

УДК 621. 395

АДАПТАЦИЯ КОДЕКА CELP К ВОЗДЕЙСТВИЮ АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ

В. Т. Дмитриев, к.т.н., доцент кафедры РУС РГПТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

Разработан и исследован адаптивный к акустическим помехам алгоритм кодирования речевых сигналов на основе кодека CELP для теоремы В.А. Котельникова и представления Хургина – Яковлева. Цель работы: разработка и исследование алгоритма адаптации кодека CELP к воздействию акустических помех. Это достигается путем выбора отдельных совокупностей параметров кодека CELP, обеспечивающих при воздействии различных видов акустических помех более высокое качество РС на выходе кодека.

Ключевые слова: речевой сигнал, акустическая помеха, адаптивный кодек, CELP, первичное кодирование, качество речи.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-25-34

Введение

В современных научных исследованиях передаче речевой информации в телекоммуникационных сетях уделяется большое внимание. Это обусловлено наличием существенной избыточности в речевом сигнале (РС), которую сложно выделить и удалить при первичном кодировании без существенного снижения качества РС на приемной стороне.

В известных работах [1-4] показано, что на качество РС на выходе различных первичных кодеков существенно влияют акустические помехи (АП). Величина такого влияния обусловлена видом АП, отношением сигнал-шум, параметрами первичного кодека, а также самим алгоритмом первичного кодирования. Наибольшее распространение в последние годы получили исследования в области низкоскоростных и среднескоростных алгоритмов кодирования РС. Благодаря использованию данных алгоритмов кодирования можно существенно снизить объем передаваемой информации по каналу связи, что приводит к экономическим выгодам как для предприятий связи, так и для абонентов при сохранении хорошего качества РС на приемной стороне. В современных телекоммуникационных сетях и системах связи наиболее распространенными можно считать следующие основные алгоритмы первичного кодирования РС: АДИКМ (адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция) и его различные модификации, LPC (Linear Predictive Coding, рус. линейное прогнозирующее кодирование) и алгоритм CELP (Code Excited Linear Prediction, рус. линейное предсказание с мультикодовым управлением).

Анализ известных кодеков РС в классе адаптивных систем позволяет сформулировать ряд основных тенденций [1].

1. Многие известные современные низкоскоростные кодеки основаны на алгоритме линейного предсказания РС.
2. В последние годы широко применяются адаптивные процедуры обработки и кодирования сигналов.
3. Наблюдается прямая зависимость качества восстановленного РС от степени адаптации соответствующих кодеков РС.

На основании анализа вышеперечисленных тенденций наиболее перспективной платформой для разработки современных адаптивных низкоскоростных и среднескоростных алгоритмов первичного кодирования РС является кодек CELP. Данный алгоритм обладает возможностями снижения скорости передачи за счет изменения разрядности, частоты анализа и

объема передаваемых параметров, использует линейный предсказатель и процедуру векторного квантования, обеспечивает устойчивость к искажениям в канале связи, а также удовлетворительное качество при низких скоростях передачи.

В современных телекоммуникационных системах главной задачей является определение оптимального баланса между качеством сигнала и скоростью передачи при действии различных мешающих факторов. С этой целью во многих современных системах связи зачастую используются различные процедуры адаптации, которые обеспечивают повышение качества восстановленного РС. На практике происходит разбиение общей задачи адаптации на более мелкие подзадачи. В известной литературе выделяют следующие направления адаптации первичных кодеков РС [1-8].

1. Адаптация кодеков к различным АП, позволяющая улучшить качество восстановленного РС на выходе первичного кодека и обеспечивающая возможность уменьшить искажение АП качества восстановленного РС выбором алгоритма первичного кодирования или его параметров.

2. Адаптация параметров кадра РС на выходе первичного кодека, обеспечивающая возможность перераспределить параметры первичного кодека РС.

3. Адаптация параметров кодека к источнику РС, обеспечивающая сокращение априорной неопределенности РС.

4. Адаптация к сети, учитывающая скорость передачи РС в первичном кодеке при различных условиях передачи сигнала в сетях связи.

5. Адаптация к различным искажениям в каналах связи обеспечивает возможность кодека восстановить искаженный РС.

Таким образом, цель данной работы – решение задачи адаптации кодека CELP к АП за счет выбора отдельных параметров первичного кодека.

Теоретическая часть

В данной работе основой для разработки адаптивного кодека является алгоритм CELP, который осуществляет кодирование РС методом анализа через синтез [5]. При этом декодируемый сигнал оптимизируется в замкнутом цикле, что позволяет улучшить качество восстановленного РС по сравнению с известными алгоритмами. В CELP обеспечивается хорошая устойчивость к ошибкам в каналах связи. Наилучший результат исходный кодек обеспечивает при скорости передачи 14-16 кбит/с [8]. Принцип работы кодера CELP состоит в последовательности данных операций [5-8].

1. Происходит разделение РС на кадры и субкадры. В основном в кадре содержится четыре субкадра. Длина кадра может меняться от 10 до 30 мс, а длина субкадра – от 5 до 7,5 мс.

2. Для получения коэффициента линейного предсказания (LPC) для каждого кадра осуществляется краткосрочный анализ исходного сигнала, а после для каждого субкадра осуществляется долгосрочный анализ ошибки предсказания. После выполнения этих операций становятся известны коэффициенты фильтра синтеза основного тона, фильтра синтеза форманта и перцепционного взвешивающего фильтра.

3. Для каждого субкадра осуществляется поиск соответствия в кодовой книге. Следует отметить, что длина кодового вектора возбуждения равна длине субкадра. После чего осуществляется создание отфильтрованных последовательностей возбуждения с соответствующим усилением. Вычисляется сумма квадратичных ошибок для всех последовательностей и кодовых векторов, после чего определяется та последовательность, у которой ошибка минимальная, и для нее берется коэффициент усиления.

4. После определения всех необходимых параметров: коэффициента усиления, коэффициента линейного предсказания, параметров линейного предсказания и индекса кодовой книги они кодируются и отправляются по каналу связи в виде битового потока.

В процессе обработки алгоритм CELP использует минимизацию ошибок на взвешенной области, в то время как многие другие алгоритмы осуществляют минимизацию квадратичной

ошибки. Это происходит из-за того, что при кодировании звуковых сигналов искажения кодируются на таких частотах, которые не восприимчивы человеком [8]. Благодаря своим отличительным особенностям алгоритм CELP нашел широкое распространение в сетях связи. Для обеспечения более высокого качества восстановленного РС, а также для более гибкой адаптации параметров первичного кодера РС предложено при построении первичного кодера использовать алгоритм Хургина – Яковлева [9].

На рисунке 1 показана структурная схема алгоритма передачи РС на основе представления Хургина – Яковлева при двухканальной обработке ($N = 2$) при использовании разложения РС на прореженные в два раза отсчеты сигнала и его производной. Показано [10], что применение данного представления в телекоммуникационных системах обеспечит возможность параллельной обработки и кодирования отсчетов сигнала и его производной, а также более простую реализацию синтезирующих фильтров сигнала и производной. В результате экспериментальных исследований [10, 11] показано, что применение алгоритма Хургина – Яковлева в системах обработки и первичного кодирования РС обеспечивает выигрыш в качестве восстановленного РС на выходе на 0,2-0,7 баллов согласно ГОСТ Р 50840-95 по сравнению с аналогичными кодерами на основе теоремы В.А. Котельникова [11].

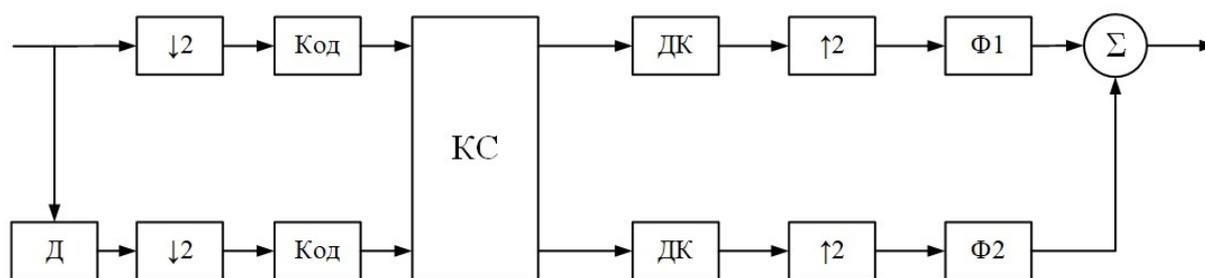


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма передачи РС на основе представления Хургина – Яковлева
Figure 1 – Block diagram of primary coding algorithm of SS based on of Khurgin – Yakovlev representation

Как видно из приведенной структурной схемы алгоритма передачи РС на основе представления Хургина – Яковлева, отсчеты исходного РС попадают на дифференциатор (Д), где согласно представленному в [9] алгоритму, получают оценку отсчетов производной сигнала. Затем отсчеты сигнала и производной поступают на двукратные дециматоры ($\downarrow 2$), где происходит отброс каждого второго отсчета, согласно представлению Хургина – Яковлева при $N=2$. После этого прореженные отсчеты поступают на вход первичного кодера (Код) РС.

В качестве первичного кодера в данной работе рассмотрен алгоритм CELP, который совместно с основными своими модификациями применяется в наиболее распространенных стандартах связи (например, ACELP – TETRA, RPELP – TETRAPOL, VSELP – iDEN/MIRS). Данный кодек обладает наибольшей помехоустойчивостью к помехам в канале связи и может быть использован в современных системах как проводной, так и беспроводной связи. Закодированные отсчеты сигнала и производной попадают в передатчик и канал связи (КС). На рисунке 1 не показаны ни передатчик, ни приемник, так как анализ их параметров не входит в рамки данной работы.

На приемной стороне перед первичным декодером происходит выделение отсчетов сигнала и его производной, а также их отдельное декодирование в декодере (ДК). Затем осуществляется интерполяция отброшенных на передающей части отсчетов нулями в интерполяторе ($\uparrow 2$). Полученные отсчеты с выхода интерполяторов поступают на фильтры сигнала $\Phi 1$ и производной $\Phi 2$, а затем на сумматор (Σ), где происходит восстановление РС. Согласно представлению Хургина – Яковлева при двухканальной обработке $N = 2$ возможно точное восстановление сигнала в полосе частот $(0, F)$. Рассмотрим возможные схемы адаптации ко-

дека к воздействию АП алгоритма кодирования CELP для теоремы В.А. Котельникова и представления Хургина – Яковлева.

Описание эксперимента

В данной работе осуществляются разработка и исследование алгоритма адаптации к акустической обстановке кодеков CELP на основе теоремы В.А. Котельникова и представления Хургина – Яковлева при влиянии различных АП на РС. На рисунке 2 предложены две структурные схемы алгоритма адаптации кодера CELP к АП, реализованных на основе теоремы В.А. Котельникова (а) и представления Хургина – Яковлева (б) [9, 10].

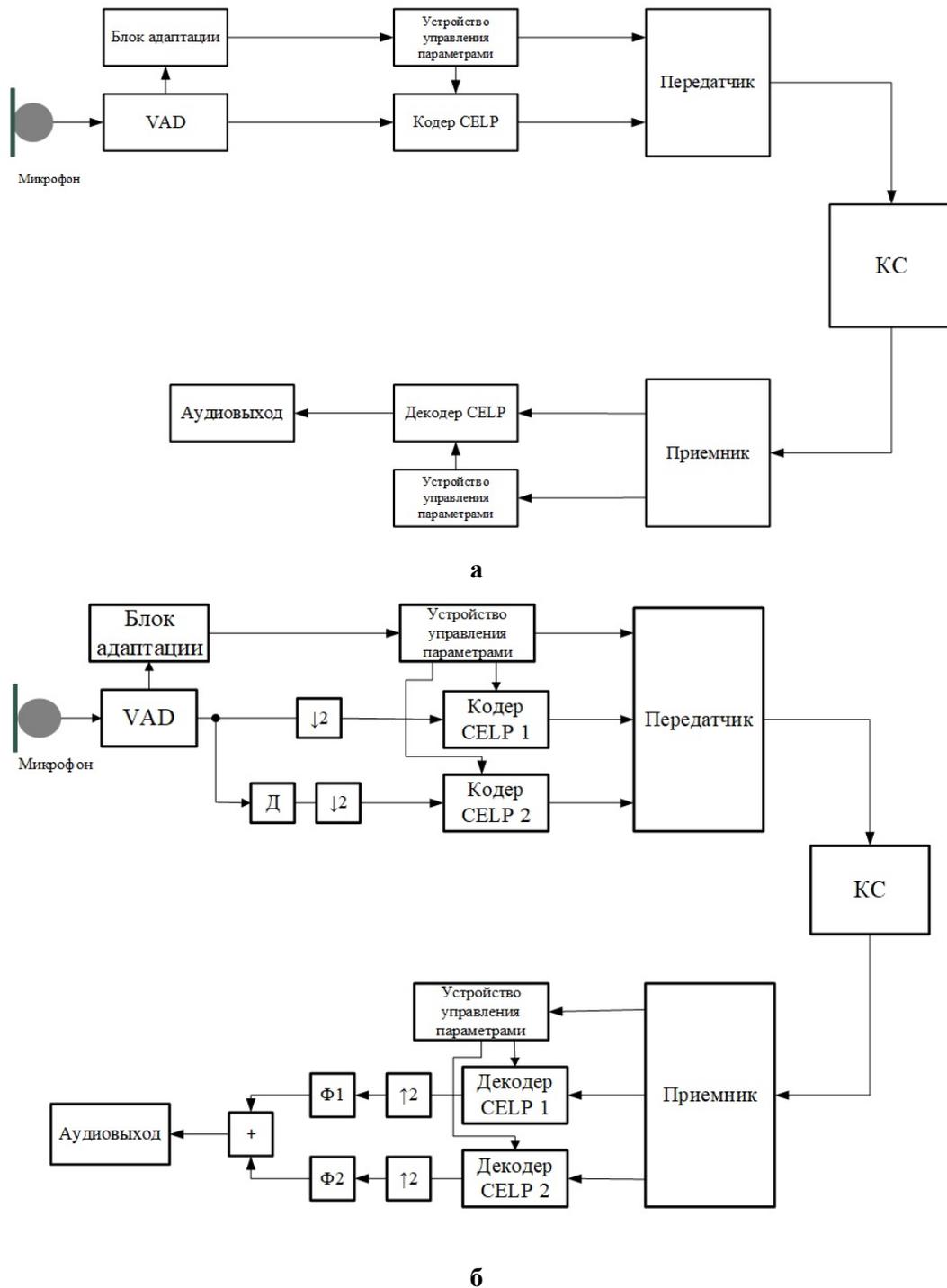


Рисунок 2 – Схемы адаптации кодера CELP
Figure 2 – CELP codec adaptation schemes

На рисунке 2, *a* приведена схема адаптации кодека CELP при использовании представления РС согласно теореме В.А. Котельникова за счет выбора совокупности параметров кодека CELP, обеспечивающих наилучшее качество восстановленного РС на выходе декодера. РС поступает на вход блока определения речевой активности (VAD). Данный блок обнаруживает паузы в РС, которые затем используются в блоке адаптации для определения основных видов АП в паузе РС (широкополосные АП, узкополосные АП, импульсные АП).

Определение первых двух видов АП происходит в частотной области, методом сравнения спектра АП с полосой канала связи. Определение импульсного АП происходит во временной области путем сравнения отсчетов амплитуды АП в паузе с определенным адаптивным порогом. В устройстве определения параметров происходит выбор заранее определенных параметров кодека CELP, обеспечивающих наилучшее качество восстановленного РС на приемной стороне.

Как видно из схемы, представленной на рисунке 2, *б*, при использовании представления Хургина – Яковлева отсчеты сигнала и его производной поступают на отдельные кодеки CELP, параметры которых выбираются в устройстве управления на основе информации из блока адаптации, в котором происходит анализ пауз РС выделенных в блоке VAD. Выбор данных параметров производится на основании условия наилучшего качества восстановленного РС на выходе первичного кодека. Анализ производится для каждого блока отсчетов, но настройку параметров кодека целесообразно осуществлять после изменения вида АП или уровня АП на протяжении интервала более 32 мс, так как при этом нивелируется эффект принятия случайных решений [4].

Как показано в результате экспериментальных исследований, отсчеты производной менее информативны. Поэтому параметры производной могут быть закодированы с меньшей разрядностью квантователя. Затем кодированные параметры сигнала и его производной передаются по каналу связи. Также передаются значения параметров кодера в случае принятия решения о замене предыдущих значений параметров.

В приемнике отсчеты сигнала и его производной с выхода демодулятора и помехоустойчивого декодера поступают на первичный декодер, параметры которого согласованы с параметрами кодера. После декодирования отсчеты поступают на восстанавливающую схему Хургина – Яковлева, которая состоит из двух синтезирующих фильтров $\Phi 1$ и $\Phi 2$, а также сумматора, с выхода которого восстановленный РС поступает на аудиовыход.

Результаты экспериментальных исследований

В процессе проведения экспериментальных исследований получены зависимости качества РС на выходе от параметров кодека алгоритма CELP на основе теоремы В.А. Котельникова и Хургина – Яковлева. Для оценки качества речи использовались акустические взвешенные фразы, согласно ГОСТ Р 50840-95 [13]. Оценка качества РС на выходе декодера проводилась с использованием программной реализации кодека CELP, написанного в программной среде MatLab.

Для оценки качества восстановленного РС использовался набор акустически взвешенных фраз, приведенных в ГОСТ Р 50840-95 [13]. Речевая информация была начитана десятью дикторами (4 женщины и 6 мужчин). На частоте дискретизации 8 кГц сформированы смеси РС и различных видов АП при отношении сигнал-шум $Q = 15$ дБ, а также РС без шума при изменяющихся параметрах кодека. В качестве АП выступали записи естественных звуков: широкополосных (звуки самолета, музыки, фена), узкополосных (звуки чайника, стиральной машины, двигателя), импульсных (звуки поезда). Наряду с естественными, в эксперименте использовались искусственно сгенерированные АП. Полученные зависимости качества РС усреднены для всех дикторов и аудиторов. Построены усредненные зависимости качества восстановленного РС от параметров кодека для исследуемых видов АП [2-4]. На рисунке 3 показаны зависимости качества восстановленного РС на выходе кодека CELP от значений его исследуемых параметров (рисунок 3, *a* – зависимости качества РС от числа отсчетов в кадре Z ,

рисунок 3, б – зависимости качества РС от числа отсчетов в субкадре L , рисунок 3, в – зависимости качества от порядка используемого предсказания M). Здесь цифрой 1 обозначены зависимости для сигнала без АП, цифрой 2 – для смеси сигнала и широкополосной АП, цифрой 3 – для смеси сигнала и узкополосной АП, цифрой 4 – для смеси сигнала и импульсной АП.

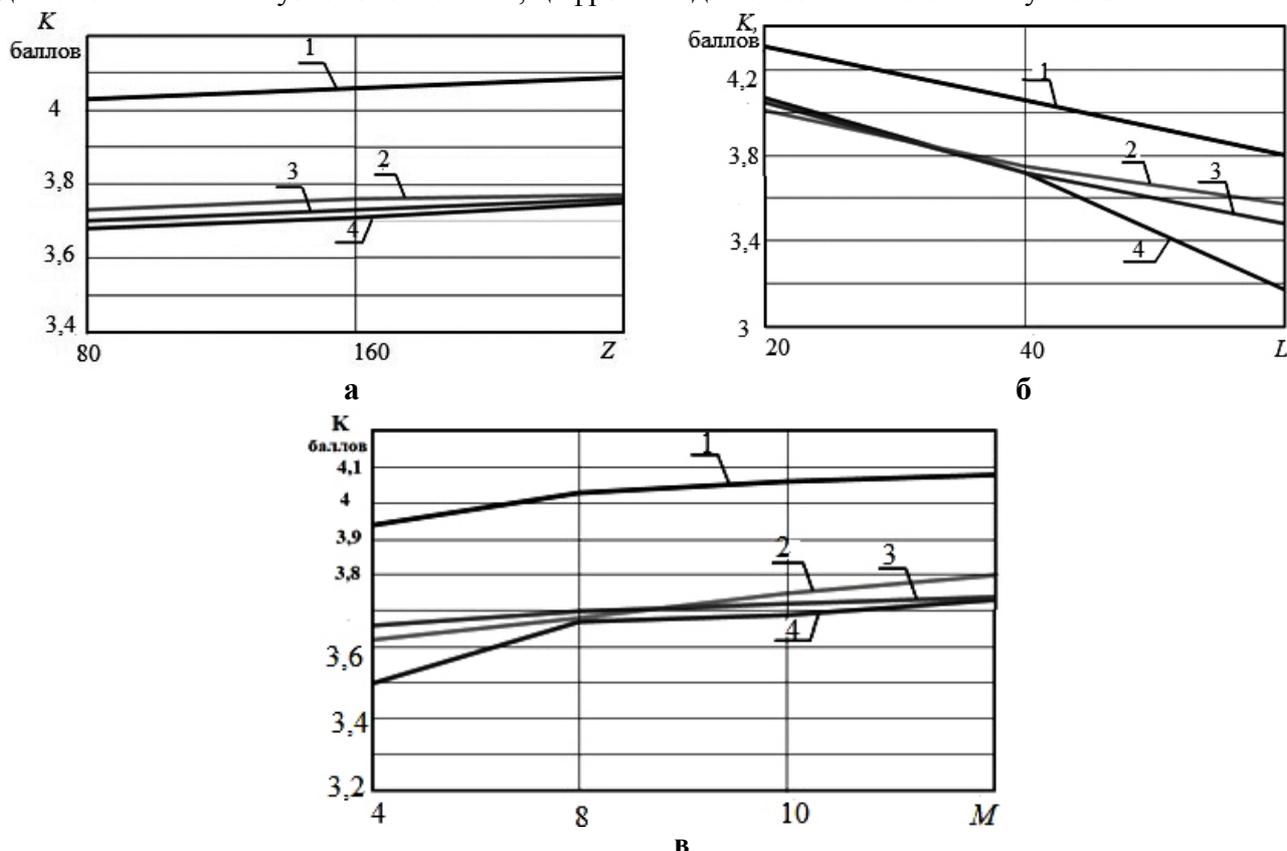


Рисунок 3 – Зависимости качества восстановленного РС от значений исследуемых параметров кодека

Figure 3 – Dependences of reconstructed SS quality on the values of codec parameters

Из приведенных на рисунке 3, а зависимостей видно, что при увеличении числа передаваемых отсчетов в кадре Z качество РС на выходе кодека возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении Z возрастает избыточность передаваемой информации. Вследствие этого передаваемый сигнал менее подвержен искажениям и качество передаваемого сигнала возрастает. На рисунке 3, б представлены зависимости качества РС от длины L субкадра. Из данных зависимостей видно, что при увеличении L качество сигнала уменьшается. Это объясняется снижением частоты обновления информации о субкадре. Как видно из представленных зависимостей, при длительности субкадра $L = 20$ качество восстановленного РС является максимальным в заданном диапазоне значений. При дальнейшем снижении L значительно повышается избыточность передаваемой информации, при незначительном повышении – качества РС. При повышении этого значения повышается избыточность информации о субкадре и снижается качество из за уменьшения частоты следования субкадров.

На рисунке 3, в представлены зависимости качества восстановленного РС от порядка предсказателя LPC. Из приведенных зависимостей видно, что при увеличении порядка предсказания РС качество возрастает и при порядке $M = 16$ качество РС является максимальным.

Проведен анализ параметров первичного кодека для адаптации кодека CELP на основе представления Хургина – Яковлева, структурная схема которого изображена на рисунке 2, б). Исследована эффективность алгоритма Хургина – Яковлева по критерию качества РС при прохождении прореженных отсчетов сигнала и его производной через кодек CELP. Результаты эксперимента в виде графиков зависимости изменения качества ΔK восстановленного РС при исполь-

зовании представления Хургина – Яковлева по сравнению с аналогичными кодеками на основе теоремы В.А. Котельникова в зависимости от скорости передачи показаны на рисунке 4.

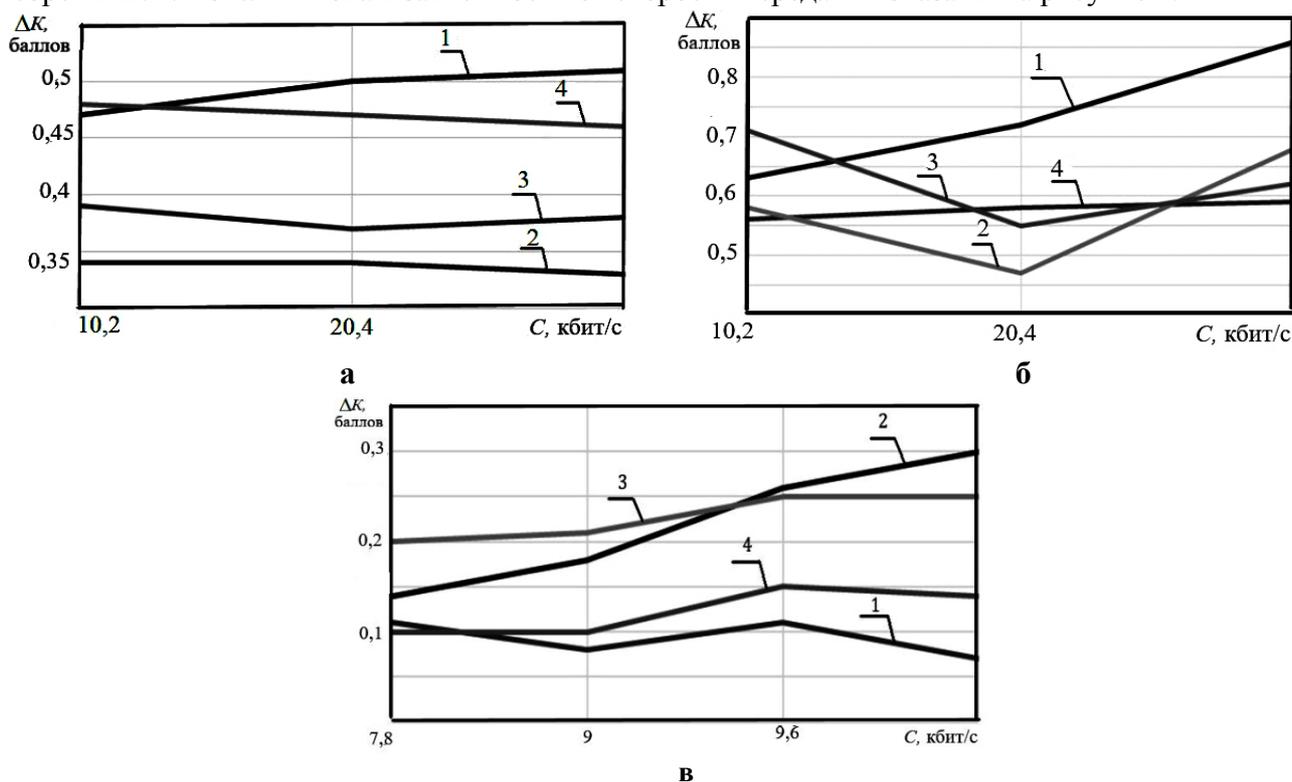


Рисунок 4 – Зависимости изменения ΔK качества восстановленного РС на основе алгоритма Хургина – Яковлева относительно теоремы В.А. Котельникова
Figure 4 – Dependences of quality change of reconstructed SS based on the Khurgin – Yakovlev algorithm relative to the theorem of V.A. Kotelnikov

Графики приведены при изменении различных параметров кодека CELP: буквой *а* обозначены графики зависимостей при изменении количества отсчетов в кадре, буквой *б* – при изменении числа передаваемых отсчетов в субкадре L , буквой *в* – при изменении порядка предсказателя LPC M . Цифрой 1 зависимости изменения ΔK качества восстановленного РС в баллах, полученные согласно ГОСТ Р 50840-95 [13] от скорости передачи C , кбит/с для сигнала без АП, цифрой 2 – для смеси сигнала и широкополосной АП, цифрой 3 – для смеси сигнала и узкополосной АП, цифрой 4 – для сигнала и импульсной АП.

Из анализа приведенных зависимостей видно, что применение алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает увеличение качества РС без существенного влияния на скорость C передачи, что можно использовать для достижения наилучшего качества K восстановленного РС при незначительном изменении скорости C передачи. Показано, что представление Хургина – Яковлева позволяет увеличить качество восстановленного РС на 0,5 балла согласно ГОСТ Р 50840-95 для рассмотренных видов АП по сравнению с аналогичным адаптивным кодеком на основе теоремы В.А. Котельникова. В результате анализа полученных результатов при $Q = 15$ дБ были выбраны оптимальные параметры для различных видов АП. Результаты анализа исследований представлены в таблице.

Применение приведенных в таблице параметров позволяет реализовать адаптивный кодер CELP при скоростях передачи 5,2-7,8 кбит/с, обеспечивающий качество восстановленного РС не ниже 3,5 баллов, согласно ГОСТ Р 50840-95 при действии всех вышеперечисленных видов АП.

Таким образом, получены значения параметров кодеков CELP на основе представления Хургина – Яковлева при действии различных АП. Показано, что при действии широкополосной АП наилучшее качество восстановленного РС обеспечивают следующие параметры кодека: число отсчетов в кадре $N = 240$, отсчетов в субкадре $L = 20$, порядок линейного предсказания

$M=6$. Это дает возможность реализовать скорость передачи 5,6 кбит/с. Аналогично при действии узкополосной АП оптимальными параметрами являются число передаваемых отсчетов в кадре $N=240$, число передаваемых отсчетов в субкадре $L=20$, порядок линейного предсказания $M=4$. При этом скорость передачи составила 5,2 кбит/с. Для импульсных АП наилучший результат достигается при числе отсчетов в кадре $N=160$, числе отсчетов в субкадре $L=20$, порядке линейного предсказания $M=4$ и скорости 7,8 кбит/с.

Параметры кодека CELP на основе представления Хургина – Яковлева
Parameters of CELP codec based on Khurgin – Yakovlev representation

Вид шума	Z , отсчетов	L , отсчетов	M	C (кбит/с)
Широкополосные АП	240	20	6	5,6
Узкополосные АП	240	20	4	5,2
Импульсные АП	160	20	4	7,8

Показано, что практически для всех видов АП, начиная с ОСШ 15 дБ, предложенный алгоритм обеспечивает выигрыш от 0,8 до 1 балла, согласно ГОСТ Р 50840-95 по сравнению с исходным неадаптивным алгоритмом CELP на основе теоремы В.А. Котельникова.

Заключение

Разработана схема адаптации к АП кодека РС на основе алгоритма CELP. Исследован кодек РС на основе алгоритма CELP при воздействии различных АП. Выделено три основных параметра кодека, влияющих на качество восстановленного РС: количество отсчетов в рамках кадра, количество отсчетов в рамках субкадра и порядок линейного предсказания.

Приведены значения параметров, обеспечивающие качество восстановленного РС на выходе кодека на уровне 3,5 балла, согласно ГОСТ Р 50840-95, при действии широкополосных, узкополосных и импульсных АП при ОСШ равном 15 дБ при скорости передачи в пределах 5,2-7,8 кбит/с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00783.

Библиографический список

1. **Басов О. О., Рыболовлев А. А.** Анализ степени адаптации современного парка кодеков речи. Электронный ресурс: <https://docplayer.ru/46089269-Adaptaciya-i-adaptivnye-sistemy-kodirovaniya-rechevogo-signala-osnovnye-ponyatiya-principy-svoystva-i-klassifikaciya.html> (дата обращения: 03.03.2021).
2. **Дмитриев В. Т., Янак А. Ф.** Исследование воздействия акустических шумов на первичные кодеки речевых сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 38-44.
3. **Кириллов С. Н., Дмитриев В. Т.** Устойчивость первичных кодеков речевых сигналов на основе представления Хургина – Яковлева к действию акустических шумов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 17-25.
4. **Кириллов С. Н., Дмитриев В. Т.** Алгоритм адаптации кодеков речевых сигналов к акустическим шумам на основе представления Хургина – Яковлева // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ. 2019. С. 7-13.
5. Алгоритм кодирования речи CELP. Электронный ресурс: https://dic.academic.ru/dic.nsf/ru-wiki/614146_Goldberg,_Randy_G._«Related_Internet_Sites»._A_Practical_Handbook_of_Speech_Coders._2000. (дата обращения: 03.03.2021).
6. **Mark D. Grosen.** Implementation of a CELP Speech Coder for the TMS320C30 using SPOX. Texas Instruments. Электронный ресурс: https://www.ti.com/lit/an/spra401/spra401.pdf?ts=1620828244312&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (дата обращения: 03.03.2021).
7. **Kondoz A. M.** Digital Speech: Coding for Low Bit Rate Communication Systems. Second Edition. Wiley, 2004. 459 p.

8. **Афанасьев А. А., Богачев Г. В., Рыболовлев А. А.** Теоретико-множественная модель липредера с адаптацией распределения информационных ресурсов к статистическим характеристикам кодируемых параметров. Орел: Академия ФАПСи, 2002. 60 с. Деп. в ВИНТИ.2311 – В2002.

9. **Хургин Я. И., Яковлев В. П.** Фinitные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.

10. **Кириллов С. Н., Дмитриев В. Т.** Реализационные возможности и помехоустойчивость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Радиотехника. 2003. № 1. С. 73-75.

11. **Кириллов С. Н., Дмитриев В. Т., Лукьянов Д. И., Семин Д. С.** Algorithms for evaluating the quality of the received speech and psycho-emotional state of the speaker by the action of acoustic noise in telecommunication systems // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Proceedings. Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, March 16, 2018.

12. **Бахурин С. А., Дмитриев В. Т.** Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2004. № 13. С. 32-35.

13. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости.

UDC 621. 395

ADAPTING THE CELP CODE TO ACOUSTIC INTERFERENCE

V. T. Dmitriev, Ph.D. (in technical sciences), associate professor of the Department of radio control systems, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

An adaptive to acoustic interference algorithm for coding speech signals based on CELP codec for V.A. Kotelnikov and Khurgin-Yakovlev representation has been developed and studied. The aim is to develop and study the algorithm for adapting CELP codec to the effects of acoustic interference. This is achieved by choosing separate sets of CELP codec parameters, which, when exposed to various types of acoustic interference, provide higher quality of reconstructed speech at codec output.

Key words: speech signal, acoustic interference, adaptive codec, CELP, primary coding, speech quality.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-25-34

References

1. **Basov O. O., Rybolovlev A. A.** Analysis of the degree of adaptation of the modern park of speech codecs. Electronic resource: <https://docplayer.ru/46089269-Adaptaciya-i-adaptivnye-sistemy-kodirovaniya-rechevogo-signala-osnovnye-ponyatiya-principy-svoystva-i-klassifikaciya.html>

2. **Dmitriev V. T., Yanak A. F.** Issledovanie vozdejstviya akusticheskikh шумов на pervichnye kodeki rechevyh signalov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 56, pp. 38-44. (in Russian).

3. **Kirillov S. N., Dmitriev V. T.** Ustojchivost' pervichnyh kodekov rechevyh signalov na osnove predstavleniya Hurgina – YАkovleva k dejstviyu akusticheskikh шумов. *Vestnik Ryazansko-go gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 69, pp. 17-25. (in Russian).

4. **Kirillov S. N., Dmitriev V. T.** Algoritm adaptacii kodekov rechevyh signalov k aku-sticheskim шумам на osnove predstavleniya Hurgina – YАkovleva. *Materialy IV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Aktual'nye problemy sovremennoj nauki i proizvodstva»*. Ryazan': RGRТУ. 2019, pp. 7-13. (in Russian).

5. *Algorithm kodirovaniya rechi CELP*. Electronic resource: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/614146> Goldberg, Randy G. «Related Internet Sites». A Practical Handbook of Speech Coders. 2000. (date of access: 03.03.2021) (in Russian).

6. **Mark D. Grosen** Implementation of a CELP Speech Coder for the TMS320C30 using SPOX. Texas Instruments. 1997. 22p. Electronic resource: https://www.ti.com/lit/an/spra401/spra401.pdf?ts=1620828244312&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (date of access: 03.03.2021).
7. **Kondo A. M.** Digital Speech: Coding for Low Bit Rate Communication Systems. Second Edition. Wiley, 2004. 459p.
8. **Afanasyev A. A., Bogachev G. V., Rybolovlev A. A.** *Teoretiko-mnozhestvennaya model' lipredera s adaptaciej raspredeleniya informacionnyh resursov k statisticheskim harakteristikam kodiruemyh parametrov* (Set-theoretical model of Lie-preder with adaptation of the distribution of information resources to the statistical characteristics of the encoded parameters) Orel: Akademiya FAPSI. 2002, 60 p. (in Russian).
9. **Khurgin Ya. I., Yakovlev V. P.** *Finitnye funktsii v fizike i tekhnike* (Finite functions in physics and technology). Moscow: Science. 1971. 408 p. (in Russian).
10. **Kirillov S. N., Dmitriev V. T.** Realizacionnye vozmozhnosti i pomekhoustojchivost' procedury vosstanovleniya signalov na osnove algoritma Hurgina – Yakovleva. *Radiotekhnika*. 2003, no. 1, pp. 73-75. (in Russian).
11. **Kirillov S. N., Dmitriev V. T., Lukyanov D. I., Semin D. S.** Algorithms for evaluating the quality of the received speech and psycho-emotional state of the speaker by the action of acoustic noise in telecommunication systems. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Proceedings. Moscow: National Research University "Higher School of Economics".* Russia, Moscow, March 16, 2018.
12. **Bakhurin S. A., Dmitriev V. T.** Issledovanie tochnosti algoritmov ocenki otschetov proizvodnoj v radiotekhnicheskikh ustrojstvakh. *Vestnik Ryazanskogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2004, no. 13, pp. 32-35. (in Russian).
13. GOST R 50840-95. *Peredacha rechi po traktam svyazi. Metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti* (Transmission of speech through communication paths. Methods for assessing quality, legibility and recognition). (in Russian).