

ПЕРВИЧНЫЕ КОДЕКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ И МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ХУРГИНА-ЯКОВЛЕВА

Дмитриев В. Т., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, e-mail: vol77@rambler.ru

PRIMARY SPEECH CODECS BASED ON WAVELET-PACKET DECOMPOSITION AND MODIFICATION OF THE KHURGIN-YAKOVLEV ALGORITHM

Dmitriev V.T.

The primary codecs of speech signals are investigated with the combined use of wavelet-packet decomposition and a modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm. A structural diagram of the processing algorithm is proposed, the most effective type of the parent wavelet and the decomposition depth, as well as the decomposition level and the number of processing channels of the Khurgin-Yakovlev algorithm modification are selected. The quality of the reconstructed speech signal at the output of various primary coding systems of speech signals based on wavelet-packet decomposition is analyzed. The dependences of the speech quality at the output of the transmission system are obtained in accordance with the MOS scale in low-speed information transmission systems depending on the transmission rate at the output for the compression system based on wavelet-packet decomposition and a modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm. Based on the obtained data, the analysis of primary coding algorithms that provide the greatest gain in the quality of the reconstructed speech is carried out.

Key words: speech signal compression, wavelet-packet decomposition, modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm, coding algorithm, compression ratio, wavelets, low-speed information transmission systems.

Ключевые слова: сжатие речевого сигнала, вейвлет-пакетное разложение, модификация алгоритма Хургина-Яковлева, алгоритм первичного кодирования, коэффициент сжатия, вейвлеты, низкоскоростные системы передачи информации.

Введение

В современных системах передачи речевой информации важно получение оптимального соотношения между минимальной избыточностью передаваемого речевого сигнала (РС), а соответственно минимальной скоростью передачи и максимально возможным качеством восстановленной речи на приемной стороне. Сокращение избыточности позволяет уменьшить издержки операторов связи, позволяя передавать по фиксированному каналу связи с установленной полосой пропускания большее количество телефонных каналов или значительно сократить используемый частотный диапазон канала связи.

На первом этапе развития цифровых сетей связи для передачи РС по каналу связи использовался кодек ИКМ (импульсно-кодовая модуляция) с А или μ – компандером (стандарт G.711) со скоростью передачи 64 Кбит/с. В настоящее время наиболее широко используемым является кодек G.729, обеспечивающий скорость передачи 8 кбит/с, что позволяет сократить используемый частотный диапазон в 8 раз. Наиболее перспективные в настоящее время первичные кодеки осуществляют передачу РС со скоростью 2,4 кбит/с, но не обеспечивают необходимого качества восстановленной речи и минимальной задержке при передаче.

Для решения данной проблемы в работе предложен-

Проведено исследование первичных кодеков речевых сигналов при совместном использовании вейвлет-пакетного разложения и модификации алгоритма Хургина-Яковлева. Предложена структурная схема алгоритма обработки, выбран наиболее эффективный вид материнского вейвлета и глубина разложения, а также уровень разложения и количество каналов обработки модификации алгоритма Хургина-Яковлева. Осуществлен анализ качества восстановленного речевого сигнала на выходе различных систем первичного кодирования речевых сигналов на основе вейвлет-пакетного разложения. Получены зависимости качества речи на выходе системы передачи в соответствии со шкалой MOS в низкоскоростных системах передачи информации в зависимости от скорости передачи на выходе для системы сжатия на основе вейвлет-пакетного разложения и модификации алгоритма Хургина-Яковлева. На основе полученных данных проведен анализ алгоритмов первичного кодирования, обеспечивающих наибольший выигрыш качества восстановленной речи.

но использование различных представлений РС, наряду со стандартными алгоритмами кодирования. Ранее для передачи РС использовалось представление РС во временном и частотном виде. Для решения задачи сокращения избыточности передаваемой информации при сохранении качества восстановленной речи на приемной стороне предложено совместно использовать вейвлет-пакетное разложение (ВПР) и модификацию алгоритма Хургина-Яковлева.

ВПР обеспечивает совместную обработку РС как во временной, так и частотной области, обеспечивая выделение отсчетов с максимальной энергетикой [1, 2]. Введение адаптивного порога обеспечивает существенное сокращение избыточности передаваемого РС без заметного снижения качества восстановленной речи на приемной стороне.

Алгоритм Хургина-Яковлева обеспечивает возможность параллельной обработки РС, а также повышение помехоустойчивости, но вносит дополнительную ошибку при восстановлении фазового спектра. Поэтому необходимо использовать модификацию данного алгоритма, обеспечивающую минимизацию ошибки восстановления фазового спектра. Применение модификации алгоритма Хургина-Яковлева позволяет не только снизить ошибку и улучшить помехоустойчивость системы обработки РС [3], но и позволяет снизить требования к вычислительным затратам в системах кодирования и обработки РС [4].

Таким образом, целью работы является разработка первичных кодеков РС на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева с целью повышения эффективности алгоритмов обработки речи за счет повышения коэффициента сжатия, повышения помехоустойчивости, а также повышения качества восстановленной речи на приемной стороне.

Разработка структурной схемы системы обработки на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева

Вейвлеты представляют собой функции определенной формы, локализованные по оси аргументов (независимых переменных), инвариантные к сдвигу и линейные к операции масштабирования (скатия/растяжения). Они определяются с помощью базисных функций, которые определяют их вид и свойства. Вейвлет-анализ позволяет использовать длительные интервалы времени там, где нужна более точная низкочастотная информация, и более короткие области там, где нужна высокочастотная информация. Одним из основных преимуществ, предоставляемых вейвлетами, является возможность выполнять локальный анализ, то есть анализировать локализованную область большего сигнала. Вейвлет-анализ способен выявлять параметры информации, которые другие методы анализа сигналов не способны определить [5]. В настоящее время для вейвлет-пакетной обработки РС применяются вейвлеты Добеши, Меера, биортогонального вейвлета.

Применение вейвлет-пакетной обработки РС обеспечивает дополнительное снижение избыточности передаваемой информации за счет введения пороговой обработки, что обеспечивает незначительное снижение

качества восстановленной речи на приеме.

Представление Хургина-Яковлева наряду с ВПР обеспечивает возможность параллельной обработки сигнала. Это обеспечивает ускорение обработки блоков отсчетов сигнала за счет многопроцессорной обработки, а также уменьшение вычислительных затрат за счет использования операции быстрого преобразования Фурье. Кроме того, как показано в [6...11], применение модификации алгоритма Хургина-Яковлева обеспечивает повышение помехоустойчивости передаваемой информации и снижение шумов квантования за счет фазового сдвига между отсчетами сигнала и его производных.

Необходимо рассмотреть возможности совместного использования предложенной модификации алгоритма Хургина-Яковлева и ВПР с основными первичными кодеками РС для достижения наибольшей эффективности алгоритмов первичного кодирования с точки зрения повышения качества восстановленной речи на приеме и помехоустойчивости передаваемой информации. На рис. 1 представлена структурная схема кодера (а) и декодера (б) на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева.

Разрабатываемый кодек состоит из блока ВПР, блока обработки согласно модификации алгоритма Хургина-Яковлева, а также вторичного кодера. Декодирующая часть состоит из первичного декодера, блока фильтров Хургина-Яковлева и блока обратного ВПР. В передающей части исходный сигнал в аналоговой форме поступает на аналого-цифровой преобразователь, где происходит его дискретизация с заданной частотой, далее, сигнал поступает на вход блока ВПР, где происходит его сжатие заданным видом материнского вейвлета. После дискретизации исходный сигнал поступает на блок ВПР. Преобразуемый сигнал поступает на фильтры нижних и верхних частот, которые делят диапазон частот исходного сигнала на две половины, образуя низкочастотные и высокочастотные компоненты сигнала, имеющего в два раза более узкую полосу частотных составляющих. После фильтров децимированные отсчеты сигнала поступают на элемент прореживания, которое пропускает только каждый второй отсчет со своего входа, поскольку каждое второе значение несет в себе избыточную информацию. Низкочастотный (НЧ) фильтр можно представить усреднением двух со-



Рис. 1. Структурная схема кодера (а) и декодера (б) на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева

седних точек, а высокочастотный (ВЧ) – численным дифференцированием, в которых вычисляется свертка (цифровая фильтрация).

В работе [3] показано, что наиболее эффективным видом материнского вейвлета является биортогональный сплайн-вейвлет с коэффициентами фильтра 3 и 5, с 4-м уровнем разложения. Для сигналов с частотой дискретизации 16 кГц данное ВПР позволяет в 2 раза сжать исходный сигнал, получив при этом качество восстановленной речи на выходе системы передачи с оценкой 3,34 по шкале MOS.

С выхода блока ВПР сигнал поступает на блок обработки согласно модификации алгоритма Хургина-Яковлева. Сигнал поступает на дифференциатор, где происходит получение отсчетов производной, согласно предложенному в работе алгоритму [13]. Далее дискретные отсчеты сигнала и производной поступают в дециматор, где происходит отброс каждого второго отсчета сигнала и производной. Процедура обработки сигнала на основе модификации алгоритма Хургина-Яковлева [4] показана на рис. 2.

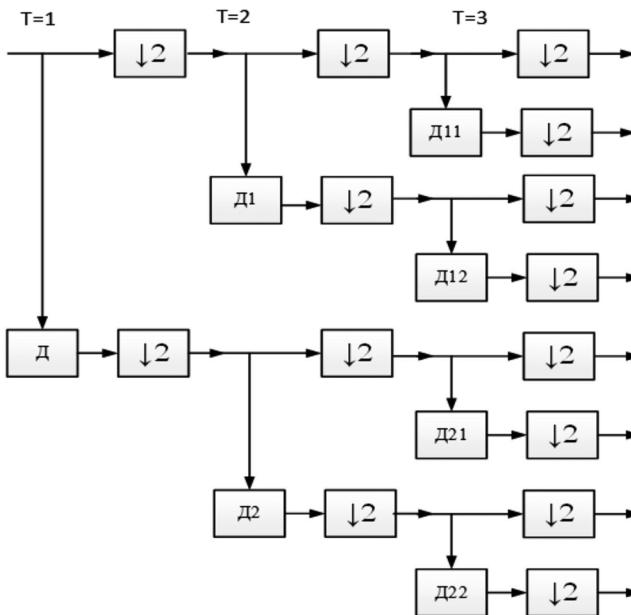


Рис. 2. Структурная схема блока Хургина-Яковлева осуществляющего обработку сигналов на основе модификации алгоритма Хургина-Яковлева при трёхкратном разложении исходного сигнала при $N = 2$

Искаженные в канале связи отсчеты сигнала и производной поступают в двухканальный приемник. После декодирования в декодере отсчеты сигнала и производной попадают на интерполятор, где происходит вставка между соседними отсчетами входного сигнала нулевых отсчетов. Затем отсчеты сигнала и производной поступают на синтезирующие фильтры [3].

Описание эксперимента

Целью экспериментальных исследований является обеспечение качества восстановленного сигнала на основании шкалы MOS не ниже 3,5 балов при скорости передачи до 2,4...4,8 кбит/с, а также обоснование выбора вида материнского вейвлет-пакета и его уровня раз-

ложения, выбора уровня разложения модификации алгоритма Хургина-Яковлева. На основе полученных результатов осуществляется сравнение эффективности предложенного алгоритма кодирования, с низкоскоростными кодеками на основе существующих стандартов кодирования и различными вариантами построения схемы кодирования с использованием ВПР и/или модификации алгоритма Хургина-Яковлева.

Для обоснования выбора именно этого вида ВПР и его уровня разложения проведем экспериментальные исследования, которые позволят определить уровень разложения вейвлета и вид ВПР, дающий наилучшее качество восстановленной речи при наибольшем сжатии. В качестве исходных РС выбрано 10 реализаций РС с частотой дискретизации 8 кГц и 10 реализаций РС с частотой дискретизации 16 кГц. Ввод и дискретизация РС осуществляются с помощью звуковой карты ЭВМ, а алгоритмы обработки выполнены в пакете MATLAB версии R2020 с дополнительным пакетом расширений WaveletToolbox.

В качестве исходных сигналов примем РС, скатые в блоке ВПР с помощью биортогонального сплайн вейвлета 3.5, представляющие собой 10 реализаций РС с частотой дискретизации 8 кГц и 10 реализаций РС с частотой дискретизации 16 кГц. При этом задано несколько значений коэффициентов сжатия, равных 25 %, 50 % и 75 %. Оценка качества производится с помощью программы-функции Matlab, оценивающей качества речи, согласно стандарту ITU-T P.862.2 (PESQ версии 2.0).

Экспериментальные исследования первичных кодеков речевых сигналов на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева

Проведены исследования алгоритмов ВПР при обработке РС. Данные исследования показывают влияние вида материнского вейвлета (вейвлеты Хаара, Добеши, биортогональный вейвлет и вейвлет и Мейера) и уровня ВПР на качество восстановленной речи и коэффициент сжатия.

В табл. 1 приведены зависимости коэффициента сжатия от вида материнского вейвлета и уровня разложения. На основе анализа данных, приведенных в табл. 1, в качестве материнского вейвлета целесообразно выбрать биортогональный сплайн-вейвлет с коэффициентами фильтра 3 и 5, с 4-м уровнем разложения, который обеспечивает наилучшее качество восстановленной речи.

Для определения максимально эффективного уровня разложения модификации алгоритма Хургина-Яковлева проведем исследование алгоритма с однократным, двукратным, трехкратным и четырехкратным разложением. Выбор оптимального уровня будет осуществлён по параметру качества речи, после прохождения алгоритма обработки на основе модификации алгоритма Хургина-Яковлева.

В результате в табл. 2 получена зависимость оценки качества речи, согласно шкале MOS, от уровня разложения Хургина-Яковлева при двухканальной реализации при $N = 2$ для различных коэффициентов сжатия.

Таблица 1. Зависимости качества восстановленной речи и коэффициента сжатия от вида материнского вейвлета и уровня разложения

Исследуемый алгоритм	2 уровень		3 уровень		4 уровень		5 уровень	
Вид материнского вейвлета	Оценка качества	K_c (%)						
Вейвлет Хаара	3,31	42	2,89	28	2,71	25	2,64	23
Вейвлет Добеши	4,2	63	3,62	58	2,99	54	2,99	48
Биортогональный вейвлет 3.5	4,27	60	4,08	53	3,34	48	2,97	42
Вейвлет Мейера	4,40	62	4,16	55	3,13	51	2,66	44

Таблица 2. Зависимость качества речи от уровня разложения T модификации алгоритма Хургина-Яковлева

Уровень разложения T	Оценка качества речи при $K_c = \text{const} = 25\%$	Оценка качества речи $K_c = \text{const} = 50\%$	Оценка качества речи $K_c = \text{const} = 75\%$
1	3,98	3,41	2,17
2	3,99	3,43	2,19
3	4,01	3,52	2,21
4	3,88	3,08	2,17

Таблица 3. Результаты сравнения эффективности различных алгоритмов первичного кодирования РС

алгоритм кодирования	Оценка качества речи при $K_c = \text{const} = 25\%$	Оценка качества речи $K_c = \text{const} = 50\%$	Оценка качества речи $K_c = \text{const} = 75\%$
Схема кодирования на основе ВПР	3,86	3,34	2,44
Схема кодирования на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева	4,04	3,62	2,19
Схема кодирования заменой на первой ступени ВПР модификацией алгоритма Хургина-Яковлева	3,71	3,25	2,22

Графики зависимостей оценки качества РС от уровня разложения Хургина-Яковлева для различных коэффициентов сжатия, определяемых порогом после ВПР представлен на рис. 3. Кривая 1, на рис. 3, представляет собой оценку качества восстановленной речи на выходе первого уровня разложения модификации алгоритма Хургина-Яковлева, кривая 2 представляет второй уровень разложения модификации алгоритма Хургина-Яковлева, кривая 3 представляет третий уровень разложения, кривая 4 представляет четвертый уровень разложения.

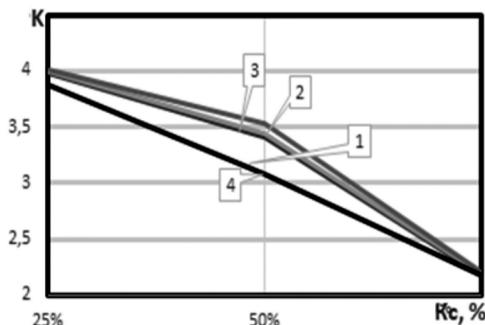


Рис. 3. Зависимость качества РС от коэффициента сжатия для различных уровней разложения Хургина-Яковлева

Как видно из полученных зависимостей, наилучшее значения качества речи обеспечивает третий уровень разложения. При таком представлении обеспечивается достаточно простая реализация синтезирующих фильтров, возникает возможность использовать производные более высших порядков и сохраняются возможно-

сти к дальнейшему распараллеливанию вычислений. В то же время, при этом значительно усложняется схема системы передачи сигнала, за счет увеличения числа дифференциаторов, дециматоров и синтезирующих фильтров.

Проведем сравнение эффективности алгоритма кодирования РС на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева. Результаты сравнения эффективности различных моделей кодирования по сравнению с предложенным алгоритмом на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева приведены в табл. 3.

Графики зависимости качества восстановленной речи на выходе системы передачи от коэффициента сжатия для различных алгоритмов кодирования представлен на рис. 4.

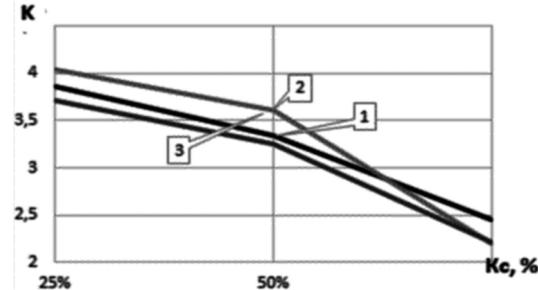


Рис. 4. Зависимости качества восстановленной речи от коэффициента сжатия для анализируемых систем

На графике введены следующие обозначения: 1 – схема кодирования на основе ВПР, 2 – схема кодирования на основе ВПР и модификация алгоритма Хургина-

Яковлева, 3 – схема кодирования заменой на первой ступени ВПР модификацией алгоритма Хургина-Яковлева.

В результате эксперимента показано, что наилучшие показатели качества обеспечивает схема кодирования на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева. Применение алгоритма обработки на основе модификации алгоритма Хургина-Яковлева после ВПР позволяет улучшить качество восстановленной речи в среднем на 0,3 балла согласно шкале MOS.

Проведем исследование эффективности алгоритма кодирования РС на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева для различных низкоскоростных кодеков РС: MMBE 1,2 кбит/с; RMMBE 2,4 кбит/с; ITU ICELP 4,8 кбит/с; ITU G.723.1 6,3 кбит/с [14]. Исследования осуществлялись при наличии ошибок в канале связи, вероятность которых изменялась в пределах от 0 до 100 %. Результаты экспериментальных исследований оценки качества восстановленной речи для различных сочетаний алгоритмов первичного кодирования приведены в табл. 3.

На рис. 5 приведены графики зависимости качества восстановленной речи для исследуемого сочетания ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева сов-

местно с рассмотренными алгоритмами низкоскоростного кодирования от коэффициента ошибок в канале связи при различной вероятности ошибок: а – при нулевой вероятности ошибки в канале связи (идеальный случай), б – при вероятности ошибки в канале связи 1 %, в – при вероятности ошибки в канале связи 5 %.

На графиках под цифрой 1 обозначены зависимости качества речи на выходе стандартных низкоскоростных кодеков на основе теоремы В.А. Котельникова, под цифрой 2 – качества восстановленной речи на выходе комбинации ВПР и стандартных низкоскоростных кодеков, под цифрой 3 – качество восстановленной речи на выходе комбинации ВПР, модификации алгоритма Хургина-Яковлева и стандартных низкоскоростных кодеков.

Как видно из анализа приведенных зависимостей, применение ВПР обеспечивает снижение скорости передачи речевого трафика, а применение модификации алгоритма Хургина-Яковлева обеспечивает дополнительную помехоустойчивость и повышение качества восстановленной речи до 0,7 балла, согласно шкале MOS, относительно классических низкоскоростных кодеков на основе теоремы В.А. Котельникова.

Таким образом, разработанный алгоритм кодирования может позволить достичь скорости кодирования

Таблица 3. Результаты исследования оценки качества восстановленной речи для различных систем кодирования в зависимости от ошибок в канале связи

Кодек	Kc, %	Скорость, кбит/с	Оценка качества речи при различном проценте ошибок в канале связи				
			0%	1%	5%	50%	100%
MMBE 1,2 кбит/с	-	1,20	3,47	3,25	3,08	2,09	1,37
ВПР + MMBE 1,2 кбит/с	42	0,70	3,17	3,01	2,97	2,47	1,07
ВПР+модификация алгоритма Хургина-Яковлева+ MMBE 1,2 кбит/с	39	0,74	3,27	3,06	2,97	2,56	1,25
RMMBE 2,4 кбит/с	-	2,40	3,55	3,21	2,85	2,17	1,49
ВПР+RMMBE 2,4 кбит/с	42	1,39	3,97	3,46	2,94	2,18	1,51
ВПР+ модификация алгоритма Хургина-Яковлева+ RMMBE 2,4 кбит/с	39	1,46	4,03	3,53	3,01	2,27	1,60
ICELP 4,8 кбит/с	-	4,8	4,15	4,02	3,88	3,10	1,65
ВПР+ICELP 4,8 кбит/с	42	2,78	3,64	3,57	3,33	3,00	1,61
ВПР+ модификация алгоритма Хургина-Яковлева +ICELP 4,8 кбит/с	39	2,93	4,20	3,72	3,64	3,27	1,63
ITU G.723.1 6,3 кбит/с	-	6,3	4,28	4,12	3,93	3,21	2,09
ВПР+ITU G.723.1 6,3 кбит/с	42	3,65	3,50	3,42	3,36	3,10	1,93
ВПР + модификация алгоритма Хургина-Яковлева +ITU G.723.1 6,3 кбит/с	39	3,84	4,32	3,69	3,58	3,26	2,01

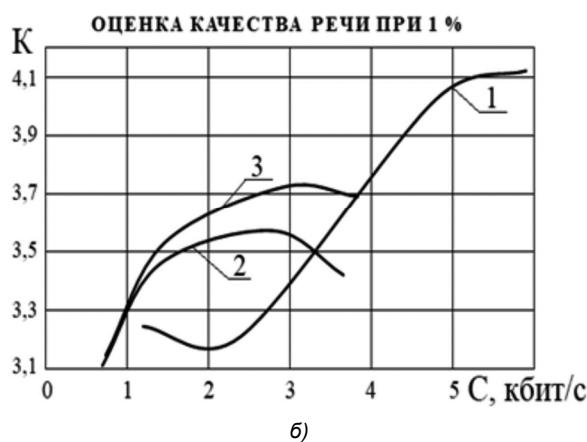




Рис. 5. Зависимости качества восстановленной речи от скорости передачи при различной вероятности ошибок в канале связи

всего 1,46 кбит/с при качестве речи порядка 4 баллов, согласно шкале MOS, при использовании в качестве вторичного декодирования кодек RMMBE 2,4 кбит/с.

В результате экспериментальных исследований можно сделать вывод, что предложенный алгоритм кодирования на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева позволяет обеспечивать кодирование РС с высоким качеством восстановленной речи при приеме при действии шумов в канале связи, обладая при этом достаточно низкой скоростью кодирования.

Заключение

Предложен алгоритм кодирования РС на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева. Алгоритм кодирования может применяться в компьютерной телефонии для передачи РС со скоростью 1,46 кбит/с при хорошем качестве восстановленной речи на уровне 4 баллов, согласно шкале MOS. Кодер управляет сигнальным микропроцессором и может быть рекомендован для применения в технике связи. В результате экспериментальных исследований показано:

1 Использование модификации алгоритма Хургина-Яковлева позволяет улучшить качество восстановленной речи в среднем на 0,3 балла, согласно шкале MOS, при использовании алгоритма обработки на основе модификации алгоритма Хургина-Яковлева после ВПР.

2. Применение схемы кодирования на основе ВПР и модификации алгоритма Хургина-Яковлева является наиболее эффективной с точки зрения качества восстановленной речи.

3. Наиболее эффективным видом ВПР является биортогональный сплайн-вейвлет 3.5 с уровнем разложения 4.

4. В сравнении с существующими низкоскоростными кодеками (до 4,8 кбит/с) разработанный алгоритм кодирования позволяет достичь более высоких оценок качества речи на выходе системы передачи при почти вдвое меньшей скорости, т.е. применение данного алгоритма позволяет получить в два раза большую избыточность при приемлемом качестве речи.

Литература

- Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. Техносфера. М. 2004. 280с.
- Кириллов С.Н., Зорин С.В. Применение алгоритмов вейвлет-анализа для сжатия речевых сигналов в IP-телефонии. Электросвязь. 2001. № 4. С.40-43.
- Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость и реализуемость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина-Яковлева. Радиотехника. 2003. № 1. С.73-76.

4. Дмитриев В.Т., Харланова Е. А. Алгоритм кодирования речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева и вейвлет-пакетного разложения. Вестник РГРТУ. 2010. № 1 (31). С. 98-101.

5. Лобов Т.А. Выбор оптимального вида вейвлет-пакета с целью эффективного сжатия речевого сигнала. Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVI ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТУ, 2021. С. 75-76.

6. В.Т. Дмитриев Помехоустойчивость кодеков речи на основе алгоритма Хургина-Яковлева. Вестник РГРТА Вып. № 12, 2003. С. 133-136.

7. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева. Вестник РГРТУ. 2022 № 82. С. 27-37.

8. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Устойчивость первичных кодеков речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева к действию акустических шумов. Вестник РГРТУ. 2019. № 3. С. 17-25.

9. В.Т. Дмитриев, А.Ф. Янак Исследование воздействия акустических шумов на первичные кодеки речевых сигналов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 2 (Выпуск 56) С. 38-44.

10. Дмитриев В.Т. Адаптация кодеков речевых сигналов на основе теоремы В.А. Котельникова и модификации алгоритма Хургина-Яковлева к шумам в канале связи. Цифровая обработка сигналов № 2. 2023 С. 55-60.

11. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Adaptive Primary Speech Signals Codecs for Software-Configured Radio Systems// 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE) | 978-1-7281-8990-1/20/.00 ©2020 IEEE | DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314648 IEEE Catalog Number: CFP20Y62-ART ISBN: 978-1-7281-8990-1. pp. 32-38

12. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Adaptive Primary Speech Signals Codecs for Software-Configured Radio Systems. 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE) | 978-1-7281-8990-1/20/.00 ©2020 IEEE | DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314648 IEEE Catalog Number: CFP20Y62-ART ISBN: 978-1-7281-8990-1 –С. 32-38.

13. С.А. Бахурин, В.Т. Дмитриев Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах. Вестник РГРТА Вып. № 13, 2004 С. 32-35.

14. Зюко А.Г., Банкет В.Л., Лехан В.Ю. Методы низкоскоростного кодирования при передаче речи. Зарубежная радиоэлектроника. 1986. № 11. С. 53-69.