

Оптимальное построение наземной сети цифрового телевизионного вещания

В.И. Носов, К.В. Сартаков

В настоящее время во всем мире происходят революционные изменения в области звукового и телевизионного вещания, обусловленные переходом на цифровые системы, позволяющие гораздо эффективнее по сравнению с аналоговыми системами использовать выделенный для вещания радиочастотный спектр. В 2004 году состоялась первая сессия Региональной конференции по планированию сетей цифрового вещания в европейской зоне. В данной статье рассматриваются аспекты оптимального построения наземной сети цифрового телевизионного вещания.

Ключевые слова: цифровое ТВ, сеть вещания, оптимальное построение, минимальная напряжённость поля, необходимая излучаемая мощность передатчика.

1. Введение

Одним из важнейших аспектов оптимального построения сети наземного цифрового телерадиовещания является рассмотрение способов построения такой сети:

- из мощных передатчиков и высоко подвешенных антенн;
- из маломощных передатчиков и низко (150 метров и ниже) подвешенных антенн;
- комбинированной сети из мощных и маломощных передатчиков.

Наиболее широко известны методы планирования передающей сети радиовещания, основанные на применении модели с регулярным расположением передающих станций и регулярным распределением каналов. Такая модель предполагает, что:

- все радиовещательные станции идентичны с точки зрения их параметров;
- каждая передающая станция находится в узле безграничной, регулярной треугольной решётки и другие размещения не допускаются;
- все они в равных условиях по количеству и уровню помех;
- одно и то же множество частотных каналов регулярно используется по всей решётке.

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].

При этом критерием оптимальности построения такой сети предлагается принять затраты на сеть, приведённые к км² зоны обслуживания [4].

2. Разработка модели сети

Для решения поставленной задачи оптимального построения сети цифрового телерадиовещания необходимы исходные данные:

- площадь заданного региона (территории) $S_{\text{терр}}$;

- рабочие диапазоны частот D ;
- позиционность модуляции M ;
- скорость свёрточного кода R_k ;
- высоты подвеса передающих антенн h_1 .

Для заданных выше параметров нужно определить:

- необходимые мощности передатчиков $P_{\text{пд}}(h_1)$, обеспечивающие минимальную напряжённость поля $E_{\text{мин}}$ на расстоянии прямой видимости $R_{\text{пр}}$;
- зоны обслуживания $S_{\text{обсл}}(h_1)$ таких передатчиков с учётом перекрытия зон обслуживания соседних передатчиков (для однородной сети при 100 % обслуживании площадь зон перекрытия составляет 16.8 %) ;
- необходимое количество передающих станций $N_{\text{ст}}(h_1)$ для обслуживания заданной территории ;
- размерность кластера (необходимое количество частотных каналов) $C_{\text{кл}}(h_1)$.

Необходимо также получить зависимости капитальных затрат $K(h_1)$ и эксплуатационных расходов $C(h_1)$ для: антенно-мачтовых сооружений; передатчиков; антенн; фидеров; частотных каналов. В результате учёта всех параметров и затрат на сеть цифрового телерадиовещания задача многопараметрической оптимизации такой сети может быть формализована в следующем виде

$$\begin{aligned}
 & F(D_d, M_l, R_k, \gamma_\gamma) \\
 &= \sum_{d=1}^D \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^R \sum_{\gamma=1}^H \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_{cm}(D_d, M_l, R_k, \gamma_\gamma)} (\sum_{i=1}^m K_{ni}(D_d, \gamma_\gamma) + \sum_{j=1}^c C_{nj}(D_d, \gamma_\gamma))}{0,832 \cdot \sum_{n=1}^{N_{cm}(D_d, M_l, R_k, \gamma_\gamma)} S_{\text{обсл}}(D_d, \gamma_\gamma)} \right. \\
 & \left. + \frac{\sum_{r=1}^{C_{\text{кл}}(D_d, M_l, R_k, \gamma_\gamma)} (K_r(D_d, \gamma_\gamma) + C_r(D_d, \gamma_\gamma))}{0,832 \cdot \sum_{n=1}^{N_{cm}(D_d, M_l, R_k, \gamma_\gamma)} S_{\text{обсл}}(D_d, \gamma_\gamma)} \right) \rightarrow \min \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $\gamma = h_1$.

Исследование способов оптимального построения сети телерадиовещания начнём с задачи определения необходимых мощностей передатчиков $P_{\text{пд}}(h_1)$, обеспечивающих минимальную напряжённость поля $E_{\text{мин}}$ на расстоянии прямой видимости $R_{\text{пр}}(h_1)$ для различных диапазонов частот D , в которых работают передатчики.

В соответствии с [1] радиовещательной службе для наземных передающих сетей телевизионного и звукового радиовещания в районе 1, в который входит территория России, выделены частоты от 47 до 960 МГц. Выделенные для телевизионного вещания полосы частот разбиваются на диапазоны: I – 48.5 ÷ 66 МГц; II – 76.0 ÷ 100.0 МГц; III – 174.0 ÷ 230.0 МГц; IV – 470.0 ÷ 582.0 МГц; V – 582.0 ÷ 958.0 МГц.

Для определения радиуса зоны обслуживания передатчика необходимо рассчитать напряжённость поля сигнала, для которого на границе зоны вещания должны выполняться условия

$$E_c = E_{\text{мин}}, \text{ дБ} , \quad (2)$$

где $E_{\text{мин}}$ (дБмкв/м) – минимальная напряжённость поля сигнала на входе приёмника, при которой обеспечивается удовлетворительное качество изображения, при отсутствии помех от других станций [1]; E_c , (дБмкв/м) – напряжённость поля сигнала в рассматриваемой точке.

Напряжённость поля $E(R)$ в точке на расстоянии R от передатчика определяется выражением

$$E(R) = E(R, L, T, h_1) + P_{\Sigma} + K(L) + K(T) + K(\Delta h), \text{ дБ} \quad (3)$$

где $E(R, L, T, h_1)$ – напряжённость поля, определяемая по кривым, полученным экспериментальным путём (рекомендация *P.1546-1 ITU-R*) для 1кВт излучаемой мощности относительно полуволнового вибратора и высоты приёмной антенны 10 м при определённой эффективной высоте передающей антенны h_1 (рис. 1) [5];

T – процент времени наблюдений, равный 50 % для поля полезного передатчика;

L – процент мест приёма, равный 50 % для поля полезного передатчика;

$P_{\Sigma} = P_{\text{пд}} + G_{\text{пер}} + \eta_{\text{пер}}$, – излучаемая мощность передающей станции, дБкВт;

$P_{\text{пд}}$ – мощность передатчика, дБкВт;

$G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающей антенны, дБд;

$\eta_{\text{пер}}$ – потери в фидере от передатчика до антенны, дБ;

$K(L)$, $K(T)$, $K(\Delta h)$ – поправочные коэффициенты, учитывающие процент мест, процент времени и холмистость соответственно.

При расчёте зоны обслуживания передатчика (3) используются кривые *ITU-R* для 50 % мест и времени, для которых поправочные коэффициенты

$K(L = 50\%) = K(T = 50\%) = 0$. Поправочный коэффициент на холмистость местности $K(\Delta h)$ (3) определяется из графиков рис. 2.

Для использования кривых *ITU-R* необходимо знать эффективную высоту подвеса передающей антенны

$$h_{1\text{эф}} = h_1 + z_{\text{ср}} \quad (4)$$

где $z_{\text{ср}}$ – средняя отметка местности на расстоянии до 15 км от передающей антенны, определяется из профиля пролёта, построенного с использованием ГИС в каждом из 36 направлений для 50 % высот.

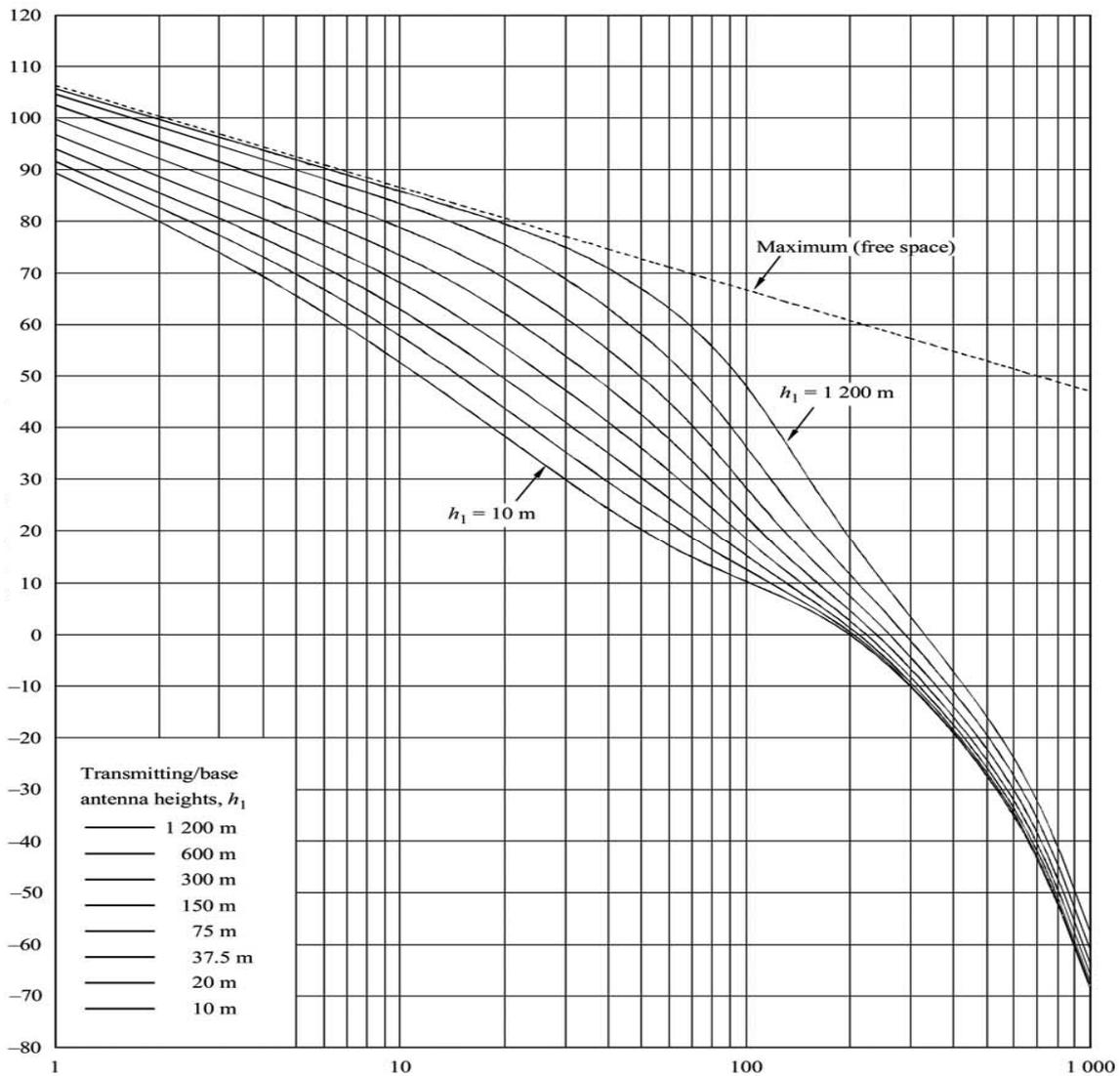


Рис. 1. Зависимость медианного значения напряжённости поля от расстояния. Суша, равнинно-холмистая местность (100 МГц, 50 % мест, 50 % времени, $h_2=10$ м, $P_{\Sigma} = 1$ кВт)

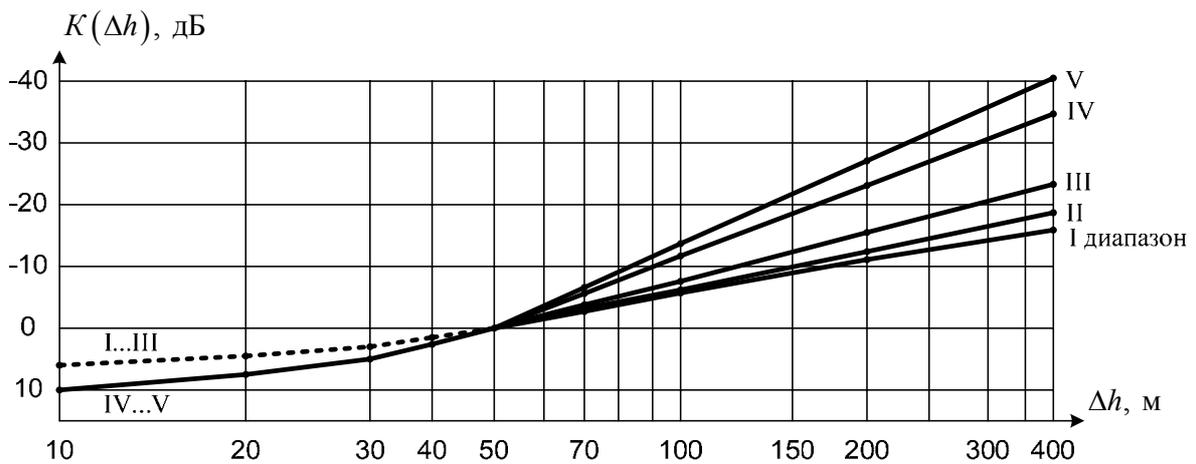


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента от степени неровности местности на расстояниях 20 ÷ 100 км

Для аналогового и цифрового телевизионного вещания $E_{\text{мин}}$, минимально необходимая напряжённость поля дБ/мкВ/м на границе зоны обслуживания передатчика, определяется из таблицы 1 [6].

Таблица 1. Минимальная напряжённость поля для приёма телевизионного сигнала, дБ/мкВ/м

Вид модуляции	Диапазон волн				
	I	II	III	IV	V
Аналоговая	50	52	55	65	68
Цифровая	Не планируется		48	53	57

Как видно из таблицы 1, для цифрового вещания планируется задействовать III, IV и V частотные диапазоны.

Следовательно, на границе зоны обслуживания передатчика должно выполняться условие

$$E(R, L, T, h_1) = E_{\text{мин}} \quad (5)$$

Подставив (5) в (3), получим

$$E(R, L, T, h_1) = E_{\text{мин}} = P_{\Sigma} + E(50, 50, R, h_1) + F(\Delta h). \quad (6)$$

Из (6) можно определить требуемое значение напряжённости поля $E(50, 50, R, h_1)$ для выполнения условия (2)

$$E_{\text{треб}}(50, 50, R, h_1) = E_{\text{мин}} - P_{\Sigma} - F(\Delta h). \quad (7)$$

По найденному в (7) требуемому значению $E_{\text{треб}}(50, 50, R, h_1)$ дБ/мкВ/м по кривым ITU-*R* соответствующих диапазонов волн метрового III (рис. 1) и дециметрового IV и V с учётом эффективной высоты передающей антенны (2) определяется расстояние от передающей антенны, на котором выполняется условие (3). Это расстояние и будет радиусом зоны обслуживания в каждом из 36 направлений.

3. Определение необходимой излучаемой мощности передающей станции

Известно [1], что радиоволны III ÷ V диапазонов распространяются в зоне прямой видимости $R_{\text{пр}}$. Поэтому считается, что радиус зоны обслуживания ограничивается приблизительно предельным расстоянием прямой видимости. Это объясняется тем, что за радиогоризонтом довольно резко понижается качество приёма вследствие заметного изменения уровня сигнала, из-за наличия прямого луча и луча, отражённого от тропосферы. Поэтому радиус зоны обслуживания R_3 передающей вещательной станции примем равным расстоянию прямой видимости $R_{\text{пр}} = R_3$. Расстояние прямой видимости с учётом рефракции радиоволн рассчитывается по формуле

$$R_{\text{пр}} \approx 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \text{ км}, \quad (8)$$

где h_1 и $h_2 = 10$ м – подставляется в метрах.

Результаты расчётов расстояния прямой видимости $R_{пр}$ (радиуса зоны обслуживания передатчика R_3) в зависимости от высоты подвеса передающей антенны h_1 приведены в таблице 2 и на рис. 3.

Таблица 2. Зависимость R_3 от h_1

$h_1, \text{ м}$	37.5	75	150	300
$R_{пр} = R_3, \text{ м}$	38.3	48.7	63.5	84.4

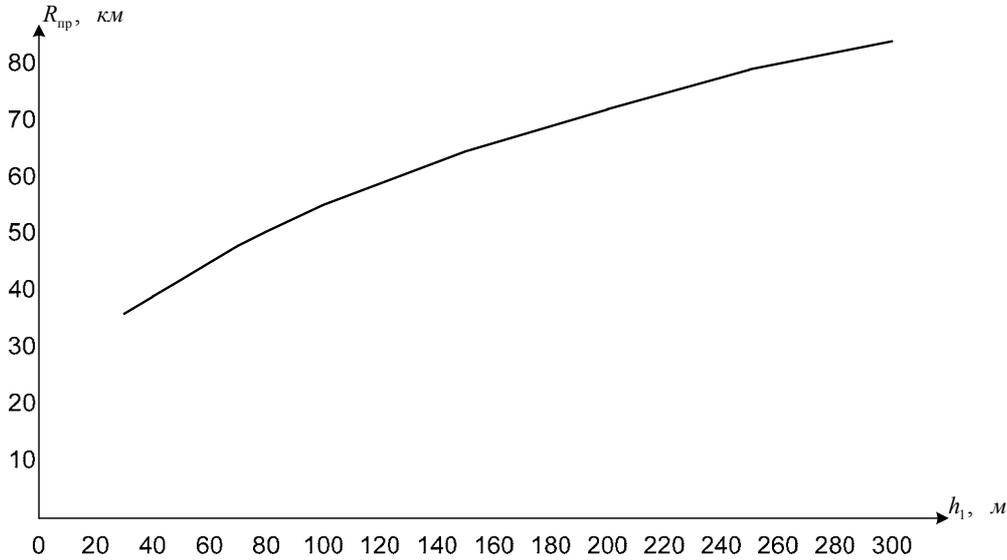


Рис. 3. Зависимость расстояния прямой видимости от высоты передающей антенны

Передающая станция должна иметь такую необходимую излучаемую мощность $P_{\Sigma\text{необх}}$, которая обеспечивает минимальную напряжённость поля $E_{\text{мин}}$ на расстоянии прямой видимости $R_{пр} = R_3$

$$E_c(h_1, R_3, D) = E_{\text{мин}} = E_c(50, 50, h_1, R_3, D) + P_{\Sigma\text{необх}}, \quad (9)$$

где D ($D = \text{III} - \text{V}$) – номер диапазона, $E_c(50, 50, h_1, R_3, D)$ – напряжённость поля сигнала, определяемая из кривых *ITU-R*.

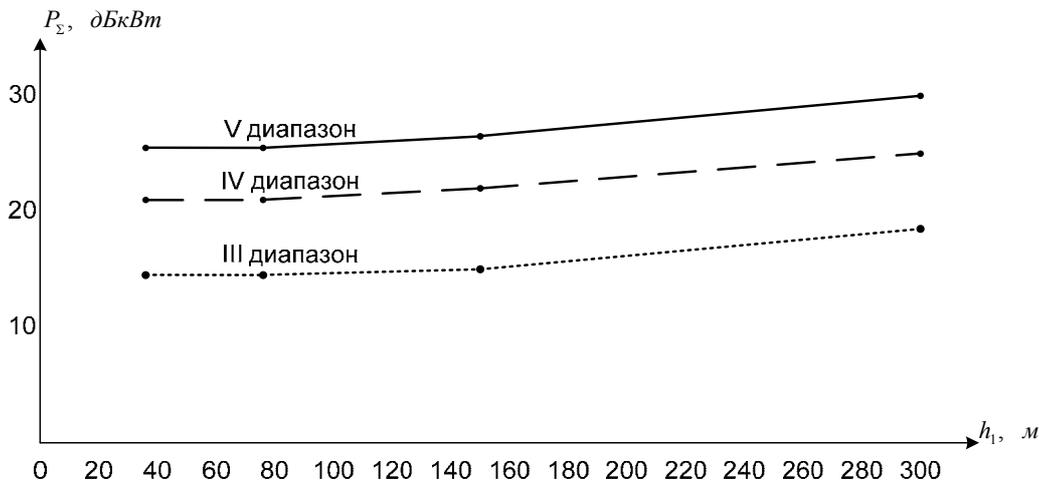
Из (8) можно определить необходимую излучаемую мощность передающей станции, при которой обеспечивается минимальная напряжённость поля на границе зоны обслуживания при $R_{пр} = R_3$

$$P_{\Sigma\text{необх}} = E_{\text{мин}} - E_c(50, 50, h_1, R_3, D). \quad (10)$$

Результаты расчётов необходимой излучаемой мощности на границе зоны обслуживания при $R_{пр} = R_3$ при различных диапазонах частот D и высот подвеса передающих антенн h_1 приведены в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость $P_{\Sigma \text{ необх}}$ от h_1

Диапазон D	E_f , дБ/мкВ/м P_{Σ} , дБкВт	h_1 , м			
		37.5	75	150	300
III	$E_{f=100}$	36	36	35.5	32
	$E_{f=600}$	32	32	31.5	28
	$E_{f=200}$	33.5	33.5	33	29.5
	$P_{\Sigma \text{ необх}}$	14.5	14.5	15	18.4
IV	$E_{f=600}$	32	32	31.5	28
	$E_{f=2000}$				
	$E_{f=638}$	32	32	31.5	28
	$P_{\Sigma \text{ необх}}$	21	21	21.5	25
V	$E_{f=600}$	32	32	31.5	28
	$E_{f=2000}$	28	28	27.5	23
	$E_{f=770}$	31.6	31.6	30.7	27.5
	$P_{\Sigma \text{ необх}}$	25.4	25.4	26.3	29.6

Рис. 4. Зависимость необходимой излучаемой мощности от высоты передающей антенны при $R_3 = R_{пр}$

Определение напряжённости поля на средней частоте каждого диапазона производится методом интерполяции напряжённостей полей, определённых по кривым *ITU-R*, приведённым для частот 100, 600 и 2000 МГц.

Из таблицы 3 и рис. 4 следует, что с увеличением частоты (номера частотного диапазона) увеличивается необходимая излучаемая мощность, так при переходе от III ($f_{cp} = 200$ МГц) диапазона частот к IV ($f_{cp} = 638$ МГц) увеличение этой мощности составляет около 6,5 дБкВт, при переходе от IV к V ($f_{cp} = 770$ МГц) диапазону – около 4,5 дБкВт, а при переходе от III диапазона к V – это увеличение составляет 11 дБкВт.

Из таблицы 3 и рис. 4 следует также, что при увеличении высоты подвеса передающей антенны h_1 от 37,5 м до 300 м требуется увеличение необходимой излучаемой мощности $P_{\Sigma \text{ необх}}$ во всех диапазонах на 4 дБкВт.

4. Определение минимальной напряжённости поля

Как следует из модели оптимизации сети (1) и формул (9) и (10), для нахождения оптимальных решений для стандарта цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T необходимо знать минимальную напряжённость поля $E_{\text{мин}}$ не только для одной позиционности модуляции M и одной скорости кодирования R_k , как это приведено в таблице 1, но и для разных позиционностей модуляции и разных скоростей кодирования.

В таблице 1 приведены значения минимальной напряжённости поля для цифрового ТВ вещания DVB-T при использовании модуляции 64-QAM ($M = 64$), скорости внутреннего кода $R_k = 7/8$, отношения сигнал/шум $C/N = 21.09$ дБ. В таблице 4 приведены используемые в системе DVB-T разные значения позиционности модуляции, скорости корректирующего кода и требуемые для этих параметров отношения сигнал/шум.

Для расчёта зоны обслуживания цифрового телевизионного передатчика при использовании различных позиционностей модуляции и скорости корректирующего кода была разработана методика и произведён перерасчёт минимальной напряжённости поля при использовании позиционности модуляции от 64-QAM до QPSK, скорости внутреннего кода R_k от 7/8 до 1/2, отношений сигнал/шум C/N от 21.09 дБ до 3.1 дБ. Результаты проведённого перерасчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4. Минимальная напряжённость поля в системе DVB-T

№	Модуляция	CR_1	C/N, дБ	Минимальная напряжённость поля, дБ/мкВ/м		
				Диапазон частот		
				III	IV	V
1	QPSK	1/2	3.1	30.01	35.01	39.01
2	QPSK	2/3	4.9	31.81	36.81	40.81
3	QPSK	3/4	5.9	32.81	37.81	41.81
4	QPSK	5/6	6.9	33.81	38.81	42.81
5	QPSK	7/8	7.7	34.61	39.61	43.61
6	16-QAM	1/2	10.25	37.16	42.16	46.16
7	16-QAM	2/3	12.05	38.96	43.96	47.96
8	16-QAM	3/4	13.05	39.96	44.96	48.96
9	16-QAM	5/6	14.05	40.96	45.96	49.96
10	16-QAM	7/8	14.85	41.76	46.76	50.76
11	64-QAM	1/2	16.49	43.4	48.4	52.4
12	64-QAM	2/3	18.29	45.5	50.2	54.2
13	64-QAM	3/4	19.29	46.2	51.2	55.2
14	64-QAM	5/6	20.29	47.2	52.2	56.2
15	64-QAM	7/8	21.09	48	53	57

5. Выводы

Разработана модель сети наземного телевизионного вещания с учётом всех технических и стоимостных параметров, которая позволяет решать задачу оптимизации такой сети по различным критериям.

Для проведения оптимизации сети наземного телевизионного вещания разработаны методики определения необходимой излучаемой мощности передающей станции и минимальной напряжённости поля на границе зоны обслуживания при изменении диапазона частот, позиционности модуляции и скорости кодирования.

Литература

1. Сети телевизионного и звукового ОБЧ ЧМ вещания: Справочник/М.Г. Локшин, А.А. Шур, А.В. Кокорев. – М.: Радио и связь, 1988. – 144 с.
2. Eden H. Frequency planning methods for sound and television broadcasting // *Telecom. Journ.* – 1986. – V. 53. – № 1. – P. 68 – 74.
3. Носов В.И., Кокорев А.В., Ахтырский В.Н., Воинцев Г.А. Оптимизация параметров телевизионной сети. // *Радио и телевидение ОИРТ.* – 1986. – № 3. С. 36 – 40.
4. В.И. Носов. Оптимизация параметров сетей телевизионного и звукового вещания: Монография / СибГУТИ. – Новосибирск, 2005 г. – 257 с.
5. Method for point-to-area prediction for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. Recommendation ITU-R P.1546-1.
6. М.Г. Локшин Основы планирования наземных сетей телевизионного и ОБЧ ЧМ вещания. Зоны обслуживания радиостанций//*Broadcasting. Телевидение и радиовещание*, № 3, 2006.

Статья поступила в редакцию 14.03.2009

Носов Владимир Иванович

доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой систем радиосвязи СибГУТИ
тел. 269-82-54, E-mail: nvi@sibsutis.ru

Сартаков Константин Валерьевич

аспирант СибГУТИ, специалист-эксперт Управления Федеральной службы по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций по Новосибирской области
тел. 223-70-16, E-mail: skw28@yandex.ru

Optimum construction of the ground network of digital television broadcasting

V. I. Nosov, K. V. Sartakov

Presently, in the whole world there are revolutionary changes in the area of voice and television broadcasting, conditioned by transition to the digital systems allowing much more effectively, as compared to the analog systems, to use the radio frequency spectrum selected for broadcasting. In 2004 the first session of the Regional conference on planning of networks of digital broadcasting in the European area took place. The aspects of optimum construction of the ground network of digital television broadcasting are examined in this article.

Keywords: digital TV, broadcasting network, optimum construction, minimum strength of the field, necessary radiated power of the transmitter station.