

УДК 621.396.98.004.1

К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Ж.В. СЛАДЬ

В данной статье приводится методика оценки энергетических потерь, возникающих при работе систем связи. Традиционные методики подобной оценки не учитывают неизбежных энергетических потерь, связанных с запаздыванием сигнала, дискретизацией изменяемых параметров и ошибками в цепи управления работой системы. Приведён подробный анализ законов распределений для различных каналов связи.

Ключевые слова: система связи, закон распределения вероятностей амплитуд, искажение информации о состоянии канала связи.

1. Введение

Решение задачи обеспечения надежной связи в значительной степени зависит от полноты имеющихся на приемной и передающей стороне радиолинии сведений о характеристиках полезного сигнала и действующих в канале связи помех. Вследствие изменяющихся условий распространения радиоволн, случайного характера сигнала и помех достоверность приема информации непрерывно меняется. Оценка последствия этих изменений, определение путей преодоления трудностей обеспечения устойчивой связи невозможно без знания основных статистических характеристик сигналов и помех. Наиболее важными из них являются средние значения, дисперсии и плотности распределения вероятностей амплитуд.

2. Статистические характеристики сигналов в каналах связи.

Многочисленные наблюдения в диапазонах средних коротких и ультракоротких волн показывают, что в большинстве случаев влияние канала связи на энергетические характеристики сигналов и помех можно описать обобщенным законом распределения вероятностей амплитуд:

$$W(u) = \frac{2m^m u^{2m-1}}{\Gamma(m) (\overline{u^2})^m} e^{-\frac{mu^2}{\overline{u^2}}} \quad (1)$$

где $\overline{u^2}$ – среднеквадратичное значение огибающей амплитуды, m – параметр распределения, $\Gamma(m)$ – гамма-функция, связанная с m и $\overline{u^2}$ соотношением:

$$\overline{u^2}^v = \frac{\Gamma(m + 0,5v)}{\Gamma(m)} \sqrt{\left(\frac{\overline{u^2}}{m}\right)^v}.$$

Пользоваться вышеуказанной функцией распределения для описания наведения сигналов или помех в общем виде неудобно из-за громоздкости получающихся при расчетах выражений. Однако для большинства практических ситуаций, связанных с особенностями распространения радиоволн в различных диапазонах можно указать несколько частных случаев, достаточно хорошо аппроксимирующих поведение канала связи и позволяющих существенно упростить расчеты.

Так, например при $m = 0,5$ распределение переходит в односторонний нормальный закон [1].

$$W(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi u^2}} e^{-\frac{u^2}{2u^2}}. \quad (2)$$

Такому закону распределения амплитуд подчиняются мгновенные значения нерегулярных составляющих сигнала при отражении их от неоднородной тропосферы и ионосферы [2].

При $m = 1$ огибающая напряжений подчиняется закону Релея:

$$W(u) = \frac{2u}{u^2} e^{-\frac{u^2}{u^2}}. \quad (3)$$

Распределение сгибающей амплитуд по закону Релея наблюдается в УКВ каналах дальней связи с ионосферным и тропосферным рассеянием радиоволн, а также в каналах КВ и СВ, где разность хода лучей много больше периода несущего колебания. Этим распределением обычно аппроксимируют достаточно быстрые изменения состояния канала связи.

В УКВ каналах прямой видимости обычно наблюдаются быстрые замирания, подчиненные закону Релея. Глубина замираний на трассах до 80 – 100 км не превышает 6 – 12 дБ по сравнению с медианным значением и возрастает с понижением чистоты. В диапазоне частот до 80 МГц наблюдаются замирания глубиной до 10 – 20 дБ при средней длительности замираний 1 – 2 с. Причинами их являются неоднородность тропосферы и ионосферы. На более высоких частотах влияние ионосферы проявляются слабо и флуктуации определяются в основном эффектом Фарадея и изменением положения диаграммы направленности воздушного судна при его движении, что вследствие неравномерности диаграммы направленности приводит к флуктуациям амплитуды сигнала. Глубина замираний при этом достигает 5 – 10 дБ, а длительность их 1 – 10 с.

3. Оценка энергетических потерь при работе системы связи

Грубая оценка эффективности систем связи, рассмотрение их особенностей, сравнение эффективности проведено в [2]. Принятая в [2] методика расчета не учитывает неизбежных энергетических потерь, связанных с запаздыванием сигнала, дискретизацией изменяемых параметров и ошибками в цепи управления работой системы.

Оценим энергетические потери, возникающие при работе системы связи. Эти потери обуславливается затратами времени на переходы от T_i к T_{i+1} и наоборот, причем необходимость в изменении величины T_i возникает как вследствие изменения состояния канала связи, так и вследствие ошибок в оценке состояния канала связи или ошибок в принятой информации по обратному каналу. Процесс адаптации реальной системы связи характеризуется инерционностью срабатывания ее на управляющее воздействие. Запаздывание команд на изменение T_i складывается из времени анализа состояния канала связи T_0 , времени выработки и исполнения команды на смену T_i в приемном и передающем устройствах t_k , времени распространения радиоволн в прямом и обратном направлениях t_p . Вопросы определения T_0 были рассмотрены в предыдущем отчете. Что касается t_k , то его конкретная величина зависит от схемного выполнения аппаратуры. На практике t_k , как правило, невелико. Значение t_p можно легко определить, если пренебречь смещения объекта за время запаздывания. Тогда,

$$t_p = \frac{2d}{3 \cdot 10^5} \quad (4)$$

где d – среднее расстояние между корреспондентами в км. Предположим, что за время, необходимое для самоподстройки системы состояние канала связи не изменяется. При

ухудшении отношения сигнал/шум на выходе решающей схемы ($h_{\text{вых}}^2 \leq h_0^2$) выдается команда, предусматриваемая смену T_i на T_{i+1} . Если условиться, что вся информация, принятая за время $t_n = T_0 + t_k + t_p$ считается недостоверной и подлежит повторению, то время ее передачи увеличится в $(1 - \frac{T_i}{T_{i-1}})$ раз.

Затраты времени на переходы от T_i к T_{i-1} определяются как

$$t_3^- = (1 + \frac{T_1}{T_{i-1}})t_n \quad (5)$$

При изменении T_i на T_{i+1} в течение времени t_n , из-за инерционности срабатывания системы, информация передается с меньшей скоростью, чем позволяет состояние канала связи, так как в этом случае $P_{\text{ош}} < P_3$, то не требуется производить повторение символов, принятых за t_n , а потери времени будут равны

$$t_3^+ = (1 - \frac{T_{i+1}}{T_i})t_n \quad (6)$$

Пусть состояние канала связи на передавшем конце радиолинии определяется ошибочно с вероятностью $P_{\text{ок}}$. Эта вероятность, в свою очередь, зависит от вероятности неправильного определения состояния канала связи в устройстве контроля состояния канала (УКСК) - δ и вероятности появления ошибки в информации от УКСК за счет влияния помех в обратном канале $q_{\text{обр}}$. Таким образом $P_{\text{ок}} = \delta + q_{\text{обр}} - \delta q_{\text{обр}}$.

Если считать, что отношение сигнал/помеха на входе решающей схемы информационного канала h^2 и обратного канала $h_{\text{обр}}^2$ зависит в основном от расстояния между корреспондентами, то можно приближенно написать $h_{\text{обр}}^2 = kh^2$, где k - коэффициент пропорциональности. При когерентном приеме для бинарной системы связи текущее значение $q_{\text{обр}}$, будет равно:

$$q_{\text{обр}} = 1 - \phi(\gamma \sqrt{2kh^2 F_{\text{обр}} T_{\text{обр}}}), \quad (7)$$

где коэффициент γ зависит от вида используемых сигналов эффективной ширины спектра помехи в полосе частот сигнала $F_{\text{обр}}$ и длительности информационного символа $T_{\text{обр}}$ в обратном канале.

Для некогерентного приема

$$q_{\text{обр}} = 0,5 \exp(-\frac{kh^2 F_{\text{обр}} T_{\text{обр}}}{2}) \quad (8)$$

При несоответствии длительности информационного символа T состоянию канала связи или при ошибках в данных, получаемых по обратному каналу происходит изменение T . Условимся, что если канал связи находится в T_i или n состоянии (что соответствует граничным длительностям информационных символов T_1 или T_n), то наличие команды на увеличение T_1 или на уменьшение T_n не будет приводить к изменению T . Во всех остальных случаях эти изменения должны происходить. Будем считать, что искажение информации о состоянии канала приводит к выдаче ложных команд на переход от T_{i+1} к T_i с вероятностью $P_{\text{ок}}^-$ - и на переход от T_i к T_{i+1} с вероятностью $P_{\text{ок}}^+$. Причем для простоты положим $P_{\text{ок}}^- = P_{\text{ок}}^+ = 0,5P_{\text{ок}}$. Допустим, что за время, необходимое на адаптацию системы, может произойти единичная ошибка в определении состояния канала. Такое определяется величиной T_0 . Общее число

измерений, сделанных за время между моментами перестройки системы, очевидно, будет зависеть от времени нахождения канала связи в i -том состоянии. В [3] дана методика определения среднего времени нахождения канала связи в i -том состоянии $\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}$ для логарифмическо-нормального и релеевого распределения флуктуирующей части огибающей помех. Приведем конечный результат

$$\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}_{\text{л}} = \frac{1}{\sqrt{-R''_{\text{л}}(0)}} \cdot \frac{2\pi \left\{ \phi \left[\frac{10 \lg \left(\frac{T_{\text{н}}}{v_k} - N_0 e^{-\ln N_{\text{ф}}} \right)}{\sigma_{\text{л}}} \right] - \phi \left[\frac{10 \lg \left(\frac{T_{\text{н}}}{v_{k+1}} - N_0 e^{-\ln N_{\text{ф}}} \right)}{\sigma_{\text{л}}} \right] \right\}}{\exp \left\{ - \frac{\left[10 \lg \left(\frac{T_{\text{н}}}{v_k} - N_0 e^{-\ln N_{\text{ф}}} \right) \right]^2}{2\sigma_{\text{л}}^2} \right\} + \exp \left\{ - \frac{\left[10 \lg \left(\frac{T_{\text{н}}}{v_{k+1}} - N_0 e^{-\ln N_{\text{ф}}} \right) \right]^2}{2\sigma_{\text{л}}^2} \right\}},$$

$$\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}_{\text{р}} = \frac{\sigma_{\text{р}} \sqrt{2\pi}}{\sqrt{-R''_{\text{р}}(0)}} \cdot \frac{\left[\exp \left(- \frac{T_{\text{н}}}{\psi \sigma_{\text{р}}^2 K_{i+1}} \right) - \exp \left(- \frac{T_{\text{н}}}{\psi \sigma_{\text{р}}^2 K_i} \right) \right]}{\left[\sqrt{\frac{2T_{\text{н}}}{\psi K_{i+1}} - N_0} \exp \left(- \frac{T_{\text{н}}}{\psi \sigma_{\text{р}}^2 K_{i+1}} \right) + \sqrt{\frac{2T_{\text{н}}}{\psi K_i} - N_0} \exp \left(- \frac{T_{\text{н}}}{\psi \sigma_{\text{р}}^2 K_i} \right) \right]}, \quad (9)$$

где $R''_{\text{л}}(0) = \frac{d^2 R_{\text{л}}(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0}$, $R''_{\text{р}}(0) = \frac{d^2 R_{\text{р}}(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0}$, а $R_{\text{л}}(\tau)$ и $R_{\text{р}}(\tau)$ - коэффициенты корреляции функции $N_{\text{фл}}(t)$ и $N_{\text{фр}}(t)$.

Общее число измерений, сделанных за время нахождения канала на i -том состоянии, будет равно:

$$\ell_i = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} \quad (10)$$

Из этого числа количество однократно искаженных измерений составит $\ell_{14} = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} (P_{\text{ок}}^+ + P_{\text{ок}}^-)$.

Количество двойных искажений (подряд в двух измерениях) определяется как:

$$\ell_{24} = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} (P_{\text{ок}}^+ + P_{\text{ок}}^-)^2. \quad (11)$$

С достаточной для практики точностью искажения более высокой кратности можно не учитывать, поскольку вероятность таких событий мала и уменьшается с большей скоростью в сравнении с возрастанием непроизводительных затрат времени на переходы от T_{i+1} к T_i и наоборот.

При единичных искажениях время, затрачиваемое на переходы, составит величину $T_0 + t_n$, поскольку при неизменном состоянии канала и принятых допущениях несоответствие длительности информационного символа состоянию канала будет обнаружено во время следующего измерения и система вернется в положение, из которого она вышла вследствие ложной оценки состояния канала. Общие потери времени на ложные переходы за $\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}$ при единичных ошибках в оценке состояния канала составят

$$t_{om_i}^{(1)} = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} P_{ok}(t_0 + T_0), i = 2, 3, \dots, n-1$$

$$t_{om_{i+1}}^{(1)} = 0,5 \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} P_{ok}(t_0 + T_0), i = 1, i = n$$

По аналогии с вышеизложенным при двоичных искажениях времени ложной перестройки может составить $3T_0 + t_n$ или $2T_0 + t_n$ ($i = 2, 3, \dots, n-1$). Если $i=1$ или $i=R$, то потери могут быть равными $3T_0 + t_n$, $2T_0 + t_n$ или $T_0 + t_n$. С учетом вероятностей поступления этих событий потери времени на ложную перестройку системы за $\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}$ при двойных ошибках в оценке состояния канала будут равны

$$t_{om_i}^{(2)} = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} P_{om}^2(t_n + 2,5T_0), i = 3, 4, \dots, n-2,$$

$$t_{om_i}^{(2)} = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} P_{om}^2(t_n + 2,25T_0), i = 2, i = n-1,$$

$$t_{om_i}^{(2)} = \frac{\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}}{T_0} P_{om}^2(t_n + 1,5T_0), i = 1, i = n.$$

Найдем суммарные потери времени t_a при адаптации частоты как за счет изменения состояния канала связи, так и за счет ложных переходов от T_i к T_{i+1} и наоборот. Если предположить, что в процессе адаптации увеличение или уменьшение длительности информационного символа происходит так, что его величина изменяется за один шаг в одно и то же число раз, то есть $\frac{T_1}{T_2} = \dots = \frac{T_{i-1}}{T_i} = \frac{T_i}{T_{i+1}} = \dots = \frac{T_{n-1}}{T_n}$, то, скажем при $\frac{T_i}{T_{i+1}} = 2$ получим

$$t_3^- = 1,5(T_0 + t_k + t_p);$$

$$t_3^+ = 0,5(T_0 + t_k + t_p).$$

За достаточно большое время, что будет место при медленных изменениях состояния канала связи, в каждом интервале h_i^2, h_{i+1}^2 число переходов от T_{i+1} к T_i и от T_i к T_{i+1} , будет примерно одинаково и в среднем t_a можно найти как

$$t_a = \frac{t_3^+ + t_3^-}{2} + t_{om_i}^{(1)} + t_{om_i}^{(2)}, i = 2, 3, \dots, n-1,$$

$$t_a = t_3^+ + t_{om_i}^{(1)} + t_{om_i}^{(2)}, i = 1,$$

$$t_a = t_3^- + t_{om_i}^{(1)} + t_{om_i}^{(2)}, i = n.$$

Различие ошибок в информационном канале будет приводить к тому, что часть времени t_{nep} от $\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)}$ будет затрачиваться на переспросы. Если не ограничивать число повторений r , то их среднее количество можно найти как $r = \frac{1}{1 - p_0}$ где p_0 - вероятность обнаруживаемых ошибок. Тогда,

$$t_{nep} = \left[\overline{\tau(h_i^2, h_{i+1}^2)} - t_n \right] \cdot \left(\frac{1}{1 - p_0} - 1 \right).$$

Литература

1. Буга Н.Н. Основы теории связи и передачи данных, ч.II. Ленинград, АВИКА им. Можайского, 1970.
2. А.И.Козлов, А.И.Логвин, В.А.Сарычев. Поляризация радиоволн. Книга 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. - Москва, Радиотехника, 2008.
3. Сарычев В.А. Сложные сигналы произвольной поляризационной и временной структуры и их применение в электросвязи. – Электросвязь, 2003, №7.

ESTIMATION OF POWER LOSSES DURING WORK OF COMMUNICATION NETWORK

Slad J.V.

A method over of estimation of power losses, arising up during work of communication networks is brought in this article. The traditional methods of similar estimation do not take into account inevitable power losses, related to the delay of signal, discreet of changeable parameters and errors in the chain of management work of the system. The detailed analysis of laws of distributing is resulted for the different canals of connection.

Keywords: communication network, law of probability of amplitudes distribution, distortion of state information communication channel.

REFERENCES

1. Buga N.N. Osnovy teorii svyazi i peredachi dannyh, ch.II. Leningrad, AVIKA im. Mozhajskogo, 1970.
2. A.I.Kozlov, A.I.Logvin, V.A.Sarychev. Polyarizaciya radiovoln. Kniga 3. Radiopolyarimetriya slozhnyh po strukture signalov. - Moskva, Radiotekhnika, 2008.
3. Sarychev V.A. Slozhnye signaly proizvol'noj polyarizacionnoj i vremennoj struktury i ih primenenie v ehlektrosvyazi. – EHlektrosvyaz', 2003, №7.

Сведения об авторе

Сладь Жорж Васильевич, 1939 г.р., доктор технических наук, профессор, Учёный секретарь филиала “НИИ Аэронавигации” ФГУП ГосНИИ ГА, автор 65 научных работ, область научных интересов – навигация, организация воздушного движения.