

## Ваши вопросы о кодировании

**1. Зачем в системах связи необходимо кодирование, если при этом на самом деле увеличивается вероятность ошибки при передаче, поскольку нужно пересылать за то же время ещё и проверочные символы кода?**

Правильно. Если для примера возьмём код с  $R=1/2$ , то энергия на передачу одного кодового символа будет на 3 дБ (вдвое) меньше, чем без кодирования, и вероятность ошибки на каждый двоичный символ заметно возрастет. Но, тем не менее, если используется код с достаточно большим кодовым расстоянием, например, с  $d=11$ , то результирующая вероятность ошибки после успешного декодирования может быть на несколько порядков меньшей, чем вероятность ошибки канала.

Численный пример: пусть исходная вероятность ошибки в каждом переданном бите без кодирования передаваемой последовательности равна  $p_1=0,01$ . Из-за кодирования при уменьшении символьной энергетики вдвое вероятность ошибки на символ в гауссовском канале будет уже  $p_0 \sim 0,05$ . Но поскольку нижняя достаточно точная оценки вероятности ошибки, например, после МПД или какого-то оптимального декодера (ОД) для этого кода имеет вид  $P_b(e) \sim 462p_0^{(d+1)/2}$ , то именно большой показатель степени при  $p_0$ , равный 6, обеспечивает малую итоговую вероятность ошибки декодера на бит  $P_b(e)$  порядка  $10^{-5}$ . Сравнивая исходную вероятность  $p_1=10^{-2}$  и результирующую -  $P_b(e) \sim 10^{-5}$  при одинаковой битовой энергетике сигнал и той же спектральной плотности мощности шума, видим, что кодирование оказалось весьма полезным, поскольку энергетический выигрыш кодирования для этих параметров кода будет более 5 дБ (~3 раза).

**2. Почему вообще следует применять коды? Ведь при их использовании расширяется спектр сигнала передачи или растёт время связи.**

Да, дополнительные символы надо как-то передавать тоже. Считается, что именно энергетика в большинстве случаев является решающим параметром, который нужно минимизировать. Хотя и расширение спектра желательно осуществлять по минимуму. Время обычно стараются в расчётах не менять по сравнению со случаем передачи без кодирования. Но именно экономия энергетики приносит очень большую экономическую выгоду, исчисляемую миллионами долларов. Результатом применения кодирования могут быть уменьшение размеров антенн, увеличение дальности или повышение скорости передачи, а также многие

другие достоинства кодов. Этим и определяется ценность кодирования для систем спутниковой связи.

### **3. Как написать хорошее Техническое задание на систему кодирования?**

Ниже мы предлагаем вашему вниманию достаточно типичный вариант рассматриваемого заказчиком и исполнителем списка параметров системы кодирования, которые они должны согласовать в процессе разработки ТЗ.

## **Перечень**

основных параметров кодов и декодеров  
при подготовке ТЗ на разработку системы кодирования

### **1. Основные параметры.**

- 1.1. Блочные/свёрточные коды.
- 1.2. Двоичные/недвоичные коды.
- 1.3. Длина кода  $n$  (число кодовых символов).
- 1.4. Задержка решения  $L$  (число кодовых символов).
- 1.5. Кодовая скорость  $R$  (избыточность).
- 1.6. Кодовое расстояние  $d$  (минимальное или свободное).
- 1.7. Энергетический выигрыш кодирования (ЭВК)  $G$ , дБ.
- 1.8. Выходная вероятность ошибки декодера  $P_b(e)$ , ( $\sim 10^{-5}$  или другая).
- 1.9. Система сигналов модуляции (двоичная, круговая ФМ, квадратурная (4x4) и т.д.
- 1.10. Формы контроля качества канала.

### **2. Дополнительные и взаимосвязанные с основными параметры кодирования.**

- 2.1.  $K$  - длина кодирующего регистра.
- 2.2.  $E_b/N_0$  - отношение битовой энергии канала к плотности мощности шума.
- 2.3.  $p_0$  - вероятность ошибки на входе декодера (на выходе канала).
- 2.4.  $E_s/N_0$  - отношение символьной энергии канала к плотности мощности шума.
- 2.5. Тип модема: жесткий/мягкий.
- 2.6. Применимость или необходимость каскадирования.

### **3. Технические характеристики системы связи.**

- 3.1. Задержка при передаче блока, (мсек).
- 3.2. Задержка решения декодирования, (мсек).
- 3.3. Виды и способы взаимодействия с системами синхронизации (ветвевая, символьная, блоковая, кадровая, .....).
- 3.4. Реализация: программная/аппаратная.
- 3.5. Общая характеристика канала.
- 3.6. Возможность распараллеливания функций в декодере.
- 3.7. Скорости обработки (декодирования) (Мбит/с).
- 3.8. Время разработки проекта.
- 3.9. Предмет исследования в процессе проведения разработки (неясные моменты проекта).
- 3.10. Сложность разработки (объём работ, сложность схемы, необходимое время, степень однородности, способы тестирования, виды и объёмы тестирования, необходимая инфраструктура для разработки, виды взаимодействия с модемом).
- 3.11. Наличие аппаратуры тестирования (имитатор цифрового шума и т.д.).

### **4. Оргвопросы.**

- 4.1. Порядок финансирования.
- 4.2. Возможные виды договоров.
- 4.3. Предмет договора (что именно сдаётся).
- 4.4. Обучение персонала.
- 4.5. Формы испытаний, порядок.
- 4.6. Этапность выполнения работ.
- 4.7. Ответственность сторон.
- 4.8. Охрана интеллектуальной собственности.
- 4.9. Содействие продолжению научных изысканий

\* \* \* \*

### **4. Как протестировать возможно большее число лучших из известных алгоритмов в процессе проектирования системы связи?**

Желательно постоянно работать в этой сложной и интересной области проектирования систем связи. Это позволит быть в курсе всех основных результатов в технике кодирования. Большинство лучших алгоритмов должно моделироваться и непрерывно сравниваться друг с

другом. Кроме того, нужно следить за публикуемыми обзорами в области кодирования.

Мы решили облегчить проектировщикам проблему выбора метода кодирования и создали имитатор цифрового спутникового канала связи, который содержит все основные наиболее эффективные методы кодирования.

Его описание есть на нашем веб-сайте.

В случае необходимости мы дополнительно включим в состав программного обеспечения имитатора и те, возможно, специальные методы кодирования/декодирования, которые необходимо рассмотреть именно в вашей организации.

Приобретая у нас такой компьютерный имитатор с лучшими современными алгоритмами кодирования, вы можете отслеживать и прогнозировать развитие техники кодирования на много лет вперёд.

В ближайшее время мы подготовим новую версию цифрового имитатора, которая будет позволять проверять работу аппаратных версий декодеров.

### **5. Почему нижние оценки вероятности ошибки декодирования МПД даже при относительно небольших значениях кодового расстояния оказываются очень маленькими? Это слабые оценки?**

Нет. Если характеристики алгоритмов декодирования соответствуют возможностям ОД или близки к ним, то, действительно, вероятности ошибки декодирования даже при кодовом расстоянии используемых кодов  $d \sim 7$  оказываются достаточно маленькими. Но характеристик ОД ещё надо достичь! МПД во многих случаях это умеет. А про другие алгоритмы этого утверждать нельзя. Здесь нужно всё аккуратно смотреть.

### **6. Почему оптимальные декодеры (ОД) обычно формируют решения с группирующимися ошибками? Если это эффект размножения ошибок декодирования, то можно ли от него избавиться? Другие декодеры тоже группируют ошибки? А как ведёт себя в этой ситуации МПД?**

Вопросов много, но они на самом деле об одной важной проблеме.

Оптимальные декодеры характеризуются тем, что они в той или иной форме реализуют полный перебор решений и затем выбирают лучшее из них. Но для них нужно выбирать и лучшие, плотно упакованные коды с максимально возможными значениями кодового расстояния  $d$ . А в таких кодах много кодовых слов веса  $d$ . Но тогда в таком коде всегда будут

слова минимального веса со многими единичками в информационных позициях. Это хорошо известная и давно проанализированная ситуация. В случае ОД с группированием ошибок мирятся, потому что сами ошибки происходят достаточно редко благодаря как раз большим значениям кодового расстояния  $d$  используемых для ОД кодов.

А вот если декодер неоптимальный, то группирование ошибок декодирования может быть ещё и свойством самого алгоритма декодирования. В этом случае можно говорить о размножении ошибок декодирования (РО). Таким образом, группирование ошибок всегда зависит и от алгоритма, и от вида используемого кода. Это и надо учитывать при выборе таких алгоритмов, особенно если они предназначаются к использованию в каскадных схемах кодирования.

В МПД можно сделать РО очень небольшим при правильном выборе кодов.

## **7. Почему кодирование требует очень больших задержек решений?**

На самом деле это не всегда так. Если требования к способности кода работать при очень большом уровне шума нет, то всегда можно найти алгоритмы с достаточно умеренной задержкой. А вот при работе вблизи пропускной способности канала  $C$  по Шеннону действительно необходимо применять только длинные коды. Иллюстрацией этого обязательного свойства являются графики для границы сферической упаковки, которые есть в наших презентациях на этом сайте и в русском, и в английском вариантах.

## **8. Различных каналов, в которых практически совсем нет ошибок, очень много. Зачем вообще применять кодирование, если можно просто увеличить энергию передачи?**

Если вы соединили два компьютера, стоящих на одном столе, кабелем и переписываете данные с одного диска на другой, то помех в кабеле обычно нет и применять коды нет необходимости.

А вот если в спутниковом канале у вас нет ошибок даже без применения кодов, то это только значит, что вы потратили очень большие средства на его создание и его пропускную способность  $C$  используете на 1% (1 процент) или даже меньше. Если ваша система коммерческая, то вы гарантированно разоритесь, потому что в других каналах такого же типа ваши конкуренты передают в сто (а может быть и в тысячу!) раз больше информации именно благодаря применению кодирования.

Заметьте, что бесспорной истиной при решении проблемы правильного проектирования системы связи в гауссовских (и многих других) каналах является исключительно парадоксальная (но только на первый

взгляд!) фраза: в правильно спроектированном спутниковом канале должна быть достаточно большая средняя вероятность ошибки на бит. Надеемся, вам понятно, что отсюда также следует, что в таком канале обязательно работает модем, содержащий очень эффективный декодер, на много десятичных порядков понижающий итоговую вероятность ошибки после обработки. Именно это гарантирует, что в такой системе связи будет выполняться фундаментальное соотношение  $R < C$  (кодовая скорость меньше пропускной способности канала), причём отношение  $C/R$ , в свою очередь не будет слишком большим. Вполне неплохим результатом можно считать, если окажется, что  $R \sim 0,8C$ . Однако для очень дорогих систем связи уже сейчас коэффициент использования канала (в приведённом примере - это как раз величина 0,8) при современном состоянии техники кодирования можно увеличить до 0,9 и даже до более высоких величин.

## 9. Приведите, пожалуйста, пример плохого понимания и использования методов кодирования.

Нам очень хотелось бы сказать, что таких случаев мы не знаем. Но, к сожалению, всё обстоит наоборот. Случаев отказа от кодирования под самыми фантастическими предлогами у нас очень много. Особенно жалко, когда применяют кодирование неправильно и тем самым дискредитируют исключительно важные и полезные методы и идеи.

Вот недавний пример очень печального свойства. Предполагалось в обычном двоичном канале с ФМ-2 использовать коды Рида-Соломона (РС) и ставилось условие достичь более высоких характеристик декодирования, чем в случае применения алгоритма Витерби (АВ). «Сильным» аргументом являлось то, что код РС с параметрами  $(n,k,d)=(64,32,33)$  имеет длину в битах, равную, очевидно,  $L=64*6=384$ . Понятно, что это гораздо больше, чем у стандартного кода для АВ с  $K=7$ . А поскольку при этом у АВ  $d=10$ , что тоже много меньше, чем у кода РС, то, в общем, опять надвигалась «революция» в технике кодирования. И в самом деле, специалисты уже давно освоили даже декодеры для кодов РС длины 256. А тут только 64. Так что - «у нас - никаких проблем»!

Но кончилось всё так. Если ориентироваться на двоичную передачу, то для приёма каждого символа кода РС нужно переслать 6 битов. АВ эффективно работает в гауссовском канале при  $R=1/2$  при вероятности ошибки на входе декодера  $p_0 \sim 0,05$ , уменьшая вероятность ошибки на бит на своём выходе до стандартных величин  $10^{-5}$ . Так вот все эти 6 битов (и сам  $q$ -ичный символ) будут приняты правильно с вероятностью только  $(1-p_0)^6 = (1-0,05)^6 \sim 1-6*0,05 \sim 0,7$ . Т.е. вероятность ошибки при передаче каждого символа кода РС из-за его плохого согласования с двоичным каналом близка к 0,3. А поскольку нужно передать 64 символа блока кода РС, то среднее число ошибок в блоке кода РС составит

$N=64*0,3\sim 19$ . Но этот код может исправлять только 16 ошибок в блоке. Где уж там обойти АВ! Все блоки кода РС будут при обычных алгоритмах декодирования кодов РС декодированы ошибочно. Да и при других алгоритмах в большинстве блоков тоже будут ошибки.

Вот такая "революция"... .

Кстати, оказалось, что некоторые из подобных «специалистов» имеют ещё и аспирантов именно по тематике кодирования. Так что будьте предельно внимательны, когда вам предлагают эти и подобные им «чудеса». Кстати, от этого "проекта" не отказались. Не нашли, кого надо наказать за полное отсутствие понятно чего. А хорошо сдать такую "работу" не очень сложно. Ведь всем хорошо понятно, кто будет всё это (опять же!) принимать.

**А поэтому приходите учиться к нам.**

**И создание простых эффективных декодеров для недвоичных кодов - это тоже у нас.**

*Следующую группу вопросов о кодировании от вас мы рассмотрим примерно через месяц*