в г. Хомс, мощностью 400 Вт и высотой подвеса антенны 95 м.

2. Передатчик, расположенный в г. Нави Салех, мощностью 200 Вт и высотой подвеса антенны 156 м. Расстояние передатчика от основной станции составляет 45 км. Учитывая это, исходя из таблицы 2 необходимо выбрать значение защитный интервала в планируемой синхронной сети ¼. Данный передатчик имеет среднюю мощность и может создавать помеху приему основной станции, поэтому обязательно синхронизация данного передатчика.

3. Передатчик, расположенный недалеко от г. Атриа, мощностью 1 Вт и высотой подвеса антенны 54 м. Данный передатчик имеет малую мощность, и находится в зоне тени относительно основного передатчика и потенциально не будет создавать помеху приему основной станции, поэтому возможно использование данного передатчика в режиме Gap Filler.

4. Передатчик, расположенный недалеко от г. Аль-Касаир, мощностью 1 Вт и высотой подвеса антенны 35 м. Данный передатчик имеет малую мощность, и находится в зоне тени относительно основного передатчика и потенциально не будет создавать помеху приему основной станции, поэтому возможно использование данного передатчика в режиме Gap Filler.

5. Передатчик, расположенный в г. Хосех, мощностью 100 Вт и высотой подвеса антенны 54 м. Данный передатчик имеет среднюю мощность и может создавать помеху приему как станции Хомс так и станции Нави Салех, поэтому обязательно синхронизация данного передатчика.

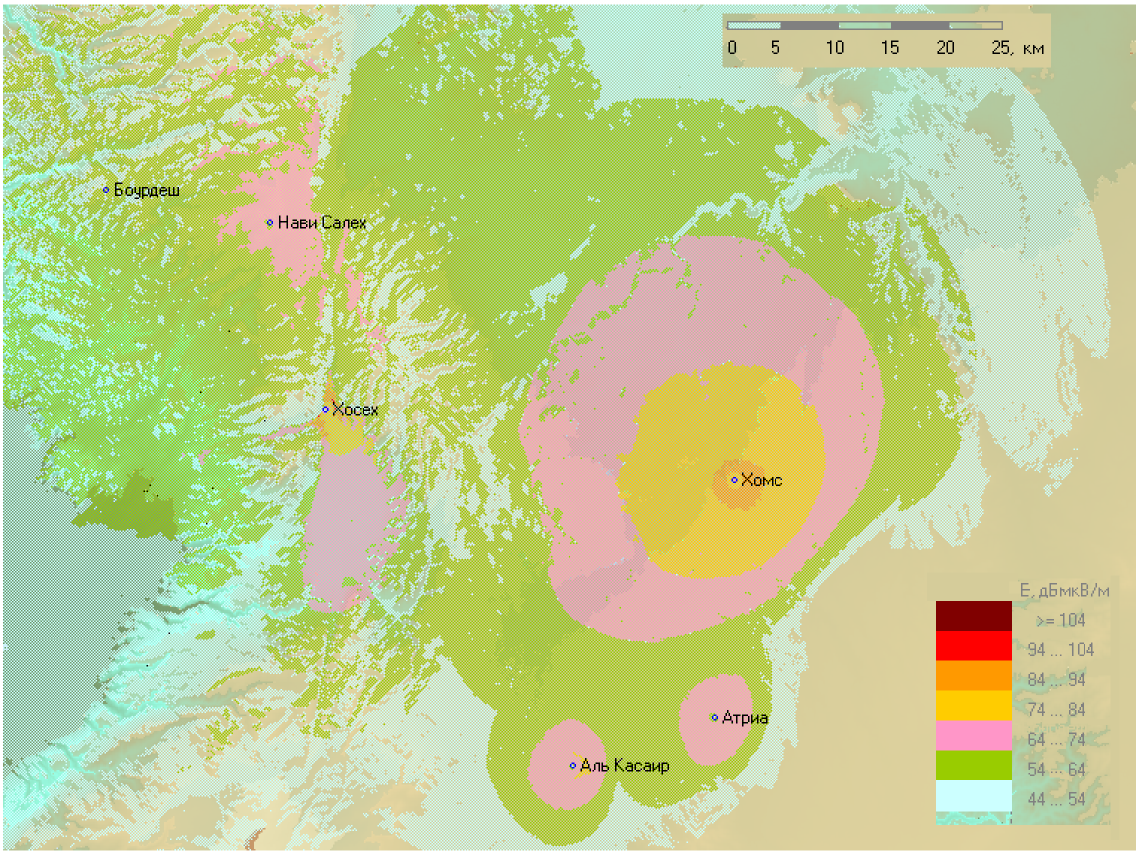

Рисунок 5 - Зона покрытия цифрового наземного телевидения в стандарте DVB-T для 5 SFN передатчиков

4. Выводы

Как видно из рис. 5 на некоторых участках между городами Хомс и Хосех также целесообразно установить маломощные несинхронные ретрансляторы. При этом, точная конфигурация сети всей сети, которую можно вводить в эксплуатацию, будет определена после проведения полевых испытаний в проблемных участках зоны покрытия. Однако частотно-территориальное планирование сети на предварительном этапе позволяет существенно сократить расходы на полевые испытания, и возможные расходы, связанные с неправильным расположением передатчиков в зоне приема цифрового наземного телевидения DVB-T.

Таким образом, использование одночастотных синхронных ретрансляторов является эффективным способом компенсации потерь дифракции, что позволяет обеспечить покрытие наземным телевизионном вещанием в условиях сложного рельефа. В реальных условиях внедрения цифрового телевизионного вещания необходимо также рассматривать возможность использования режима иерархической модуляции совместно с применением синхронных сетей. Эффективность использования такого подхода будет рассмотрена в дальнейшем.

Литература

1. Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн / [Е.Л. Черенкова, О.В. Чернышев] – М: Радио и связь, 1984. – 272 с.
2. Распространение радиоволн за счет дифракции (МСЭ-R P.526-10) – 2007. – 37 с.

3. Хёнл Х. Теория дифракции / [Х. Хёнл, А. Мауэ, К. Вестпфаль] – М: Мир, 1964. – 428 с.

4. Янке Е. Специальные функции / [Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш] – М: Наука, 1977. – 342 с.

5. Маковеенко Д.А. Оптимизация планирования внедрения радиотехнологий в Украине / Д.А. Маковеенко // Праці УНДІРТ. – 2008. – № 2(54). – С. 18–19.

6. Михайлов С.А. Исследование эффективности использования синхронных сетей при планировании вещания в странах со сложным рельефом местности / С.А. Михайлов, В.М. Драганов, Д.А. Маковеенко, Халиль Гассан. – Наукові праці ОНАЗ: [зб.наук.праць]. – 2009. – № 2.

7. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания / [Локшин М.Г., Шур А.А., Кокорев А.В., Краснощеков Р.А.]. – М : Радио и связь, 1988. – 144 с.