

НАДЕЖНОСТЬ РАДИОВЕЩАНИЯ

Ю. А. Чернов, главный научный сотрудник ФГУП НИИР, д.т.н.; Chernov45@mail.ru

Изложены основы теории надежности и примеры ее применения в СВ-вещании для оценки пары «размер зоны — надежность». Приведены результаты расчетов для аналоговой и цифровой систем.

Ключевые слова: надежность, полезная зона, аналоговая система, цифровая система, параметры приемников.

Введение. Впервые понятие надежности работы линий радиосвязи применительно к радиовещанию в диапазоне длинных, средних, коротких волн или УКВ как самостоятельный термин было введено в 1969 г. [1]; отдельные характеристики надежности рассматривались в [2–6]. Востребованность нового понятия в сфере радиовещания обнаружилась не скоро и внезапно — при подготовке к Всемирной конференции по радиовещанию на коротких волнах 1984, 1987 гг. Необходимость пересмотра состояния вещания на КВ была вызвана большой перегрузкой частотного спектра.

Предложения западных стран сводились к ограничению мощности передающих средств для всех администраций связи (АС), что при большой протяженности линий инновещания СССР не могло устроить АС Советского Союза. В противовес ограничению мощности передатчиков (равных мощностей) АС СССР предложила концепцию равных прав на надежность вещания для всех стран и способ ее технической реализации с соответствующим теоретическим обоснованием. Предложение было встречено весьма сдержанно из-за сложности решения проблемы, однако через какое-то время концепция надежности радиовещания была утверждена и использовалась в работе Технического комитета ВКР. В дальнейшем концепция была положена в основу Рекомендации МСЭ-R P.842–5 [7], регламентирующей расчет надежности радиовещания.

В настоящее время схемы и параметры взаимодействия полезного сигнала и помех приобрели большое разнообразие, не отраженное в известных публикациях. Процедура расчетов [7], изначально существенно упрощенная для аналогового сигнала, не в полной мере удовлетворяет задачам оценки надежности более сложных систем, в частно-

сти цифровых. Создавшееся положение и побудило автора к написанию данной работы. Приведенные ниже примеры расчетов и числовые значения параметров относятся к СЧ- и НЧ-вещанию, однако идеология предлагаемого подхода может быть распространена на любые другие системы.

В [7] содержатся определения важных для нас видов надежности (рис. 1).

Основными видами надежности радиовещания можно считать следующие:

- основная надежность канала — вероятность приема с качеством не ниже заданного;
- надежность приема — вероятность приема программы с качеством не ниже заданного с учетом всех излучаемых частот на данной программе. Этот же смысл у термина «надежность программы»;
- надежность службы (радиовещания) — вероятность приема программы с качеством не ниже заданного в заданном проценте обслуживаемого пространства с учетом всех излучаемых на программе частот.

К этим определениям имеется ряд примечаний, в частности:

1. Определениям надежности предшествует слово «основная», когда помехой является шум без сигналов других станций.
2. Помеха может быть как в виде одного сигнала, так и множественной, как в совмещенном канале, так и в соседнем.
3. Заданное значение отношения сигнал/(шум и помеха) определяет заданное качество.

В мировой сети вещания помехой практически всегда является сигнал или сумма сигналов мешающих станций. Помеха в виде атмосферного шума или внутренних шумов приемника может иметь место лишь на отдельных частотных участках в ограниченные периоды времени. Эти виды надежности характеризуют только техническую сторону вопроса. Значение определенной таким образом надежности — это объективная вероятностная характеристика.

Ниже кратко изложена теория надежности (в улучшенном варианте по сравнению с [1]), а также приведены фор-

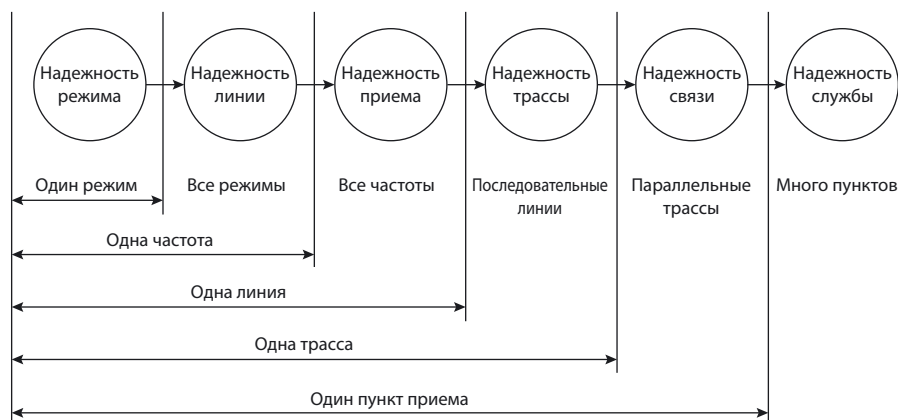


Рис. 1. Карта надежностей

мулы для оценки распределения надежности, основных параметров надежности радиовещания и примеры расчетов.

Закон распределения надежности и основные статистические характеристики канала. Сигнал и помеху будем характеризовать часовыми медианными значениями напряженности поля, в децибелах. Распределение часовых медиан ото дня ко дню для одного и того же времени суток подчиняется нормально-логарифмическому закону, плотность вероятности которого имеет вид:

$$\text{для сигнала } w_c(E_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{(E_c - \bar{E}_c)^2}{2\sigma_c^2}};$$

$$\text{для помехи } w_n(E_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{(E_n - \bar{E}_n)^2}{2\sigma_n^2}},$$

где \bar{E}_c и \bar{E}_n — математические ожидания часовых медиан сигнала и помехи соответственно, дБ (практически они могут быть заменены средними значениями за достаточно большое время наблюдения, например за летний и зимний период); σ_c и σ_n — стандартные, или среднеквадратичные, отклонения (СКО) этих медиан, дБ.

Текущее (часовое) отношение сигнал/помеха, дБ, которое обозначим $\rho = E_c - E_n$, будет случайной величиной; ρ подчиняется также нормальному распределению w_ρ со средним значением и дисперсией, равными $\bar{\rho} = \bar{E}_c - \bar{E}_n$; $\sigma_\rho^2 = \sigma_c^2 + \sigma_n^2$.

Вероятность того, что отношение сигнал/помеха ρ превысит некоторое граничное значение $\rho_{гр}$, определяется по формуле

$$T(\rho \geq \rho_{гр}) = \int_{\rho_{гр}}^{\infty} w_\rho(\rho) d\rho = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\rho} \int_{\rho_{гр}}^{\infty} e^{-\frac{(\rho - \bar{\rho})^2}{2\sigma_\rho^2}} d\rho.$$

Но в $\bar{\rho}$ входят средние значения полей сигнала и помехи \bar{E}_c и \bar{E}_n , которые в общем случае также могут и не быть постоянными величинами. В частности, на обслуживаемой территории может действовать помеха с заранее неизвестным случайным средним значением \bar{E}_n ; изменить уровень сигнала могут и особенности местности. Стандартные отклонения этих величин (средних значений \bar{E}_c и \bar{E}_n) от среднего по ансамблю, обозначаемого далее в угловых скобках $\langle \rangle$, соответственно есть $\sigma_{\bar{c}}$ и $\sigma_{\bar{n}}$. Поэтому надежность T тоже является случайной величиной, которая может принимать значения от 0 до 1. Далее для большей универсальности вычислений воспользуемся допущением, при котором с точки зрения отношения сигнал/помеха безразлично, что является источником случайных изменений этого отношения — сигнал, на который повлияли местные изменения, или помеха с ее непредсказуемостью. Удобно, в частности, для расчетов приписать все случайные изменения помехе; тогда дисперсия помехи составит из двух частей: собственно дисперсии среднего значения помехи σ_{no}^2 и дисперсии среднего значения сигнала σ_{co}^2 , т.е. получим $\sigma_{\bar{n}}^2 = \sigma_{no}^2 + \sigma_{co}^2$. СКО среднего отношения сигнал/помеха запишется как $\sigma_{\bar{\rho}} = (\sigma_{\bar{c}}^2 + \sigma_{\bar{n}}^2)^{1/2}$.

Для определения плотности распределения параметра T заменим $\rho - \bar{\rho}$ на t :

$$T(t \geq t_{гр}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\rho} \int_{t_{гр}}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_\rho^2}} dt, \quad (1)$$

где граничное значение $t_{гр} = \rho_{гр} - \bar{\rho} = \bar{E}_n - \bar{E}_c + \rho_{гр}$ является теперь случайной величиной из-за случайности величин \bar{E}_c и \bar{E}_n .

Плотность вероятности $w_T(T)$ надежности T может быть найдена по обычным правилам для монотонных функций случайных величин как произведение плотности распределения переменной \bar{E} , в которой аргументом служит функция $\bar{E} = \Psi(T)$, на производную $|d\Psi(T)/dT|$, т.е.

$$w_T(T) = w_{\bar{E}}[\Psi(T)]|\Psi'(T)|, \quad (2)$$

где $w_{\bar{E}}(x)$ — распределение долговременных средних значений напряженности поля мешающих станций, в данном случае нормальное, имеет вид

$$w_{\bar{E}}(\bar{E}_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\bar{E}_n}} e^{-\frac{(\bar{E}_n - \langle \bar{E}_n \rangle)^2}{2\sigma_{\bar{E}_n}^2}}. \quad (3)$$

В угловых скобках приведено долговременное среднее по ансамблю указанной величины. В таком же виде записывается и распределение для полезного сигнала. Уравнение (1) является трансцендентным относительно \bar{E}_n , поэтому для вычисления $d\Psi/dT$ запишем (1) в виде

$$T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\rho} \int_{\Psi-a}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_\rho^2}} dt, \quad (4)$$

где $a = \bar{E}_c - \rho_{гр}$ и $\Psi - a = t_{гр}$ есть некоторая новая функция T , отличающаяся от Ψ только постоянным слагаемым a , не зависящим от T .

Тогда из (4) и (1), учитывая что $t_{гр} = \Psi - a = f(T)$, следует

$$\frac{d\Psi}{dT} = \frac{dt_{гр}}{dT} = \frac{1}{dT} = -\sqrt{2\pi}\sigma_\rho e^{\frac{t^2}{2\sigma_\rho^2}}. \quad (5)$$

Подставляя теперь в (3) $\Psi(T)$ вместо \bar{E}_n , с учетом (5) получим (2) в виде

$$w_T(T) = \frac{\sigma_\rho}{\sigma_{\bar{E}_n}} e^{-\frac{(\Psi - \langle \bar{E}_n \rangle)^2}{2\sigma_{\bar{E}_n}^2}} e^{\frac{t^2}{2\sigma_\rho^2}}, \quad (6)$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

Плотность распределения. После замены $\frac{t}{\sigma_\rho} = X$, $\frac{\Psi - a}{\sigma_\rho} = \varphi$ из (4) и (6) получим $w_T(T)$ в виде системы двух параметрически связанных трансцендентных уравнений (далее индекс t опускаем):

$$w(T) = \kappa e^{-\frac{\varphi(\kappa^2 - 1) - \varphi \kappa v - \frac{1}{2}v^2}{2}}; \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\varphi}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (8)$$

где

$$\kappa = \frac{\sigma_\rho}{\sigma_{\bar{n}}} = \frac{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}}{\sigma_{\bar{n}}}; \quad v = \frac{a - \langle \bar{E}_n \rangle}{\sigma_{\bar{n}}} = \frac{\bar{E}_c - \rho_{гр} - \langle \bar{E}_n \rangle}{\sigma_{\bar{n}}}, \quad (9)$$

а связующим параметром служит φ . Отметим некоторые свойства этого распределения.

При $v=0$ и любых значениях κ плотность распределения $w(T)$ симметрична относительно вертикальной прямой, проведенной через $T=0,5$ (рис. 2).

Если $\kappa < 1$, то $w(T) \rightarrow \infty$ при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow 1$. Если $\kappa > 1$, то при крайних значениях аргумента (0; 1) $w(T) \rightarrow 0$. Если же $\kappa = 1$ и $v=0$, распределение переходит в равномерное.

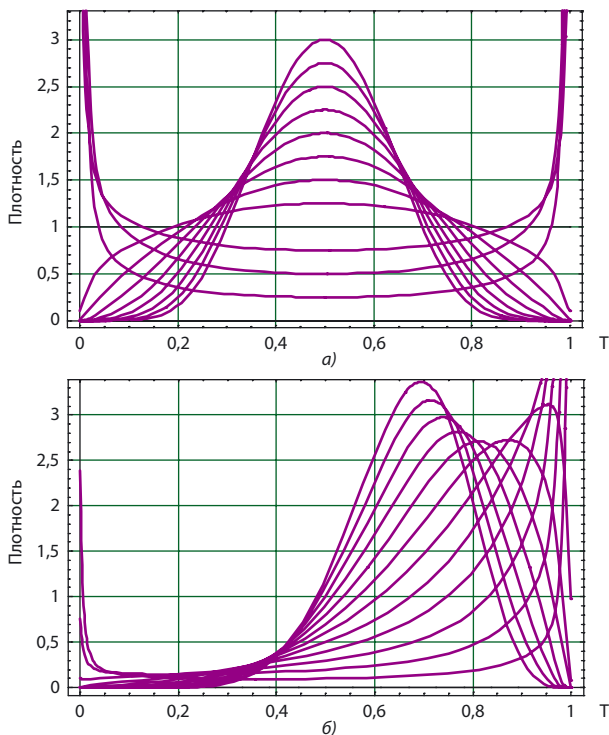


Рис. 2. Плотности вероятности надежности $w(T)$ при κ от 0 до 3 через 0,25 при $\nu=0$ (а) и $\nu=5$ (б)

В любом случае отклонение ν от нуля в ту или иную сторону приводит к появлению асимметрии.

Интегральное распределение надежности имеет вид

$$W(T) = \int_0^T w(T) dT,$$

где T — текущее значение надежности, как представлено в (8).

Поскольку непосредственная подстановка T в $w(T)$ невозможна, для дальнейших вычислений удобно перейти от T к переменной φ .

Обозначив $\frac{dT(\varphi)}{d\varphi} = y(\varphi)$, из (8) найдем

$$y(\varphi) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varphi^2}{2}}, \tag{10}$$

и для $W(T)$, с учетом (7) и (10), запишем

$$W(T) = \kappa \int_{-\infty}^{\varphi} e^{-\frac{\varphi^2}{2}(\kappa^2-1) - \varphi\kappa\nu - \frac{1}{2}\nu^2} y(\varphi) d\varphi = \frac{\kappa}{\sqrt{2\pi}} \int_{\varphi}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}(\varphi\kappa + \nu)^2} d\varphi.$$

После замены $\varphi\kappa + \nu = t$ в итоге получим

$$W(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\kappa\varphi + \nu}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \tag{11}$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\varphi}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \tag{8}$$

где φ находим через T из уравнения (8).

Интегральное распределение $W(T)$ определяется параметрической системой уравнений (8) и (11). Примеры приведены на рис. 3. Из (11) можно видеть, что полученное распределение относится к классу распределений Кептейна,

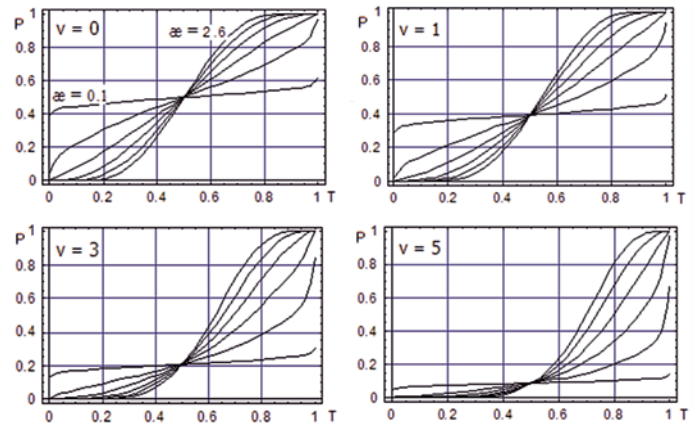


Рис. 3. Семейства кривых $W(T)$ для $\nu=0, 1, 3, 5$; $\kappa=\kappa=0,1\dots2,6$, через 0,5

в которых параметр (или параметры) тоже является случайной величиной ([8], 19.3).

Из {(11), (8)} следует полезное утверждение: «Вероятность $W(T)$ для $T \geq 0,5$ не может быть больше $F(T) - 0,5$ », где $F(T)$ — интеграл вероятности.

Среднее значение надежности T_{cp} , один из важных параметров распределения, может быть найдено по известной формуле

$$T_{cp} = \int_0^1 T w(T) dT. \tag{12}$$

Используя те же преобразования, что и выше, и перейдя к переменной φ , из формулы (12) получаем

$$\begin{aligned} T_{cp} &= \int_{-\infty}^{\infty} T(\varphi) \kappa e^{-\frac{\varphi}{2}(\kappa^2-1) - \varphi\kappa\nu - \frac{\nu^2}{2}} y(\varphi) d\varphi = \\ &= \frac{\kappa}{2\pi} e^{-\frac{\nu^2}{2}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\varphi^2}{2}(\kappa^2+1) - \varphi(z-\kappa\nu)} d\varphi, \end{aligned} \tag{13}$$

где вместо $T(\varphi)$ подставлено выражение (8), в котором произведена замена $x=z + \varphi$.

Интегрирование (13) приводит к окончательному выражению:

$$T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \tag{14}$$

где

$$\gamma = \frac{\nu}{\sqrt{\kappa^2 + 1}} = \frac{\bar{E}_c - \rho_{гр} - \langle \bar{E}_n \rangle}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_{\bar{E}}^2 + \sigma_n^2}}.$$

Из рис. 4 видно, что при $\nu=0$, т.е. при $\bar{E}_c - \rho_{гр} - \langle \bar{E}_n \rangle = 0$, или $\bar{E}_c - \langle \bar{E}_n \rangle = \rho_{гр}$, независимо от значений дисперсий, от которых зависит κ , средняя надежность канала равна 0,5. При $\nu > 0$ и малых κ , т.е. при малых дисперсиях сигнала и помехи, надежность возрастает быстро, при больших κ — медленно. Если $\nu < 0$, то всегда $T_{cp} < 0,5$.

Из (14) следует, что увеличение средней надежности канала может быть достигнуто только за счет увеличения потенциала радиолиний, т.е. увеличения \bar{E}_c , входящего в ν . Параметры, определяющие κ по (9), не могут быть изменены по желанию, но для различных условий на радиолинии или для различных протяженностей радиолиний, при которых дисперсии сигналов неодинаковы, соответствующие им T_{cp} тоже будут неодинаковы.

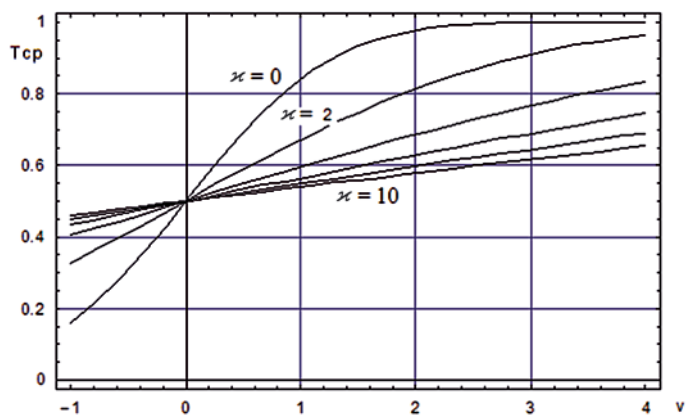


Рис. 4. Семейство кривых $T_{cp}(v)$ для $\kappa = \kappa = 0 \dots 10$ через 2

Медианное значение надежности $T_{0,5}$ и медианная доля реализаций $W_{0,5}$. Например, для оценки $T_{0,5}$ путем приравнивания уравнения (11) одной второй, т.е.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\kappa\varphi+v}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2},$$

определяется $\kappa\varphi + v = 0$. Подставляя найденное отсюда φ в (8), в итоге получаем $T_{0,5}$ и аналогичным путем, приравнявая в (8) $T = 0,5$, получаем $\varphi = 0$ и далее $W_{0,5}$:

$$T_{0,5} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{v}{\kappa}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad W_{0,5} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^v e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (15)$$

Величины $T_{0,5}$ и $W_{0,5}$, найденные по экспериментальным сглаженным кривым, позволяют определить κ и v и построить по {(11) + (8)} теоретические распределения $W(T)$.

Из (14) и (15) можно видеть, что медиана всегда несколько больше среднего значения.

Проведенный анализ показывает, что средняя надежность и другие статистические характеристики канала зависят от двух обобщенных параметров: v и κ .

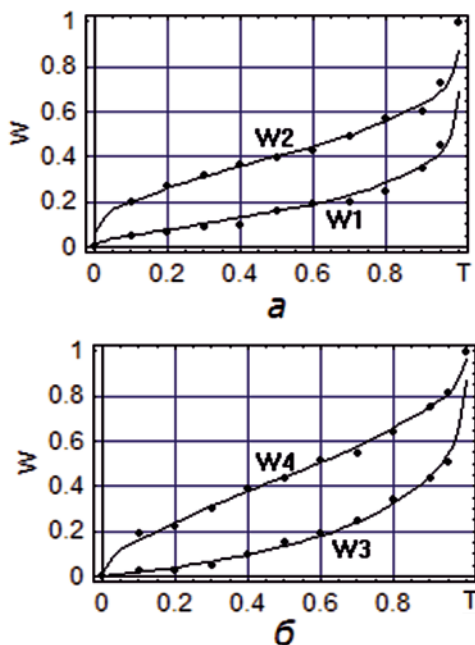


Рис. 5. Примеры расчета распределений надежностей: а — КВ-линии, W1: $\kappa = 0,5$; $v = 1$; W2: $\kappa = 0,46$; $v = 0,25$; б — СВ-сеть, W3: $\kappa = 0,75$, $v = 1,1$; W4: $\kappa = 0,65$, $v = 0,15$

Полученное распределение хорошо согласуется с практическими оценками. Так как предполагается, что поведение сигналов (случайных функций) обладает эргодическими свойствами, последовательность реализаций во времени и ансамбль одновременно существующих реализаций имеют одинаковые статистические характеристики. Ансамбль реализаций по большому числу радиолиний, работающих в сходных условиях, позволяет построить экспериментальные распределения надежности, показанные на рис. 5, где W — доля радиолиний (или последовательных реализаций) с надежностью, равной и ниже соответствующей величины T ; кривые $W1$ и $W3$ относятся к качеству B_4 , $W2$ и $W4$ — к B_3 .

Распределения строились отдельно для субъективных оценок качества сигнала «удовлетворительно и выше ($B_3 \geq 3$)» и «хорошо и выше ($B_4 \geq 4$)» по двум группам радиолиний: КВ-вещания на Европейский континент и СВ-вещания внутри страны, по измерениям за несколько лет. Для сравнения на рисунках приведены расчетные кривые по формулам {(8), (11)} с параметрами κ и v , полученными по $T_{0,5}$ и $W_{0,5}$ из сглаженных экспериментальных зависимостей.

Судя по рис. 5, можно считать принятую модель распределения надежностей вполне пригодной для практических расчетов.

Примеры расчетов и анализ распределений. Темное время суток в летний сезон. Ночное время — самое трудное для организации вещания. Помехи от других станций, проходящие по ионосферному каналу, зачастую в несколько раз сжимают полезную зону, что обуславливает существенное снижение качества приема в полной зоне дневного вещания. Перенесем полученные результаты на расчет доли полезной зоны P с заданной надежностью T для типичного случая многолетней работы (без учета регулярных сезонных изменений) двух передатчиков в темное время суток в одном канале, когда один из них создает помеху другому. Полезная зона, с которой сравниваются рассчитываемые варианты, определяется при отсутствии любых случайных изменений.

Определим **входные данные**. Исходная позиция: мощности аналогового и цифрового передатчиков равны. Сезон: лето. Рабочая частота 1008 кГц. Средняя напряженность поля в месте приема полезного передатчика 60 дБ (рассчитывается по методике МСЭ-R Рек. P.368-10). СКО_A диаграммы антенны не учитывается. Средняя напряженность поля в месте приема мешающего передатчика 30 дБ (по методике МСЭ-R Рек. P.1147). Атмосферные помехи не учитываются. Защитное отношение для аналогового сигнала 30 дБ (или 17 дБ для удовлетворительного качества), помеху для простоты считаем стабильной. Защитное отношение для цифрового сигнала 21 дБ [9]. СКО день ото дня полезного сигнала $\sigma_{дд} = 2,4$ дБ (Рек. P.1321-4). СКО ионосферного мешающего сигнала $\sigma_{ион} = 9,2$ дБ (Рек. P.1147). СКО изменений от года к году полезного сигнала $\sigma_{ГГ} = 2,7$ дБ летом, (4,3 дБ зимой) [из измерений]. Место приема: в лесном массиве средней плотности (дополнительные потери и их статистика не учитываются). СКО от места к месту большого масштаба $\sigma_{M/M/6} = 3,7$ дБ (Рек. P.1321).

Из перечня данных следует, что случайные изменения во времени отношения сигнал/помеха для приема с ионосферной помехой составляют $\sigma_{с/п} = (9,2^2 + 2,4^2 + 2,7^2)^{0,5} = 9,9$ дБ, или $\kappa = \sigma_{с/п} / \sigma_{M/M/6} = 9,9 / 3,7 = 2,68$. По приведенному списку параметров для случая аналогового вещания на рис. 6, а по формуле {(11) + (8)} построено семейство кривых $W(T)$ при различных значениях $v = \frac{\bar{E}_c - \rho_{cp} - \langle \bar{E}_n \rangle}{\sigma_n}$, от 0 до ± 20 .

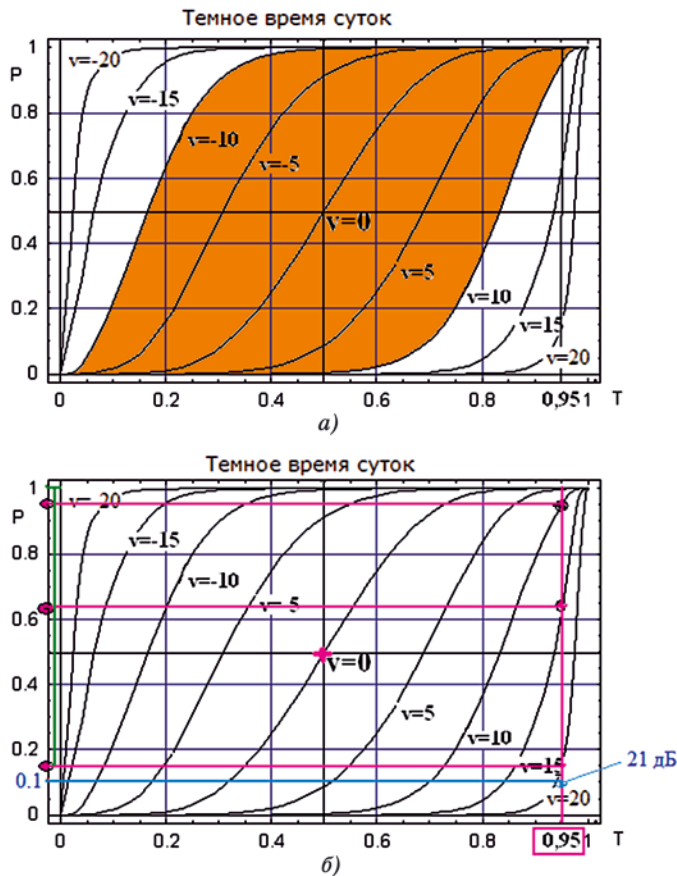


Рис. 6. Семейство кривых $W(T)$ при v от 0 до ± 20 : а — аналоговый сигнал; б — цифровой сигнал

На рис. 6 и 7 вероятность W обозначена как P , что означает долю территории от исходной полезной зоны, определенной при отсутствии случайных вариаций сигналов, с заданной или более высокой надежностью T . Кривая с $v = 0$ означает, что разность между текущим значением среднего уровня сигнала, например месячным, и долговременным средним (или ансамблевым) значением помехи, например годовым, равна граничному значению отношения сигнал/помеха.

На рис. 6, а (и ниже на рис. 7, а) цветом выделена зона, ограниченная разностью между значением сигнал-помеха и защитным отношением ± 10 дБ, при котором качество вещания считается приемлемым, изменяясь в пределах от несколько выше удовлетворительного (при -13 дБ, т.е. 30–17) до отличного. При дальнейшем снижении уровня сигнала качество приема будет постепенно деградировать до неудовлетворительного.

На рис. 6, б для тех же исходных данных, что и для аналогового случая, показана ситуация при цифровом сигнале. Для цифрового вещания пороговым значением надежности в практике оценки цифрового вещания принято 98% исправно декодированных фреймов. Это значение трудно достижимо, и за нижнюю допустимую границу вначале примем 95%. На рис. 6, б кривая $v = 0$, как и на рис. 6, а, соответствует состоянию, при котором превышение сигнала над помехой равно защитному отношению.

В таком случае из рис. 6, б следует, что при надежности T выше 50% (0,5) доля территории P также будет составлять 50% (0,5). Эта же кривая показывает, что с надежностью выше 0,6 будет покрыто примерно 25% территории,

с надежностью 0,7 — около 10%, и т.д. (отсчитывается от пересечения вертикальной линии с выбранной надежностью с кривой $v = 0$ до горизонтальной линии с $P = 1$). Если увеличением излучаемой мощности довести превышение сигнала над помехой до 21 дБ, можно увидеть, что вертикальная линия $T = 0,95$ пересекает кривую $v = 21$ на уровне $P = 0,1$, а это соответствует покрытию территории 90% с надежностью 95% и выше. Если ограничиться повышением мощности только до превышения над помехой $v = 15$ дБ, то с надежностью 95% и выше будет покрыто несколько больше 35% территории (вторая красная горизонтальная линия). При $v = 10$ дБ — только 5%.

Из рассмотренных рисунков видно, что в данной задаче интегральное распределение $\{(11) + (8)\}$ в полной мере проявляет обменные свойства относительно переменных P и T при закрепленных параметрах κ и v . Более того, $\{(11) + (8)\}$ представляет собой единый комплекс из четырех параметров, позволяющий, например, закрепить параметр T и определить, при каких значениях трех других параметров могут быть получены наилучшие результаты.

В светлое время суток ионосферной помехи не будет, поэтому в самом благоприятном гипотетическом случае допустимо наличие только ровного шумового фона. Тогда за счет изменений во времени СКО снизится до $СКО = (2,5^2 + 2,7^2)^{0,5} = 3,68$ дБ, или $\kappa = 3,68/3,7 = 1$. Остальные параметры сохраняются. Семейство кривых надежности для аналогового работы приобретает вид, показанный на рис. 7, а. Как и для предыдущего случая, здесь цветом выделена зона с преобладанием разности сигнал-помеха над защитным отношением ± 10 дБ. Можно видеть, что при снятии случайных изменений уровня помехи и сохранении $v = 0$ надежность, например, 80% (при отношении сигнал/помеха 30 дБ) доступна для 20% зоны вещания, в то время

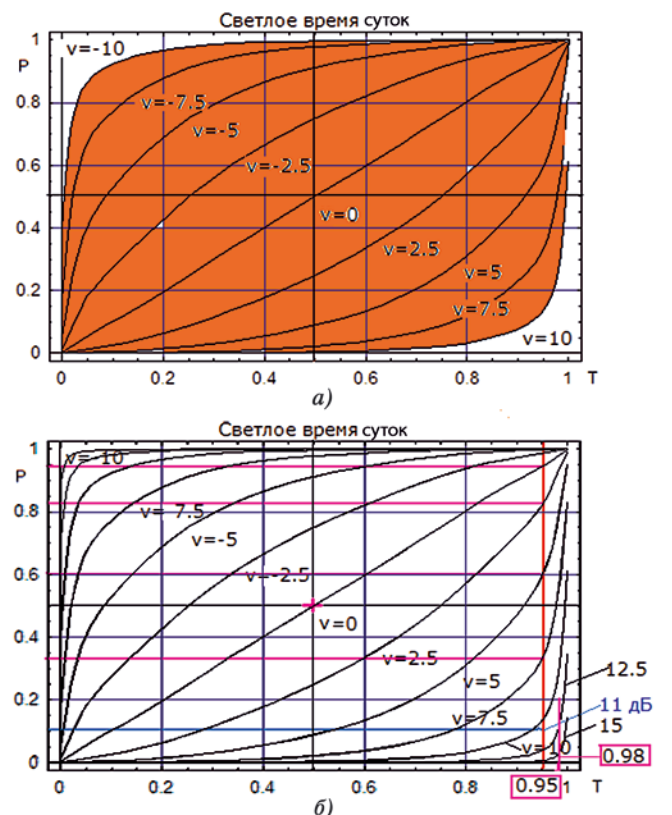


Рис. 7. Кривые надежности для аналогового (а) и цифрового (б) вещания

как в предыдущем случае при таких же требованиях доля полезной зоны не превышала 2%.

В случае цифрового вещания преимущества можно видеть на всех уровнях сигнала (рис. 7, б). Например, надежность 95% будет на 90% площади уже при 11 дБ превышения разности сигнал–помеха над защитным отношением — вместо 21 дБ в предыдущем случае. Превышение лишь на 6–7 дБ обеспечит надежность 95% только на 50% площади. Для обеспечения надежности 98% на 90% площади (см. рис. 7, б) требуется несколько увеличить превосходство сигнала над помехой, доведя его до 12,5 дБ.

Обсуждение: расчеты. Примеры расчета надежности для различных процентов полезной зоны (см. рис. 6 и 7) показывают, что без учета случайных разбросов значений параметров при достижении превышения уровня сигнала над помехой величины, равной выбранному защитному отношению (что соответствует равенству $v=0$), надежность 50% будет обеспечена на 50% территории.

Для аналоговой системы (с ее плавной деградацией сигнала) это считается нормой — для цифровой недопустимо. Чтобы обеспечить более высокие заданные требования, необходимо учесть конкретные значения стандартных отклонений параметров для данной радиолинии или для данной ситуации. Из примера на рис. 6, б следует, что для достижения доли территории 90% с надежностью 95% или более высокой необходимо, условно говоря, повысить излучаемую мощность на 21 дБ по отношению к ситуации без помех и флуктуаций, т.е. по отношению к случаю $v=0$. Это для ночных условий, сохранение полезной зоны в которых является практически неразрешимой задачей. Если не повышать мощность, зона сократится и ее граница приблизится к передатчику на расстояние, определяемое по соответствующей кривой из Рек. Р.368–10.

Для дневного случая (см. рис. 7, б) ситуация проще. Чтобы достичь надежности 95% на территории 90% требуется увеличение мощности на 11 дБ. Если этого не сделать, зона с заданными требованиями, как и в предыдущем случае, сожмется, но меньше.

Для обоих случаев необходимо учесть, что по сравнению с аналоговым вариантом при цифровом сигнале защитное отношение значительно меньше. Разница составляет 8–12 дБ, что в дневной ситуации вполне компенсирует необходимое повышение мощности. При этом полезная зона практически сохранит свои границы. Уточненные оценки могут быть получены в процессе работы радиолиний.

Остается в тени важный вопрос: почему 90% площади? Если полагать, что все слушатели имеют право на равный доступ к радиовещанию, вполне уместен вариант, например, 98% надежности по площади с 98% надежностью по времени, если 100% иметь нереально. Из рис. 7, б видно, что в этом случае точка пересечения $P=0,98$ и $T=0,98$ лежит на кривой примерно $v=15$ дБ. Скорее всего, такая цифра приведет к некоторому превышению типичного значения напряженности поля для средних волн 60 дБ при защитном отношении для цифрового сигнала 21 дБ.

Рассмотренные ситуации без возможных деталей просто, «на пальцах», иллюстрирует рис. 8, относящийся к дневной ситуации (см. рис. 7, б), где уровень помех 30 дБ, уровень достаточной напряженности поля для аналоговой системы 60 дБ при значении С/П 30 дБ. Выше уровня помех (30 дБ) показаны: уровень С/П информационного качества аналогового (17 дБ) и цифрового (21 дБ) сигнала. Выше уровня С/П цифрового сигнала (21 дБ) приведены значения компенсации замираний, упоминавшиеся выше: 11, 12,5 и 15 дБ. Здесь наглядно видна отрицательная роль



Рис. 8. Диаграмма уровней сигналов и замираний для АМ и ЦРВ случайных изменений параметров при рассмотрении работы линии на многолетнем периоде.

Если без случайных изменений преимущества цифровой системы в данном примере составляют примерно 9 дБ, то при наименее требовательном режиме (95% надежность и 90% доля от исходной площади) необходимая напряженность поля превосходит 60 дБ (30+21+11 дБ). При более жестких требованиях к качеству обслуживания в цифровом варианте требуется еще более высокое значение компенсирующей мощности.

В рассмотренном примере значение С/П для цифровой системы принято 21 дБ. Эта цифра не случайна. Во-первых, в Рек. Р.1615 для режима работы 64QAM с различными скоростями и уровнем защиты предлагается целая палитра значений, от 16 до 22 дБ (в частности, таблицы 7–9), в зависимости от ситуации, которая большей частью не известна и не подвластна оператору. Во-вторых, результаты прослушиваний и измерений, поступившие в адрес DRM от радиослушателей за 2006–2009 гг., для СВ-станций дали картину, приведенную на рис. 9. Подробности условий приема не сообщаются, но с большой долей вероятности можно предположить, что это не специальные тихие места вдали от жилых массивов. На рисунке можно увидеть наличие переходной зоны, характеризующейся началом примерно со значения С/Ш ≈ 11 дБ (левее которого нет отличных оценок) и оканчивающейся примерно на С/Ш $\approx 21...22$ дБ (правее которого практически только отличные оценки). Таблицы из Рек. Р.1615 и приведенные на рис. 9 данные позволили взять за основу для цифровой системы при анализе примеров защитное отношение 21 дБ.

Можно принять и другие разумные цифры защитных отношений, но на итоговых результатах это заметно не отразится. Сделаем одну оговорку. При переходе на режим работы 16QAM защитные отношения снижаются в среднем на 5 дБ. Это позволяет работать при более низкой напряженности поля, причем качество работы несколько снижа-

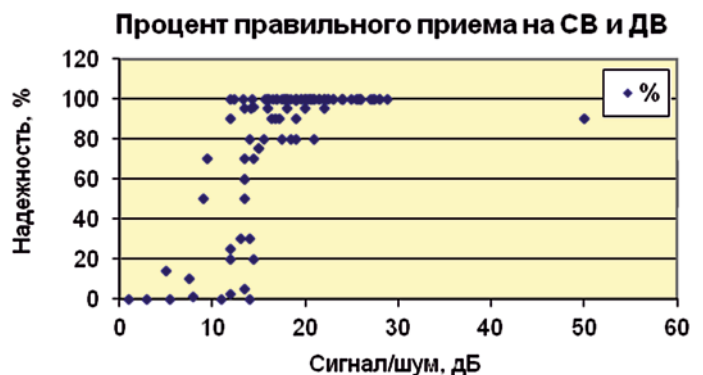


Рис. 9. Результаты прослушиваний и измерений

ется. Но трехлетние наблюдения за работой КВ-станций показали, что только несколько передающих станций пробовали некоторое время работать в этом режиме (в частности, в Португалии, Индии, Нигерии).

При более глубоком и подробном анализе целесообразно, даже необходимо, проводить расчеты не только для чистого поля вдали от производств и жилых массивов, где на короткий период иногда могут сложиться близкие к лабораторным условия, но и для жилых помещений в долговременном исчислении, где пребывает целевая аудитория радиовещания.

Обсуждение: сравнение систем. Отметим несколько неоднозначных моментов. Относительно цифровой системы вопрос в целом понятен: до некоторой степени можно заплатить качеством сигнала за увеличение полезной зоны (но пороговый эффект и переходная нерабочая зона все равно сохраняются). Оценкой качества в цифровом случае служит объективно измеряемый заданный процент исправно декодированных фреймов. В аналоговом случае критериев несколько и они весьма размыты. По стандарту достаточной чувствительностью приемника считалось общепринятым (и это до сих пор в силе) иметь отношение сигнал/шум на его выходе равным 20 дБ (ГОСТ 5651–89, п. «Чувствительность, ограниченная шумами», таблица 2) [10]. Средняя глубина модуляции, при которой определена эта чувствительность, в ГОСТе не указана. Скорее всего, во время его создания общеупотребительной была реальная средняя глубина модуляции 30%. Это означало, что по высокой частоте отношение сигнал/шум равнялось 30 дБ, т.е. такой величине, какая установлена, но и не только по этой причине, техническими параметрами в Заключительных актах Конференции «Женева-75».

Вместе с тем в других ГОСТах к бытовым приемникам предъявляются другие требования. В частности, в ГОСТ 9783–88 ([11], п.3.2.2) чувствительность определяется при отношении сигнал/шум на выходе приемника 26 дБ и модуляции 100%. Эти два подхода весьма различны. Например, если в последнем случае ориентироваться на модуляцию 30%, то приходим к отношению С/Ш всего лишь 15,5 дБ, что по сравнению с 20 дБ в предыдущем ГОСТе является более чем умеренной величиной. Качество вещания при этом будет несколько ниже удовлетворительного.

Встречаются и смешанные критерии, например отношение С/Ш 26 дБ при модуляции 30%. Отметим также, что в зарубежных оценках аналоговых систем часто используется модуляция 50–53%, иногда до 100%, при отношении С/Ш 26 дБ [12].

Другим критерием достаточного качества приема является напряжение на входе приемника (указывается в инструкциях к бытовым приемникам). Для хороших приемников это 50 мкВ. А значит, при действующей длине приемной антенны, например 0,5 м, при слабых атмосферных шумах достаточно иметь напряженность поля 40 дБ/мкВ/м. По измерениям на образцах шести типов серийных отечественных и зарубежных приемников получена чувствительность на ДВ от 40 до 55 мкВ, на СВ — от 30 до 70 мкВ [12].

При таком разнообразии подходов без конкретного описания правил оценки аналогового сигнала весьма затруднительно провести убедительное сравнение качества работы различных систем, тем более если одна из них с пороговыми свойствами (ранее, в [9], в отношении аналоговой и цифровой систем было отмечено, что «сравнивать два таких разнородных варианта с единой технической позиции пока не представляется возможным»; но практика заставляет, и сравнивать как-то надо...). Поэтому при оценке за-

рубежных экспериментов, где не указаны параметры аналоговых приемных устройств, в ряде случаев приходится отказываться от комментариев относительно приводимых сравнительных результатов, где оценка работы аналоговой системы дается по принципу «нравится — не нравится».

Есть еще одно обстоятельство. Существует, по крайней мере, два назначения вещательной системы: а) донести на заданной территории программу с хорошим качеством и б) передать на максимальное расстояние информационное сообщение с любым качеством, но с понятным содержанием, что, по-видимому, относится в первую очередь к большим территориям со слабо развитой сетью вещания. Очевидно, что оценка реализации этих двух вещательных задач производится с различных позиций. Для второй, где требуется наибольшая дальность действия и многолетняя работа радиовещания проводится в любых условиях, подходит система с наиболее плавной непрерывной деградацией сигнала. Поэтому сравнивать системы вещания, так же как и задавать параметры приемных устройств, целесообразно с учетом предназначения каждой системы.

Заключение. Ситуации с зонами обслуживания, рассмотренные в разделе «Примеры расчетов и анализ распределений», представляют собой только модель. Совершенно не обязательно, что в реальных условиях будут такие же соотношения зон и надежностей. Тем более что значительное число факторов в расчетах не участвовало (случайные изменения проводимости почвы, рельеф, статистика антенн, растительность, сезонные изменения и т.д.). Но качественное ядро, по-видимому, свои черты сохранит.

В любом случае, из проведенного выше анализа следует, что совместный взаимозависимый расчет надежности и соответствующей ей зоны покрытия с применением формулы {(11) + (8)} обеспечивает широкие возможности анализа ситуации и подбора характеристик рассматриваемой сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернов Ю. А. Надежность канала радиовещания // Труды НИИР.— 1969.— № 1.— С. 131–139.
2. Чернов Ю. А. Надежность сетей радиовещания на коротких и средних волнах // Труды НИИР.— 1969.— № 2.— С. 115–123.
3. Чернов Ю. А. Некоторые приложения теории надежности сетей радиовещания к анализу экспериментальных результатов // Труды НИИР.— 1969.— № 3.— С. 130–137.
4. Чернов Ю. А. Надежность передачи программы радиовещания при одновременном использовании нескольких частотных каналов // Труды НИИР.— 1969.— № 4.— С. 116–120.
5. Чернов Ю. А. Надежность приема программы при наличии конкурирующих сетей радиовещания // Труды НИИР.— 1973.— № 4.— С. 71–78.
6. Чернов Ю. А. Необходимое число частотных каналов в высокочастотном диапазоне для передачи одной радиовещательной программы с заданной надежностью // Труды НИИР.— 1982.— № 3.— С. 66–72.
7. Рекомендация МСЭ-R P.842–5. Расчет надежности и совместности ВЧ радиосистем.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.— М.: Наука, 1968.
9. Чернов Ю. А. Цифровое вещание до 30 МГц: иллюзии и реальность // Электросвязь.— 2012.— № 1.
10. ГОСТ 5651–89. Аппаратура радиоприемная бытовая. Общие технические условия.
11. ГОСТ 9783–88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений.
12. Кононович Л. М. Современный радиовещательный приемник. М.: Радио и связь, 1986.