

## ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ЗАДАЧА ВЫБОРА РЕЧЕВОГО И КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ

Бабкин В.В., Ланнэ А.А., Шаптала В.С.

Центр Цифровой Обработки Сигналов, Санкт-Петербургский Государственный Университет  
Телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, <http://www.dsp.sut.ru>  
193382, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д.22 корп. 1, тел. (812)589-82-43  
[vb@dsp-sut.spb.ru](mailto:vb@dsp-sut.spb.ru), [arturlan@robotek.ru](mailto:arturlan@robotek.ru), [wasiliy@dsp-sut.spb.ru](mailto:wasiliy@dsp-sut.spb.ru)

### 1. Введение

При проектировании систем цифровой речевой связи всегда возникает задача рационального выбора способов речевого и помехоустойчивого канального кодирования и распределения между ними ресурсов выделенного дискретного канала в первом приближении характеризуемого скоростью и процентом битовых ошибок. Особенно нас интересуют низкоскоростные (до 10 кбит/с) дискретные каналы связи с высоким уровнем ошибок, достигающим до 10%, характерные для систем КВ и УКВ связи. Для успешного решения данной и других подобных задач необходима определенная стратегия, изложенная в данной статье. Сначала формулируются задачи оптимизации в общем виде, далее проводятся возможные аналитические оценки, сужающие область поиска решения, и приводятся практические аспекты поиска квазиоптимального решения методом проб.

### 2. Постановка оптимизационной задачи

Типичная цепочка преобразований сигнала в цифровой системе связи приведена на рис. 1.



Рис. 1. Модель рассматриваемой цифровой системы связи.

Использованы следующие обозначения: IN – исходный цифровой сигнал источника информации, например, речевой сигнал, видеосигнал и т.п., SC – устройство кодирования источника, понижающее избыточность сигнала, например, вокодер, видеокодер и т. д., CC – канальный помехоустойчивый кодер, DC – дискретный канал связи с ошибками, CD – канальный помехоустойчивый декодер, SD – устройство декодирования источника, синтезирующее сигнал, OUT – выходной сигнал системы связи. Для простоты рассмотрим ситуацию наличия ошибок без группирования, что соответствует двоичному симметричному каналу без памяти (ДСКБП), полностью описываемому вероятностью битовой ошибки (BER – Bit Error Rate)  $P$ .

Рассмотрим ситуацию обработки входного сигнала по кадрам длительностью  $T$  типичную при параметрическом способе кодирования источника, когда битовый поток с выхода SC, разбитый на информационные пакеты длиной  $K$  бит, поступает со скоростью  $W_{sc} = K / T$  на вход помехоустойчивого канального кодера. Допустим, что  $K$  бит в кадре можно разделить на  $M$  групп  $K = \sum_{m=0}^{M-1} k_m$ , где  $k_0, k_1, \dots, k_{M-1}$  – количество бит в каждой группе, по степени влияния присутствующих в них ошибок на некоторый количественный интегральный показатель качества выходного сигнала  $q$ . Если получателем является человек, то этот показатель качества должен выбираться на основе свойств восприятия человеком информации данного вида. Если выходным сигналом является звук, то критерий качества должен учитывать психоакустические свойства слуха человека. Если выходным сигналом является речь, то должны учитываться специфические показатели качества, такие как разборчивость, узнаваемость и т.п. При передаче изображений должны учитываться свойства зрения и восприятия человеком изображений и т.д. Искажения (ошибки в битах) внутри каждой группы в равной степени ухудшают качество выходного сигнала  $q$ , а ошибки из различных групп влияют на качество сигнала  $q$  в разной степени. Таким образом, качество работы системы кодирования источника имеет различную чувствительность к битовым ошибкам, возникающим в различных группах передаваемого информационного пакета. Пусть количественный показатель интегрального качества сигнала на выходе устройства декодирования источника  $q$  определяется какой функцией качества как:

$$q = Q(M, k_0, k_1, \dots, k_{M-1}, p_0, p_1, \dots, p_{M-1}) = Q(M, \vec{k}, \vec{p}), \quad (1)$$

где  $p_m$  – вероятность битовой ошибки в группе с номером  $m$  на входе устройства декодирования источника.

В помехоустойчивом канальном кодере биты в каждой группе могут кодироваться с различной избыточностью, характеризуемой степенью кодирования  $r_0, r_1, \dots, r_{M-1}, r_m = k_m/n_m$ , где  $n_m$  – количество бит на выходе кодера с номером  $m$ , и с использованием помехоустойчивого кодирования различного типа, обозначаемого  $a_m$ , например, блочным кодом, сверточным и т. д. Следовательно, вероятность битовой ошибки в группе с номером  $m$  на выходе помехоустойчивого декодера можно определить как функцию:  $p_m = f(a_m, r_m, P)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M-1$  или для  $M$  групп можно записать в векторном виде:

$$\vec{p} = f(\vec{a}, \vec{r}, P) \quad (2)$$

где  $P$  – вероятность битовой ошибки в дискретном канале связи. Общая скорость битового потока на выходе помехоустойчивого кодера в дискретном канале равна:

$$W_{cc} = \frac{1}{T} \sum_{m=0}^{M-1} n_m = W(M, \vec{k}, \vec{a}, \vec{r}) \quad (3)$$

На основании этих данных можно сформулировать две оптимизационные задачи, связанные друг с другом:

Задача 1. Определить максимально достижимое качество  $q$  при заданных  $P \leq P_0$  и  $W_{cc} \leq W_0$ , где предельные значения  $P_0$  и  $W_0$  определяются каналом связи:

$$\begin{cases} q = \max_{M, \vec{k}, \vec{a}, \vec{r}} Q(M, \vec{k}, \vec{a}, \vec{r}) \\ W_{cc} \leq W_0 \\ P \leq P_0 \end{cases} \quad (4)$$

Задача 2. Определить минимально допустимую скорость в канале  $W$  при заданных  $P \leq P_0$  и  $q \geq q_0$ , где предельные значения  $P_0$  и  $q_0$  определяются каналом связи и требованиями к минимальному качеству системы связи:

$$\begin{cases} W_{cc} = \min_{M, \vec{k}, \vec{a}, \vec{r}} W(M, \vec{k}, \vec{a}, \vec{r}) \\ q \geq q_0 \\ P \leq P_0 \end{cases} \quad (5)$$

В действительности, при проектировании реальных систем связи условия задач могут быть расширены, если рассматривать не только различные способы помехоустойчивого канального кодирования, но и различные способы кодирования источника сигнала, которые отличаются друг от друга выходными скоростями  $W_{sc} \leq W_{cc}$  и зависимостями интегрального качества сигнала на выходе  $Q(M, \vec{k}, \vec{p})$  от вероятности ошибок в битах передаваемых параметров.

### 3. Аналитические оценки

В некоторых случаях возможно проведение предварительных аналитических оценок области возможных решений указанных задач.

Например, если рассматривать поведение линейных блочных кодов  $(n, k)$  в ДСКБП с вероятностью битовой ошибки  $P$ , тогда оценка вероятности битовой ошибки в блоке из  $k$  бит на выходе декодера приближенно определяется выражением [1, (6.46)]:

$$p \approx \frac{1}{n} \sum_{j=t+1}^n C_n^j P^j (1-P)^{n-j}, \quad (6)$$

где  $C_n^j = \frac{n!}{(n-j)! j!}$  – биномиальный коэффициент, определяющий число возможных различных

комбинаций из  $j$  ошибочных бит в блоке из  $n$  бит;  $t$  – максимально число гарантированно исправляемых ошибок на кодовое слово. В свою очередь  $t$  связано с минимальным расстоянием между  $n$ -мерными кодовыми словами в метрике Хэмминга  $d_{min}$ :

$$t = \left\lceil \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rceil \quad (7)$$

Минимальное кодовое расстояние  $d_{\min}$  характеризует способность блочного кода  $(n, k)$  к исправлению ошибок и зависит от свойств конкретно выбранного кода. Потенциально возможные значения  $d_{\min}$  для блочных кодов  $(n, k)$  можно приблизительно узнать, используя различные оценки. Например, оценка  $d_{\min}$  с использованием границы Плоткина [1, (6.54)] имеет вид:

$$d_{\min} \leq n \frac{2^{k-1}}{2^k - 1}. \quad (8)$$

Другая оценка строится с использованием границы сферической упаковки Хемминга [2]:

$$2^{n-k} \geq \sum_{i=0}^t C_n^i. \quad (9)$$

Граница Хемминга обычно близка к оптимальной для высокоскоростных кодов, а граница Плоткина – для низкоскоростных. Таким образом, зная свойства канальных кодов можно грубо оценить область поиска решения задач оптимизации.

#### 4. Практические аспекты поиска решения задачи

Рассмотрим практический аспект поиска квазиоптимального решения задачи номер 1 на примере построения системы речевой связи. Пусть задан ДСКБП с максимальной битовой ошибкой  $P=10^{-1}$  (10%), в котором скорость  $W_0$ , например 4800 бит/с, полностью отдана информационному потоку, описывающему речевой сигнал, а задачи поддержания протокола обмена, синхронизации информационных пакетов и т. п. решаются процедурами верхнего уровня за пределами этой скорости и здесь не рассматриваются.

Проектирование системы, состоящей из речевого и помехоустойчивого канального кодирования, складывается из следующих шагов:

- \* Отбор вокодеров-кандидатов со скоростью цифрового потока  $W_{sc}$  не превышающем  $W_0$ . Например, имеет смысл рассмотреть вокодеры со скоростями из ряда 1200, 2400 и 4800 бит/с или разработать вокодер с произвольным значением скорости.

- \* Выбор показателя качества  $Q$  для оценки качества синтетической речи на выходе вокодера и метода его расчета. Таким показателем качества могут быть оценки, полученные с привлечением экспертов: индекс DRT (Diagnostic Rhyme Test), разборчивость речи на выходе вокодера по результатам артикуляционных измерений, показатель MOS (Mean Opinion Score), сравнительные относительные оценки. Особенно привлекательны оценки качества, получаемые автоматическим способом, например, по рекомендации ITU-T P.862.

- \* Проведение для каждого вокодера экспериментального исследования чувствительности качества синтетической речи на выходе декодера к ошибкам отдельных бит в информационном пакете (длины  $K$ ) на выходе вокодера. Данная задача облегчается тем, что эти биты представляют квантованные параметры вокодера, число которых существенно меньше  $K$ . Таким образом, вначале решается задача определения чувствительности качества синтетической речи на выходе к ошибкам в принятых параметрах вокодера.

- \* Пробное группирование бит в информационном пакете по признаку чувствительности к ошибкам на основе оценок, полученных выше.

- \* Пробное разделение избытка скорости  $W_0 - W_{sc}$  между группами и выбор типа помехоустойчивого кодирования для каждой группы.

- \* Проведение оценки качества синтетической речи на выходе всей системы при отсутствии ошибок в канале и при наличии максимальной битовой ошибки в канале  $P$ .

- \* Оценка достигнутого качества речи. Сравнение результатов для всех вокодеров и схем канального кодирования по критерию максимального качества при наличии максимальной ошибки и выбор наилучшего решения.

На основании изложенного метода в Центре ЦОС СПб ГУТ разработано несколько вариантов помехоустойчивых вокодеров, объединяющих в себе схемы речевого и канального кодирования, со скоростями в канале связи 2400, 4400, 4800 и 7200 бит/с [4]. Например, помехоустойчивый вокодер на скорость 7200 бит/с превосходит по качеству речи в канале без ошибок стандартную комбинацию вокодер+помехоустойчивый кодер системы связи TETRA [3] с аналогичной скоро-

стью в канале, и значительно лучше ее по помехозащищенности при большом количестве ошибок. Вокодеры реализованы для работы в реальном масштабе времени на цифровых процессорах обработки сигналов (ЦПОС) фирмы Texas Instruments семейств TMS320VC54XX/C55XX. Например, реализация на скорость 4400 бит/с на c55x требует 45 кбайт памяти на кристалле и производительности 30 MIPS для кодера и 15 MIPS для декодера.

## 5. Обсуждение результатов

С интуитивной точки зрения цель совместной оптимизации выбора речевого и канального кодирования можно сформулировать как задачу выравнивания чувствительности качества синтетической речи к битовым ошибкам, возникающим в различных позициях в пакете данных, передаваемом в канале связи.

В силу постановки задачи, мы намеренно старались не затрагивать вопросов, касающихся синхронизации в дискретном канале с ошибками, рационального выбора способов модуляции в каналообразующей аппаратуре, способов совместного речевого и канального кодирования и др., которые, безусловно, также являются одними из важнейших при проектировании систем связи и наряду с рассмотренными вопросами определяют помехоустойчивость системы связи в целом.

Имеет ли смысл рассматривать дискретные каналы со столь высоким (до 10%) уровнем ошибок? Следует понимать, что в реальной системе дискретный канал образуется с использованием модема с определенным типом модуляции, для которого идеальная зависимость коэффициента битовой ошибки  $P(E_b/N_0)$  от отношения энергии бита  $E_b$  к спектральной плотности  $N_0$  гауссовского белого шума в физическом канале связи носит, как правило, «водопадообразный» характер [1]. Таким образом, снижение битовой ошибки в дискретном канале с  $10^{-1}$  до уровней  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  требует улучшения отношения сигнал/шум (ОСШ) в физическом канале на величину  $\delta$  дБ, определяемую типом модуляции. Поэтому, работая в канале с 10% ошибок, мы имеем выигрыш по мощности или по типу модуляции, так как использование более простых типов модуляции позволяет реализовать менее сложные приемники. Однако, этот результат достигается ценой снижения потенциального качества речи в канале без ошибок из-за использования вокодера с меньшей скоростью и, следовательно, с худшим качеством.

Насколько оправдан подобный компромисс? Ответ нам кажется лежит в вопросе, что лучше, гарантированное удовлетворительное качество речи или хорошее качество речи в канале без ошибок и отсутствие связи в те моменты, когда число ошибок в дискретном канале приближается к граничному значению. В этой ситуации, наиболее гибким компромиссным решением, обеспечивающим максимальное качество речи в канале без ошибок и удовлетворительное качество речи в канале с ошибками, является использование переключения различных схем «вокодер+канальное кодирование», когда в зависимости от качества канала ресурс скорости делится между вокодером и канальным кодером в различной пропорции. Так, например, фирма Natis в цифровых КВ радиостанциях планирует использовать вокодеры MELP 2400 и 600 бит/с [5]. Для удовлетворительной работы вокодера 2400 бит/с при использовании модуляции MIL-STD-188-110B на скорость 2400 бит/с в стандартном КВ канале шириной 3 кГц требуется ОСШ от +8 до +16 дБ в зависимости от условия распространения радиоволн. Возможность в сложной помеховой обстановке переходить к вокодеру MELP 600 бит/с и к модуляции MIL-STD-188-110B на скорость 600 бит/с, имеющей выигрыш в КВ канале по ОСШ на 7 дБ, позволяет обеспечить работоспособность системы связи в каналах с низким ОСШ.

## 6. Литература

1. Б. Складар. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд.: Пер. с англ.— М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.—1104 с.: ил.
2. Кларк Дж., мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ.— М.: Радио и связь, 1987.—392 с.: ил. — (Стат. Теория связи).
3. European Telecommunication Standard ETS 300 395-2. Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Speech codec for full-rate traffic channel; Part 2: TETRA codec. 2-nd ed., Feb. 1998.
4. Центр ЦОС СПб ГУТ: <http://www.dsp.sut.ru/dspc/win-1251/products/products.html>, <http://www.dsp-sut.spb.ru/dspc/win-1251/products/rvoc7200/rvoc7200.html>.
5. Chamberlain, M.W. A 600 bps MELP vocoder for use on HF channels. IEEE MILCOM 2001.