



Тихоокеанский  
Государственный  
Университет

# ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

## Передача данных

---



## Каналы связи

- После получения и предварительной обработки данных, они передаются потребителю по каналу связи (КС). В зависимости от того, какие именно сообщения будут передаваться, каналы связи делятся на непрерывные и дискретные.



## Каналы связи

- В непрерывном КС передатчик преобразует сообщения в непрерывный по структурному параметру сигнал с такими характеристиками, которые позволяют ему пройти по каналу связи. Приемник восстанавливает принятое сообщение в форме, удобной для получателя. В канале связи на сигнал действует некоторая помеха.



## Каналы связи

- Для системы с дискретным каналом передатчик формирует на своем выходе дискретный сигнал. Аппаратура, необходимая для передачи и приема дискретного сигнала часто называется *дискретным каналом связи*. Надо отметить, что в большинстве случаев дискретный канал включает в себя как составную часть непрерывный канал.

# Непрерывный канал связи

- Непрерывный канал работает с непрерывным (**аналоговым**) сигналом. Обычно непрерывный канал рассматривают как линейную систему и описывают импульсной или частотной характеристикой.
- Влияние которое оказывает канал связи на передаваемый сигнал:

$$S_y(if) = W(if)S_x(if),$$

где  $S_y$  – спектр сигнала на выходе из канала связи,  $S_x$  – спектр сигнала на входе канала,  $W()$  – спектральная характеристика канала связи.





# Непрерывный канал связи

- В результате влияния канала изменяется *спектр*, а, следовательно, и *форма* исходного сигнала. Но основная задача любой системы передачи - это передача входного сигнала без искажений.
- На практике считается, что сигнал передан неискаженным, если линейно изменяется его амплитуда и вносятся некоторые временные задержки, т.е. если выполняется равенство

$$y(t) = kx(t - t_0).$$



## Непрерывный канал связи

- Согласно теореме о спектрах, спектр выходного условно неискаженного сигнала примет следующий вид:

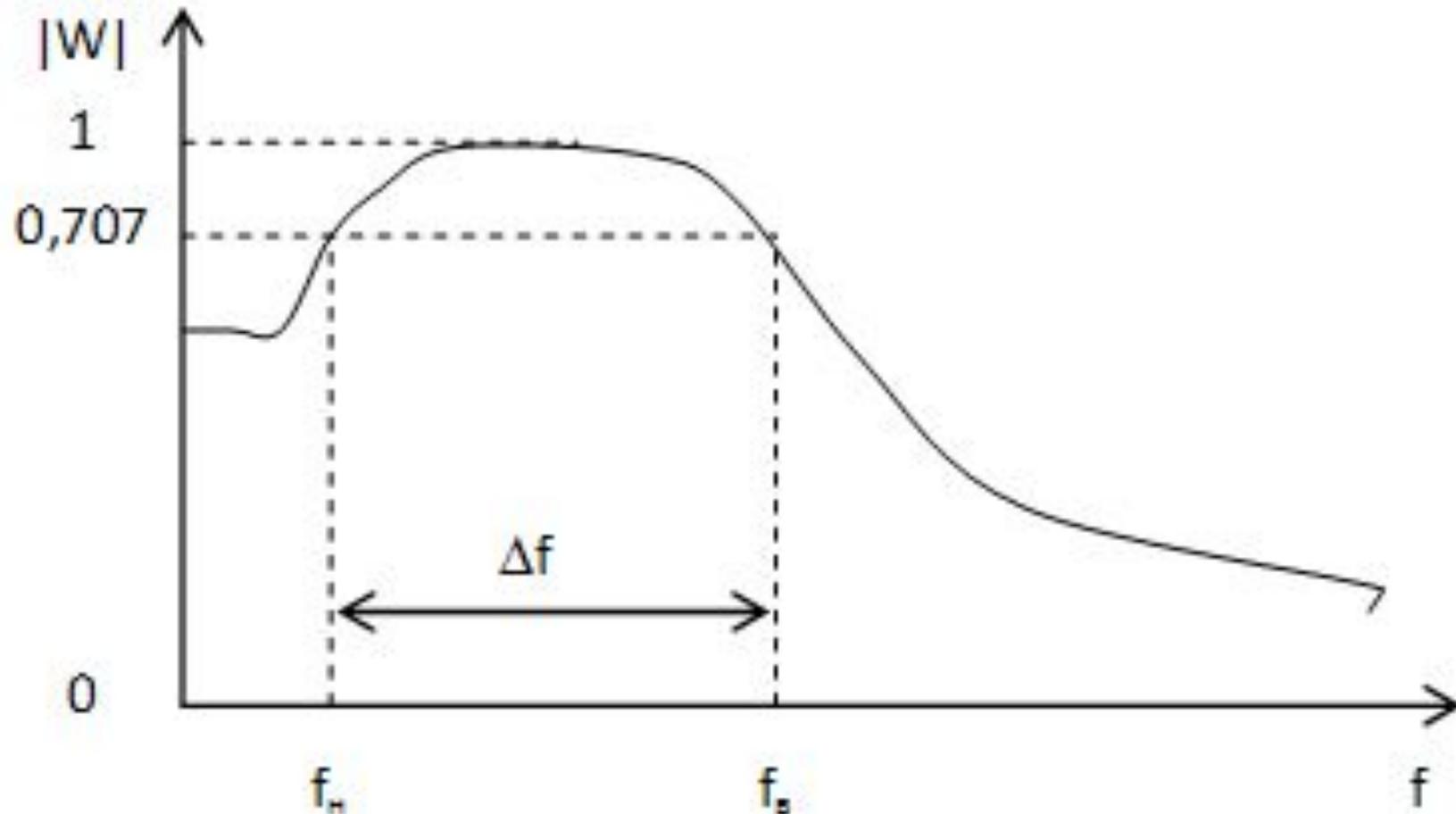
$$S_y(jf) = kS_x(jf)\exp(-i2\pi ft_0).$$

- Следовательно, сигнал будет передан без искажений, если спектральная характеристика канала связи будет следующего вида:

$$W(jf) = k\exp(-i2\pi ft_0).$$

- Т.е. АЧХ канала должна быть постоянной величиной  $|W(jf)| = k$ , а ФЧХ - линейной функцией частоты  $\Phi(jf) = -2\pi ft_0$ .

# Пример АЧХ реального канала связи



# Непрерывный канал связи

- Основной характеристикой реальных каналов связи является полоса пропускания, которую определяют как интервал частот, в пределах которого АЧХ не выходит за установленные пределы неравномерности.
- На практике полоса пропускания  $\Delta f$  определяют на уровне  $|W(jf)|_{\max} / \sqrt{2}$  или  $-3$ дБ.
- Значения  $f_{\text{Н}}$  и  $f_{\text{В}}$  являются соответственно нижней и верхней граничными частотами полосы пропускания



## Цифровой канал связи

- В основе ЦКС всегда лежит непрерывный КС.
- Наибольшее распространение получили дискретные сигналы с 2, 4, 8, 16 возможными значениями, которые называют также *состояниями*, *уровнями* или *символами*. Полный набор всех символов (2, 4, 8, 16) называют *алфавитом*.
- Дискретный сигнал с двумя возможными значениями (*бинарный* или *двоичный*) можно представить прямоугольными импульсами.



## Цифровой канал связи

- Возможные уровни бинарного сигнала обычно обозначаются 0 и 1. Естественно, что один символ бинарного кода переносит 1 бит информации. Сигнал меняет свое значение в заданные промежутки времени, что позволяет вычислить скорость передачи информации по бинарному каналу как  $1/\Delta t$ , где  $\Delta t$  – период между моментами изменения сигнала. Единица скорости, выраженная числом передаваемых символов в секунду называют «бод», в честь Ж. Бодо, изобретателя телеграфного кода.





## Цифровой канал связи

- Для бинарного кода скорость в бит/с совпадает со значением скорости в бодах, а для сигналов с большим числом для перевода в бит/с необходимо умножить скорость в бодах на логарифм по основанию 2 числа уровней сигнала. Таким образом, для повышения скорости передачи можно либо уменьшать  $\Delta t$ , либо использовать алфавит с большим числом СИМВОЛОВ.



## Цифровой канал связи

- Обычно, когда информацию нужно передать на небольшие расстояния, дискретные сигналы подаются в канал связи непосредственно, без преобразования. При этом надо учитывать, что бинарные сигналы имеют постоянную составляющую, что накладывает определенные ограничения на канал связи. Обычно, однополярными импульсами можно передавать информацию на расстояния до нескольких километров при скорости 50 – 300 бод.



## Цифровой канал связи

- Существуют каналы, подавляющие частотные составляющие вблизи нулевой частоты. Для таких каналов передача с помощью однополярного сигнала невозможна, поэтому исходный сигнал подвергается некоторому преобразованию. Другими словами, требуется модуляция входного сигнала. Этим занимается специальное устройство канала связи – модулятор, который обычно объединяется с демодулятором в одно устройство - *модем*.



## Цифровой канал связи

- Форма бинарного сигнала влияет на скорость передачи информации по каналу связи. Так как для неискаженной передачи сигнала канал связи должен обладать постоянством АЧХ и линейностью ФЧХ и полоса пропускания канала связи конечна, то к сигналу предъявляется важное требование:
- Спектр сигнала должен быть ограничен и находиться в пределах полосы пропускания канала.



## Цифровой канал связи

- При передаче сигналов используются сигналы конечной длительности, а из теории сигналов известно, что конечные во времени сигналы обладают неограниченным спектром. Отсюда следует, что задача неискаженной передачи импульсных сигналов по непрерывному каналу может быть решена только *приближенно*.



## Цифровой канал связи

- При выборе способа передачи информации в канале необходимо учитывать сложность генерации импульсов требуемой формы, методы модуляции и регистрации импульсов, характер и интенсивность помех в канале, а также необходимость обеспечения заданной верности передачи символов.
- Оптимальной формы импульса не существует. Часто на первое место ставится техническая простота реализации устройства, поэтому обычно используют прямоугольные импульсы.





## Избыточность сообщения

- Одна из характеристик сообщения. Все естественные языки обладают избыточностью, причем, что делает речь и текст более устойчивыми к различного рода помехам и искажениям. Как правило, если в предложении исказить одну-две буквы, то его смысл не потеряется. Уровень избыточности разных языков варьируется в широких пределах.



## Избыточность сообщения

- В орфографическом словаре русского языка насчитывается около 110 тысяч слов. Известно, что из алфавита объема  $m$  можно построить  $m^k$  слов длины  $k$ . Для русского языка имеем алфавит из 33 букв, тогда двухбуквенных слов можно получить 1089, трехбуквенных – 35937, а четырехбуквенных – 1 185 923.
- Тем не менее, слова часто многобуквенные, т.е. естественный язык уже на уровне отдельных слов обладает значительной избыточностью.



# Избыточность сообщения

- Избыточность позволяет повысить помехозащищенность, но за счет большего времени на передачу и увеличения объема памяти для хранения. Поэтому возникла задача сокращения избыточности, получившая название *эффективного кодирования*.
- Основная идея - для сокращения избыточности надо наиболее коротким кодовым комбинациям ставить в соответствие наиболее часто встречающиеся сообщения.



# Избыточность сообщения

- Числовая оценка избыточности:

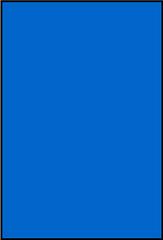
$$K_{\text{и}} = (n_{\text{ср}} - n_{\text{мин}}) / n_{\text{ср}},$$

где  $n_{\text{ср}}$  и  $n_{\text{мин}}$  - средняя и минимальная длины кодового слова.

- Под эффективным кодом понимается такой код, для которого коэффициент избыточности равен нулю, т.е.  $n_{\text{ср}} = n_{\text{мин}}$ . Для этого необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$n_i = -[\log p(x_i) / \log m], \text{ для всех } i = 1, \dots, r,$$

где  $n_i$  – длина  $i$ -го кодового слова,  $p(x_i)$  – вероятность появления сообщения  $x_i$ ,  $m$  – число элементов выходного алфавита.



## Избыточность сообщения

- К сожалению, величина  $n_i$  не для всех случаев становится целочисленной, следовательно, не для всякого набора сообщений можно построить эффективный код.
- В силу этого ограничения чаще всего в технике применяется *субоптимальное* кодирование, приближающееся к оптимальному настолько близко, насколько это возможно.

## Помехи в канале связи

- Передача информации по реальным каналам всегда происходит при наличии помех. В цифровых системах помеха проявляется в том, что вместо одного переданного символа принимается другой. Если в КС действует помеха с равномерным распределением, то между отношением сигнал/шум  $\rho$ , вероятностью ошибки одного символа  $p_{ош}$  и числом уровней квантования  $L_{кв}$  существует такая зависимость:

$$\rho^2 = L_{кв}^2 \frac{p_{ош}}{1 - 4p_{ош}} (L_{кв}^2 - 1)$$

$$p_{ош} \leq 1/4 \rho^2$$



## Помехи в канале связи

- Для помех с гауссовым законом:

$$\rho^2 = L_{кв}^2 / 3 [1 + p_{ош} (L_{кв}^2 - 1)]$$

$$p_{ош} \approx 1/12 \rho^2$$

- В зависимости от типа канала связи характер ошибок оказывается различным. Для решения практических задач, связанных с выбором методов повышения верности, необходимо знать закономерности появления ошибок.



# Модели каналов связи

- Математическая модель канала необходима для разработки методов повышения верности передачи сообщения. Для этого находят следующие основные характеристики потока ошибок:
- вероятность ошибки при приеме символа  $p_{\text{ош}}$ ;
- распределение вероятностей различных сочетаний ошибок в блоке длины  $n$ ;
- распределение вероятностей  $P_n(r)$ ;
- распределение длин интервалов между соседними ошибками и правильными элементами;
- распределение длин серий правильных элементов и ошибок.



## Модели каналов связи

- Модель должна быть простой и удобной для проведения расчетов и должна достаточно хорошо описывать реальный канал.
- Наиболее простая модель – модель **стационарного симметричного канала без памяти**, в котором ошибки возникают независимо друг от друга, а вероятность искажения любого символа одинакова и не изменяется во времени.
- Канал полностью описывается  $p_{\text{ош}}$ . Закон распределения ошибок – биномиальный.

# Модели каналов связи

- На практике считается, что наиболее вероятными являются одиночные ошибки ( $r = 1$ ) затем двойные и т.д. Тогда, зная вероятность ошибки, легко найти все необходимые характеристики. Так, вероятность правильного приема блока из  $n$  символов определяется как  $P_n(0) = (1 - p_{ou})^n$  Вероятность приема блока, содержащего хотя бы одну ошибку

- 
$$P_n(r \geq 1) = 1 - P_n(0) = 1 - (1 - p_{ou})^n$$

- Вероятность появления в блоке  $m$  и более ошибок

- 
$$P_n(r \geq m) = \sum_{r=m}^n C_n^r p_{ou}^r (1 - p_{ou})^{n-r}$$





## Модели каналов связи

- К каналам с независимыми ошибками относятся, например, космические каналы связи. Однако большинство существующих каналов имеют память, что выражается в группировании ошибок. Это происходит потому, что длительность возмущающих воздействий превышает длительность одного символа, т.е. повреждается сразу группа символов.
- Физические причины – это замирания в коротковолновых каналах, помехи от соседних станций, перерывы и импульсные помехи в проводных каналах, нарушение синхронизации из-за сильных помех и т.п.



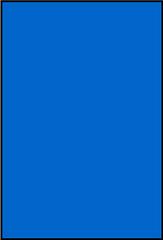
## Модели каналов связи

- Наиболее простой моделью дискретного канала с памятью является модель Гильберта. В этой модели канал может находиться в одном из двух состояний – хорошем, когда ошибки невозможны и плохом, когда возникают независимые ошибки с вероятностью  $p_1$ . Последовательность состояний канала  $\{d_i\}$  образуют простую цепь Маркова с матрицей переходных вероятностей

$$\|P_{d_{-1}d_0}\| = \left\| \begin{array}{cc} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{array} \right\|$$

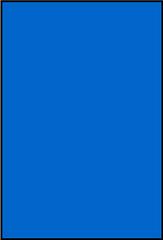
## Модели каналов связи

- Эта матрица полностью определяет статистику ошибок. Для отображения группирования ошибок в пакеты вероятности изменения состояний должны быть значительно меньше вероятностей их сохранения, т.е.  $P_{01} \ll P_{00}$ ,  $P_{10} \ll P_{11}$ , а вероятность ошибки в канале  $p_{ош} = p_1 P_{01} / (P_{01} + P_{10})$  должна быть меньше условной вероятности ошибки  $p_1$  в пакете, т.е. должно выполняться условие  $P_{01} < P_{10}$ . Для случая, когда  $P_{00} = P_{10}$  и  $P_{01} = P_{11}$ , получается канал без памяти.



## Модели каналов связи

- Модель Гильберта является только первичной моделью, т.к. учитывает группирование ошибок в пакеты, но не позволяет отобразить группирование самих пакетов и реальный характер распределения их длин. Поэтому такая модель применяется только для узкого класса каналов, например телефонных, либо используется для приближенных расчетов.



## Модели каналов связи

- На настоящий момент существует большое количество более сложных моделей, описывающий в той или иной степени свойства реальных каналов с памятью. Это усложненная модель Гильберта, допускающая появление ошибок в «хорошем» состоянии; модель Элиота-Гильберта, модель Элиота, модель Беннета-Фройлиха и др.