

УДК 621.396

Семенко А. И., д.т.н.; Домрачева Е. А.

(Государственный университет телекоммуникаций. +380 50 385 20 36. setel@ukr.net

Хомич С. В., к.т.н.; Белова Ю. В. (Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова)

## ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

Семенко А. И., Хомич С. В., Домрачева К. О., Белова Ю. В. **Инженерний підхід до визначення пропускної здатності телекомунікаційних систем при наявності завад.** Розглянуті практичні аспекти визначення пропускної здатності телекомунікаційних систем при наявності завад. Показано, що пропускна здатність нестационарного каналу може бути представлена з використанням двох його станів. Пропонується здійснювати оцінку впливу кожного стану на пропускну спроможність через функцію втрат і питому вагу кожного із станів. На основі аналізу отриманих експериментально характеристик завад визначена модель нестационарного комутованого каналу, яка описує імовірнісні характеристики завад для двох станів. Проведена оцінка втрат пропускної здатності із врахуванням стаціонарного та нестационарного характеру завад в каналах зв'язку при частотній маніпуляції сигналу

**Ключові слова:** кількість інформації, пропускна здатність, спектральна ефективність, втрати інформації, завади, ширина спектра, модуляція, радіоканал, частотна маніпуляція

Семенко А. И., Хомич С. В., Домрачева Е. А., Белова Ю. В. **Инженерный подход к определению пропускной способности телекоммуникационных систем при наличии помех.** Рассмотрены практические аспекты определения пропускной способности телекоммуникационных систем при наличии помех. Показано, что пропускная способность нестационарного канала может быть представлена с использованием двух его состояний. Предлагается осуществлять оценку влияния каждого состояния на пропускную способность через функцию потерь и удельный вес каждого из состояний. На основе анализа экспериментально характеристик помех определена модель нестационарного коммутированного канала, которая описывает вероятностные характеристики помех для двух состояний. Проведена оценка потерь пропускной способности с учётом стационарного и нестационарного характера помех в каналах связи при частотной манипуляции сигнала.

**Ключевые слова:** количество информации, пропускная способность, спектральная эффективность, потеря информации, помехи, ширина спектра, модуляция, радиоканал, частотная манипуляция

Semenko A. I., Khomych S. V., Domracheva K. O., Byelova Yu. V. **Engineering approach to the definition of telecommunications systems bandwidth under the presence of interference.** It was represented the practical aspects of determining capacity telecommunications systems with the presence of noise. We reviewed the practical aspects of determining bandwidth of telecommunications systems in the presence of interferences. It is shown that the bandwidth of nonstationary channel can be represented with using two of its states. It is proposed to evaluate the impact of each state on the bandwidth through the loss function and the specific weight of each of the states. Based on analysis of the experimental received noise characteristics determined model of nonstationary commutated channel, which describes the probability characteristics of interference for the two states. We estimate the losses of bandwidth considering steady and unsteady nature of interferences in the communication channels with frequency shift keying signal.

**Keywords:** amount of information, bandwidth, spectral efficiency, data loss, noise, spectral width, modulation, radio, frequency shift keying

При проектировании телекоммуникационных систем (ТКС) основное задание составляет обеспечение пропускной способности систем, которая характеризует скорость передачи информации по каналу связи. Это количество информации  $I$ , которое можно передать за время  $T$  [1]:

$$C = \frac{I}{T} \text{ [бит/с]}. \quad (1)$$

В 1928 г. американский инженер Р. Хартли [1, 2] предложил формулу для определения количества информации, которое содержит источник сообщений с количеством возможных амплитудных уровней сообщений двоичного сигнала  $M$  (состояний, кодовых слов, кодовых сигнальных конструкций и т. п.) в случае равновероятных событий генерации каждого из них

$$I = \log M = \log (1/p) = -\log p \text{ [бит]}, \quad (2)$$

где  $p$  – вероятность генерации сообщения.

Тогда скорость передачи информации в канале связи будет

$$C = \frac{I}{T} \log M \text{ [бит/с].} \quad (3)$$

На рис. 1 приведена схема системы передачи информации.

В связи с неопределенностью полученного приемником сообщения от источника из-за воздействия помех будет иметь место потеря части информации  $I_{\text{пот}}$  [3, 4], то есть реальное количество верной информации, принятой приемником, будет меньшим:

$$I = \log M - I_{\text{пот}} \text{ [бит].} \quad (4)$$

Тогда и скорость передачи информации будет уменьшаться

$$C = \left(\frac{1}{T}\right)(\log M - I_{\text{пот}}) \text{ [бит/с].} \quad (5)$$

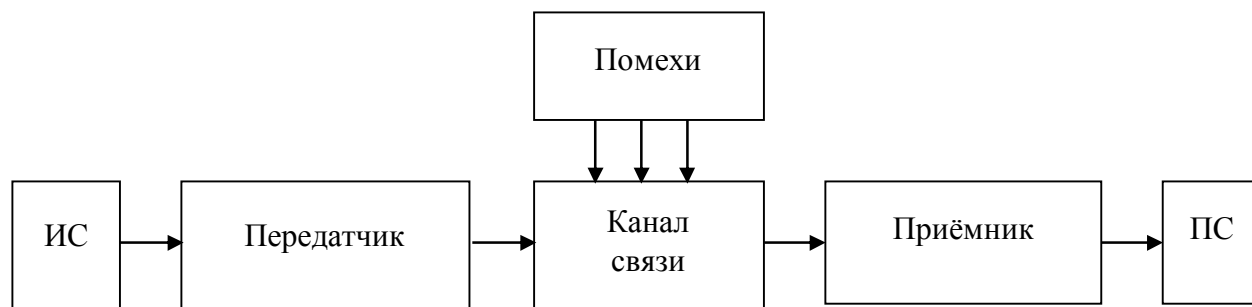


Рис. 1. Схема системы передачи информации  
(ИС – источник сообщения, ПС – получатель сообщения)

Реальная скорость передачи многопозиционного амплитудно-манипулированного и фазоманипулированного импульсного радиосигнала при длительности бита  $\tau$  и практической ширине спектра сигнала  $\Delta f_{\text{пр}} = 2/\tau$  в канале на основе кабельной медной пары, волоконнооптической линии и в радиоканале, полоса пропускания которых  $\Delta f_{\text{к}} = \Delta f_{\text{пр}}$ , при наличии помех в канале будет равна:

$$C = \left(\frac{2}{\tau}\right) (\log M - I_{\text{пот}}) = \Delta f_{\text{к}} (\log M - I_{\text{ном}}) \text{ [бит/с].} \quad (6)$$

Из формулы (6) получим спектральную эффективность системы при воздействии помех:

$$S = \frac{C}{\Delta f_{\text{к}}} = \log M - I_{\text{ном}} \text{ [бит/(с*Гц)].} \quad (7)$$

В общем случае  $I_{\text{пот}}$  зависит от числа позиций сигнала и интенсивности воздействия помех [3, 4]

$$I_{\text{пот}} = - \left[ p_0 \log p_0 + (1 - p_0) \log \frac{p_0}{M - 1} \right], \quad (8)$$

где  $p_0$  – вероятность возникновения ошибки.

В стационарных каналах связи характер потерь тесно связан с вероятностью ошибок  $p_0$ , которая характеризуется нормальным законом распределения вероятности случайной величины и может быть определена как функция ошибок [4, 5]:

$$p_0 = 1 - 2\Phi \left( \frac{z_p}{\sigma} \right), \quad (9)$$

где  $\Phi$  – функция ошибок,  $z_p$  – величина исправляющей способности (графическое объяснение приведено на Рис. 2),  $\sigma$  – среднеквадратическое значение мощности помехи.

Для канала с ЧМ  $\sigma$  может быть определена как [5, 6]

$$\sigma = \frac{1}{4h}, \quad (10)$$

где  $h$  – отношение сигнал/помеха.

Функция ошибок для нормального закона распределения вероятности случайной величины алгебраически будет иметь вид: [5]

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (11)$$

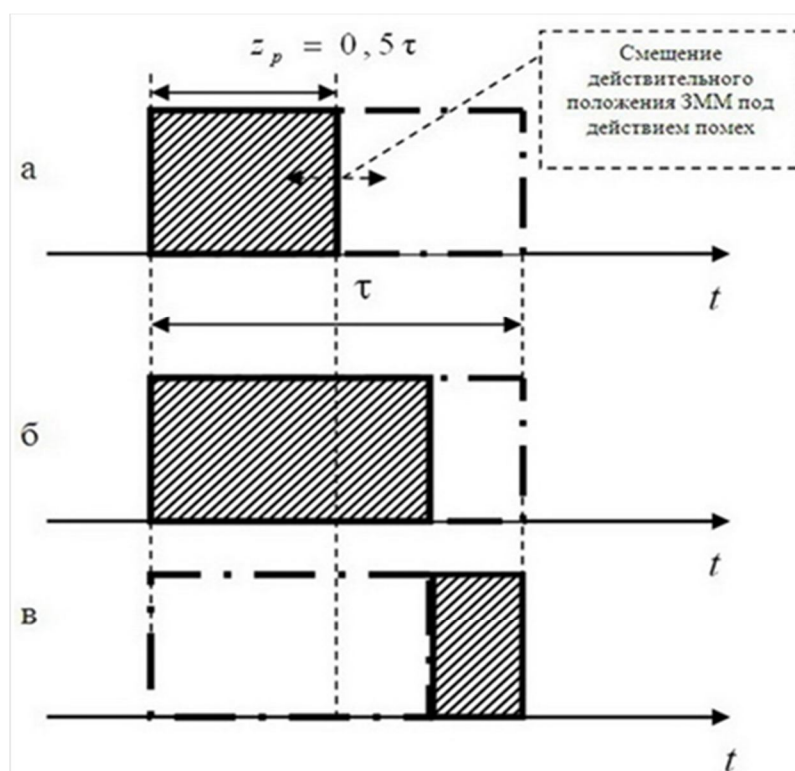


Рис. 2. Пример регистрации бинарного элемента:

- а) исправляющая способность равняется  $z_p = 0,5 \tau$ ;
- б) верная регистрация – знак на приёмной стороне будет соответствовать действительному;
- в) неверная регистрация – знак на приёмной стороне не будет соответствовать действительному

Формулы (9) и (11) следует трактовать как вероятность сдвига относительного действительного положения значимого момента модуляции ЗММ (точка изменения знаков и амплитуды импульсов) под действием помех на величину больше чем  $z_p$ , в результате чего при регистрации методом стробирования в средней точке возникнет ошибка.

Однако, как показывает практика, большинство реальных каналов характеризуются нестационарным характером помех. Существует значительное количество математических моделей для описания таких каналов [6, 7, 8, 9], что позволяет дифференцировать характеристики канала путем разложения на индивидуальные состояния. Основой для таких моделей стала цепь Маркова и исторически первая модель, которая базируется на ней, – модель Гильберта с двумя состояниями. Дальнейшее развитие научного направления математического моделирования параметров нестационарных каналов характеризуется значительным усовершенствованием моделей за счет усложнения математического

аппарата, увеличения количества состояний в модели, расширения входных или исходных данных, которые подлежат анализу.

Однако, во многих случаях количество состояний нестационарного канала может быть приведено к двум, а пропускная способность может быть представлена с использованием двух состояний в следующем виде [9, 10]:

$$C_{\Sigma} = \frac{2}{\tau} [\log M - (\gamma_1 I_{\text{пот1}} + \gamma_2 I_{\text{пот2}})], \quad (12)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – коэффициенты удельного веса каждого из двух состояний;

$I_{\text{пот1}}, I_{\text{пот2}}$  – потери информации в каждом из состояний.

Следовательно, можно предложить оценку влияния каждого состояния на пропускную способность через функцию потерь и удельный вес каждого из состояний.

Обобщая параметры существующих моделей и характеристики помех, полученных экспериментально [3, 4, 8, 9], можно определить модель нестационарного коммутированного канала, которая описывает вероятностные характеристики помех для двух состояний с параметрами, приведенными в Табл. 1.

Характеристики состояний нестационарного коммутированного канала		Табл. 1
1 состояние	2 состояние	
$\gamma_1 \in [0.99...0.999], \bar{\gamma}_1 \approx 0,995$	$\gamma_2 \in [0.001...0.01], \bar{\gamma}_2 \approx 0,005$	
$h_1^2 = \frac{u_c^2}{u_3^2} \in [100...190]$	$p_{0_2} \rightarrow 0,5$	
$p_0 = 1 - 2\Phi(x)$	$p_{n_2}(l_2)$	

В Табл.1 использованы следующие обозначения:

$u_c, u_3$  – величина сигнала и помехи;  $\Phi(x)$  – закон распределения вероятности;

$p_{0_2}$  – вероятность ошибочного приёма во втором состоянии;  $p_{n_2}(l_2)$  – вероятность

длительности второго состояния;  $l_2 = \frac{T_{l_2}}{\tau}$ ;  $T_{l_2}$  – интервал длительности второго

состояния;  $h_1$  – определено для двухпозиционного сигнала.

Известно [5], что вероятность длительности второго состояния определяется формулой

$$p_{n_2}(l_2) = \frac{1}{l_2 \sigma_{l_2} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln l_2 - \xi_{l_2})^2}{2\sigma_{l_2}^2}}, \quad (13)$$

где  $\xi_{l_2}, \sigma_{l_2}$  – среднее значение и среднеквадратичное отклонение случайной величины  $l_2$ .

Вероятность длительности второго состояния достаточно точно [4, 6, 9] аппроксимирует интервалы искажений сигнальных конструкций, которые характеризуются изменением количества ЗММ на интервале формирования сигнально-кодовых конструкций.

В таблицах 2 и 3 приведены расчетные и экспериментальные результаты по определению потерь для канала с использованием частотно-манипулированного сигнала.

Полученные значения  $I_{\text{пот}}$  в Табл. 2, 3 пригодны для определения пропускной способности систем при воздействии помех по формуле (12) и могут быть использованы при проектировании реальных систем связи.

Табулированые величины составляющей $\gamma_1 I_{\text{пот1}}$ в зависимости от $p_0 \in (0,0001...0,4)$ и $\gamma_1 \in (0,5...1)$ при $M = 512$						Табл. 2
$p_0 \backslash \gamma_1$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
0,0001	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-3}$	
0,1	0,68	0,82	0,95	1,09	1,23	
0,2	1,26	1,51	1,76	2,01	2,27	
0,3	1,79	2,14	2,5	2,86	3,22	
0,4	2,28	2,74	3,19	3,65	4,11	

Табулированые величины составляющей $\gamma_2 I_{\text{пот2}}$ в зависимости от $p_{0_2} \in (0,0001...0,4)$ и $\gamma_2 \in (0,001...0,4)$ при $M = 512$						Табл. 3
$p_{0_2} \backslash \gamma_2$	0,0001	0,1	0,2	0,3	0,4	
0,0001	$2,73 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	
0,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,13	0,27	0,41	0,54	
0,2	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,25	0,5	0,75	1	
0,3	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,35	0,71	1,07	1,43	
0,4	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0,45	0,91	1,3	1,82	

На Рис. 3 приведены расчетные значения потерь  $\gamma_1 I_{\text{пот1}}$ ,  $\gamma_2 I_{\text{пот2}}$  в формате 3D от параметров  $p_0$  и  $\gamma$  для фиксированного значения  $M=512$ .

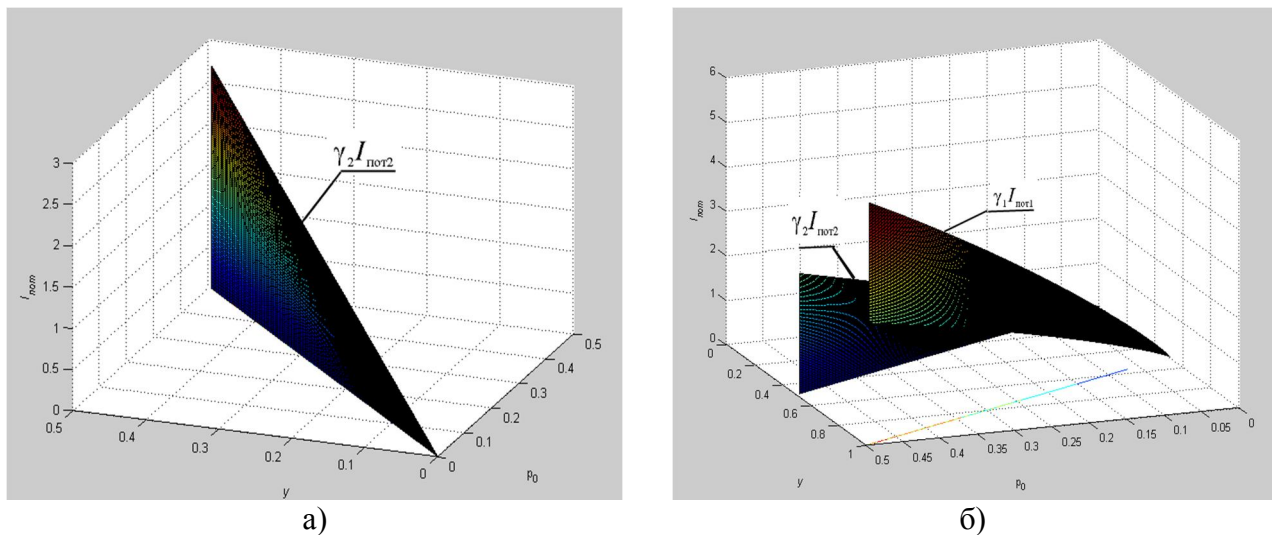


Рис. 3. Поверхности зависимостей параметров:

а) одной составляющей  $\gamma_2 I_{\text{пот2}}$  от  $p_{0_2} \in (10^{-3} ... 0,4)$  и  $\gamma_2 \in (0,001...0,4)$  при условии постоянной величины  $M = 512$ ; б) двух составляющих  $\gamma_1 I_{\text{пот1}}$ ,  $\gamma_2 I_{\text{пот2}}$  от параметров  $p_0$  и  $\gamma$  для фиксированного значения  $M$

В качестве примера определим по формуле (12) величину пропускной способности системы при наличии помех с использованием результатов Табл. 2 и 3 для параметров  $\tau = 0,125\text{мкс}$ ;  $M = 512$ ;  $\gamma_1 = 0,9$ ;  $p_0 = 0,1$ ;  $\gamma_2 = 0,1$ ;  $p_{0_2} = 0,4$ :

$$C_{\Sigma} = \frac{2}{1,25 \cdot 10^{-7}} [\log 512 - (1,23 + 0,45)] = 8 \cdot 10^7 \cdot 8,54786 = 5,85 \cdot 10^8 \text{ [бит/с]}$$

Очевидно, что данная величина на 19 % меньше максимальной величины пропускной способности канала без потерь.

### Выводы

1. В связи с неопределенностью получаемого приемником сообщения от источника из-за воздействия помех имеет место потеря части информации  $I_{\text{пот}}$ , что приводит к уменьшению пропускной способности реального канала.

2. Полученные в работе значения потери информации под воздействием помех могут быть использованы для проектирования реальных систем связи с использованием многопозиционных частотно-манипулированных сигналов.

### Литература

1. Hartley, R.V.L., "Transmission of Information", Bell System Technical Journal, July 1928, pp. 535–563.

2. Лев А. Ю. Теоретические основы многоканальной связи / А. Ю. Лев. – Москва : Связь, 1978. – 189 с.

3. Захарченко М. В. Системи передавання даних. –Т.1: Завадостійке кодування: підручник [для студ. вищ. техн. навч. закл.] / М. В. Захарченко. – Одеса «Фенікс», 2009. – 448 с.

4. Хомич С. В. Характер спотворень сигналів ТСК в стаціонарних і нестаціонарних каналах зв'язку / С. В. Хомич, К. О. Осадчук, Ю. В. Белова // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – Вип. 645. – С. 103-107.

5. Элементы теории передачи дискретной информации ; под ред. Л.П. Пуртова. – Москва : Связь, 1972. – 232 с.

6. Коричнев Л. П. Статистический контроль каналов связи / Л. П. Коричнев, В. Д. Королев. – Москва : Радио связь, 1989. – 240 с.

7. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений /Л. М. Финк. – Москва : Сов. радио, 1970. – 726 с.

8. Арипов М. Н. Передача дискретной информации по низкоскоростным каналам связи / М. Н. Арипов. – Москва : Связь, 1980. – 128 с.

9. Мелентьев О. Г. Теоретические аспекты передачи данных по каналам с группирующимися ошибками /под редакцией профессора В. П. Шувалова – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 253с.

10. Компенсація надлишковості в блокових коректуючих кодах за рахунок таймерних сигналів / [М. В. Захарченко, В. Й. Кільдішев, С. В. Хомич, О. Г. Пришляк] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – Вип. 2. – С.178-185.