

УДК 621.391

*В. Т. Дмитриев, Е. А. Харланова*

## АЛГОРИТМ КОДИРОВАНИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ХУРГИНА-ЯКОВЛЕВА И ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕЛЕФОНИИ

*Предложен алгоритм кодирования речевых сигналов на основе представления Хургина-Яковлева и вейвлет-пакетного разложения. Исследовано применение в данном алгоритме различных видов вейвлет-пакетного разложения. Показано, что применение предложенного алгоритма при использовании вейвлетных функций Мейера позволит получить качество восстановленного речевого сигнала в системах компьютерной телефонии более 4 баллов согласно ГОСТ Р 50840-95 при скорости передачи 4,8 кбит/с.*

**Ключевые слова:** компьютерная телефония, вейвлет-анализ, представление Хургина-Яковлева.

**Введение.** Существующие системы сжатия речевых сигналов (РС) в системах компьютерной телефонии хотя и обеспечивают хорошее качество восстановленного сигнала при скоростях передачи 4,8 - 6,4 кбит/с, но обладают сложной реализацией, требуют больших вычислительных затрат, не обеспечивают возможность параллельной обработки. Кроме того, такие алгоритмы неустойчивы к действию шумов, а также при наличии задержек и потерь пакетов РС в сетях передачи данных. Кроме того, алгоритмы обработки нестационарных случайных процессов, используемые в современных радиотехнических системах, основываются на преобразовании Фурье, которое предусматривает разложение по неограниченным во времени базисным функциям.

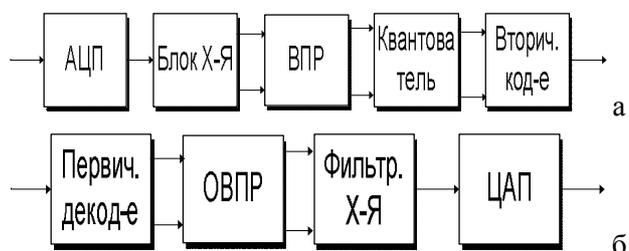
Поэтому необходимо применять другие виды преобразования, устойчивые к пропадающим отдельным пакетам, например на основе вейвлет-пакетного разложения (ВПР).

Основное достоинство ВПР заключается в том, что базисные функции локализованы не только в частотной, но и во временной области. Благодаря этому алгоритмы ВПР нашли широкое применение при решении ряда задач, связанных с обработкой нестационарных случайных процессов и сжатия информации. Как показано в [1], кодеки на основе ВПР менее критичны к пропаданию пакетов по сравнению со стандартными. Это объясняется свойствами используемых базисных функций, приводящими к отсутствию искажения формы восстановленного сигнала за пределами потерянных пакетов.

Для дополнительного улучшения качества восстановленного сигнала, снижения требований к скорости вычислений за счет распараллеливания операций и увеличения помехоустойчивости передаваемого сигнала предлагается на этапе кодирования применение представления Хургина-Яковлева [2]. Данный алгоритм обеспечивает возможность отдельной обработки сигнала с верхней частотой спектра  $F$  и  $N-1$  его первых производных, взятых с частотой дискретизации  $2F/N$ .

**Цель работы** – разработка и исследование алгоритма кодирования РС на основе представления Хургина-Яковлева и вейвлет-пакетного разложения.

**Структурная схема алгоритма** Структурная схема разрабатываемого кодера представлена на рисунке 1, а. Исходный сигнал в аналоговой форме поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП).



**Рисунок 1** - Структурная схема кодера и декодера

С целью улучшения качества восстановленного РС предлагается заменить первую ступень вейвлет-пакетного преобразования на разложение сигнала согласно представлению Хургина-Яковлева при  $N=2$ . Показано [2], что в отличие

от алгоритма восстановления сигналов в соответствии с теоремой В.А. Котельникова алгоритм Хургина-Яковлева имеет более простую с точки зрения формы амплитудно-частотной характеристики реализацию синтезирующих фильтров при более низкой частоте дискретизации. Это обстоятельство позволяет получить меньшую ошибку восстановления сигналов. Выигрыш в помехоустойчивости при использовании алгоритма Хургина-Яковлева объясняется тем, что дополнительный фазовый сдвиг в системе синтезирующих фильтров обеспечивает частичное подавление шумов при восстановлении сигнала [2].

При  $N=2$  РС рассматривается в виде прореженных отсчетов сигнала и производной. В этом случае устройство восстановления исходного сигнала включает два канала, в которых осуществляется обработка последовательности отсчетов сигнала и производной  $f_{np}(n)$  в синтезирующих фильтрах. В работе [1] рассмотрены возможности реализации данного представления.

Затем отсчеты сигнала и производной поступают на блок ВПР. ВПР сигналов на различных уровнях декомпозиции заключается в разделении функций приближения к сигналу на две группы: аппроксимирующую - грубую, с достаточно медленной временной динамикой изменений, и детализирующую - с локальной и быстрой динамикой изменений на фоне плавной динамики, с последующим их дроблением и детализацией на других уровнях декомпозиции сигналов. Это возможно во временной и в частотной областях представления сигналов на основе ВПР.

Отсчеты сигнала подаются на низкочастотный и высокочастотный фильтры декомпозиции с импульсными характеристиками соответствующими последовательностям  $h_i$  и  $g_i$ . В этих фильтрах вычисляется свертка по формуле:

$$y(k) = \sum_{l=0}^{2n-1} S(l)q(k-l), \quad (1)$$

где  $2n$  - число отсчетов импульсной характеристики фильтра,  $q(k)$  - импульсная характеристика фильтра. Сигнал  $S(t)$  декомпозируется на две составляющие аппроксимирующую  $A_m(t)$  и детализирующую  $D_m(t)$ :

$$S(t) = A_m(t) + D_m(t) = \sum_k a_{1k} \varphi_{1k}(t) + \sum_k d_{1k} \psi_{1k}(t), \quad (2)$$

где происходит восстановление кадра РС длительностью 16 мс. Сигнал  $S(t)$  на уровне декомпозиции  $m$  представлен совокупностью коэф-

фициентов  $a_{mk}$  и  $d_{mk}$ :

$$a_{mk} = \sum_l h_{l-2k} a_{l,m-1}, \quad d_{mk} = \sum_l g_{l-2k} a_{l,m-1}. \quad (3)$$

Значения  $a_{mk}$  и  $d_{mk}$  зависят от базисных функций  $\varphi(t)$  и  $\psi(t)$ :

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 2 \sum_l h_l \varphi(2t-l), \\ \psi(t) &= 2 \sum_l g_l \varphi(2t-l). \end{aligned} \quad (4)$$

Эти функции определяются коэффициентами вейвлет-пакетного разложения  $h_l$  и  $g_l$

$$\begin{aligned} h_l &= (\varphi(t), \varphi(2t-l)), \\ g_l &= (-1)^l h_{2n-1-l}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l = 0, 1, \dots, 2n-1$  - номера всей совокупности отсчетов [3, 4]. Фильтры пропускают только половину всех частотных компонентов сигнала, не попавшие в полосу прозрачности составляющие удаляются.

При восстановлении сигнала по его вейвлет-коэффициентам процесс идет от крупных масштабов к мелким и на каждом шаге описывается выражением [1]:

$$a_{m-1,k} = \sum_l (h_{l-2k} a_{ml} + g_{k-2l} d_{ml}). \quad (6)$$

В случае обработки РС основными требованиями для вейвлет-функции (ВФ) являются компактность спектра, гладкость и симметрия. Большое число нулевых моментов дает хорошие результаты при сжатии информации, а большая степень гладкости ВФ обеспечивает более точную реконструкцию сигналов [5].

Данная процедура выполняется на основе алгоритма полного дерева с обнулением отсчетов в ветвях. В качестве исходных данных можно задавать значение порога для получения требуемой скорости передачи. Результирующий набор коэффициентов подвергается 8-битному квантованию.

Блок вторичного кодирования осуществляет кодирование серий коэффициентов разложения без потерь, а также формирование последовательного потока информации.

Структурная схема устройства декодирования РС представлена на рисунке 1, б. Блок первичного декодирования осуществляет декодирование коэффициентов ветвей разложения. Коэффициенты разложения подаются на блок обратного дискретного ВПР.

Далее отсчеты сигнала и его производной поступают на синтезирующие фильтры для сигнала и производной (Фильтры Х-Я), построенные согласно представлению Хургина-

Яковлева. После фильтров отсчеты поступают на сумматор, на выходе которого получаются отсчеты восстановленного сигнала.

**Результаты экспериментальных исследований.** В ходе экспериментальных исследований была построена модель схемы кодирования РС на основе ВПР и представления Хургина-Яковлева (рисунок 1).

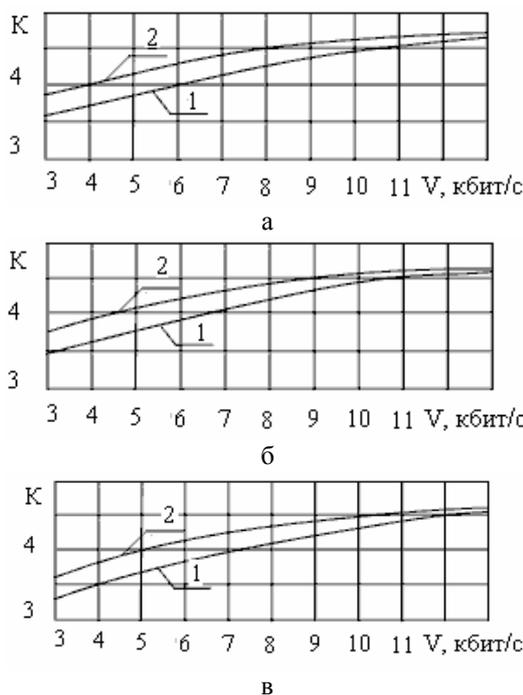
Экспериментальные исследования проводились в соответствии с ГОСТ Р 50840-95. Для проведения исследования был собран речевой материал в виде наборов записей 5 дикторов разного пола в возрасте от 18 до 30 лет. Для качественной оценки восстановленного сигнала приглашались 15 слушателей, и качественная оценка усреднялась.

Одним из важных параметров ВПР является тип используемого вейвлетного фильтра. Рассматривались три фильтра, предназначенные для разных задач. В случае, когда не предъявляются высокие требования к скорости обработки и стоимость элементной базы не критична как на этапе анализа, так и синтеза, возможно использовать фильтры, принадлежащие классу Мейера.

Если предъявляются высокие требования к скорости обработки лишь на одном из этапов: или при анализе, или синтезе, целесообразно использовать ортогональные вейвлетные фильтры Добеши 3 порядка. Когда требуется высокая скорость обработки как на этапе синтеза, так и анализа и не допускается применение дорогой элементной базы, необходимо использовать биортогональные вейвлетные фильтры. В данной работе рассматривались фильтры с глубиной разложения ВПР  $d = 5$ .

На рисунке 2 приведены зависимости качества РС -  $K$ , полученных согласно ГОСТ Р 50840-95 по 5-балльной шкале, от скорости передачи информации  $V$  для вейвлетных функций (ВФ) класса Мейера (рисунок 2, а), биортогональных ВФ (рисунок 2, б), а также ВФ Добеши (рисунок 2, в), где кривая 1 показывает характеристику ВПР без применения представления Хургина-Яковлева, а кривая 2 - ВПР с применением представления Хургина-Яковлева. Как следует из анализа экспериментальных исследований, фильтр, построенный на ВФ Мейера, обеспечивает наилучшее качество восстановленного РС при скорости передачи 5-9 Кбит/с по сравнению с ортогональными (Добеши-3) и биортогональными фильтрами. Кроме того, из анализа зависимости следует, что по сравнению с классическим ВПР пред-

ложенный алгоритм обеспечивает увеличение качества восстановленного РС на 0,3 балла согласно ГОСТ Р 50840-95.



**Рисунок 2- Зависимости качества РС от скорости передачи для различных вейвлетов**

**Заключение.** Показано, что применение предложенного алгоритма при использовании ВФ Мейера позволит получить качество восстановленного РС на уровне 4 баллов согласно ГОСТ Р 50840-95 при скорости передачи 4 кбит/с при уменьшении вычислительных затрат в 2 раза по сравнению с классическим алгоритмом.

#### **Библиографический список**

1. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Применение алгоритмов вейвлет-анализа для сжатия речевых сигналов в IP-телефонии // Электросвязь. 2001. № 4. С. 40-42.
2. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость и реализуемость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина-Яковлева. «Радиотехника». 2003. № 1.
3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
4. Яковлев А.Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов Сайнс-Пресс. М., 2003. - 80 с.
5. Переберин А.В. О систематизации вейвлет-преобразований // М., Вычислительные методы и программирование. Т.2, 2001. 244 с.
6. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. Спб.: Военный университет связи, 1999. 204 с.