

УДК 621.391

С.Н. Кириллов, В.Т. Дмитриев

## МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ФИЕНУПА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ПРОРЕЖЕННЫМ ОТСЧЕТАМ СИГНАЛА И ЕГО ПРОИЗВОДНОЙ

*Предложена модификация итерационного алгоритма восстановления речевой информации по прореженным отсчетам сигнала и его производной, позволяющая повысить качество восстановленной речи. Показано, что применение данного алгоритма в кодеках речевых сигналов (РС) на основе полосового вокодера позволяет повысить качество восстановленной речи на 0,3 – 0,4 балла согласно ГОСТ Р 50840-95.*

**Введение.** В системах передачи и обработки различных видов информации, в случае, когда необходимо восстановить исходный сигнал по некоторой априорной информации, зачастую используются итерационные алгоритмы [1 – 3]. Данный вид алгоритмов позволяет использовать априорные данные о классе возможных решений и обладает высокой функциональной устойчивостью к ошибкам аппроксимации оператора восстановления.

Особенно широкое распространение эти алгоритмы получили при восстановлении изображений при заданной априорной информации в виде некоторой части известных отсчетов амплитудного или фазового спектров. Возможно восстановление РС по известным отсчетам амплитудного спектра и части отсчетов фазового при использовании модификации алгоритма Фиенупа.

В [4] показана эффективность применения итерационного алгоритма Фиенупа в полосовых вокодерах. Показано, что применение данного алгоритма позволит повысить качество восстановленного РС в полосовом вокодере на 0,2 – 0,3 балла согласно ГОСТ Р 50840-95.

В то же время, наряду с классическим представлением В.А. Котельникова, существует представление Хургина-Яковлева. При использовании такого представления отсчеты РС, взятые с частотой дискретизации В.А. Котельникова, можно представить в виде прореженных в два раза отсчетов сигнала и его производной, что позволяет увеличить помехоустойчивость РС в 1,2...1,5 раза, снизить требования к синтезирующим фильтрам, а также уменьшить вычислительные затраты [5].

Таким образом, вызывает интерес возможность использования итерационного алгоритма

Фиенупа для восстановления РС в полосовых вокодерах, построенных на основе представления Хургина-Яковлева.

**Цель работы.** Разработка модификации итерационного алгоритма Фиенупа с целью восстановления речевой информации по прореженным отсчетам сигнала и его производной в кодеках РС на основе представления Хургина-Яковлева.

**Модификация алгоритма Фиенупа для отсчетов сигнала.** Алгоритм Фиенупа можно записать в виде совокупности операторов ограничения [1]:

$$f_{k+1} = Fu^{-1} \{ VzFu [ \mathcal{G}_\Sigma f_k ] \}, \quad (1)$$

где  $f_{k+1}$  и  $f_k$  – значения сигнала на  $k$ -й и  $k+1$ -й итерациях алгоритма,  $\mathcal{G}_\Sigma$  – суммарный оператор ограничений в пространственной области, учитывающий априорную информацию о свойствах сигнала,  $Fu$  и  $Fu^{-1}$  – операторы прямого и обратного преобразования Фурье, действие  $Vz$  сводится к замене модуля спектра на его известный модуль. Для восстановления изображений в качестве суммарного оператора ограничений в пространственной области выбиралось ограничение на неотрицательность решения, т.е. все отрицательные участки приравнивались к нулю.

Предлагаемая для обработки РС модификация алгоритма Фиенупа учитывает особенности РС, осуществляя ограничение в пространственной области по верхней и нижней границам сигнала. В качестве начального приближения выбирается сигнал, восстановленный по полученным отсчетам амплитудного и фазового спектров. Границы сигнала, исходя из априорных сведений о распределении спектральных характеристик, задают равными  $\pm 4$  СКО, что требует передачи только одного значения СКО. Ограничения в

пространственной области  $\mathfrak{D}_\Sigma$  можно записать в виде формулы:

$$f_{k+1}(t) = \begin{cases} f_{ka}(t) & ; \text{при } -\Delta_0 < f_k(t) < \Delta_0; \\ \Delta_0 & ; \text{при } f_k(t) > \Delta_0; \\ -\Delta_0 & ; \text{при } f_k(t) < -\Delta_0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $f_k(t)$ ,  $f_{ka}(t)$  – сигналы с учетом априорной информации и без учета априорной информации,  $\Delta_0$  и  $-\Delta_0$  – верхняя и нижняя границы РС, определяемые из статистических характеристик РС как  $\Delta = 4 \cdot \text{СКО}$ . В качестве начальной информации для такого алгоритма служат полученные на приемной стороне отсчеты амплитудного и фазового спектров, аппроксимированные с использованием полиномов Лагранжа первой степени, а также значение СКО передаваемого сигнала. Перед началом выполнения итерационного алгоритма Фиенупа по принятым отсчетам амплитудного спектра  $S_a(\omega_n)$  восстанавливаются другие отсчеты с помощью его аппроксимации с использованием полиномов Лагранжа первой степени, а по отсчетам фазового спектра квантованных с малой разрядностью осуществляется первое приближение фазового спектра  $S_{\theta}(\omega_n)$ . Затем выполняется модификация итерационного алгоритма Фиенупа, требующая на  $k$ -й итерации выполнения четырех элементарных операций.

1. Вычисляется преобразование Фурье: оценки сигнала, полученного на  $k-1$ -й итерации:  $S_k(\omega_n) = Fu[f_k^*(t_n)]$ .

2. Осуществляется замена вычисленного модуля преобразования Фурье полученным амплитудным спектром РС:  $S_{ka}(\omega_n) \leftrightarrow S_a(\omega_n)$ .

3. Производится обратное преобразование Фурье от полученного в результате первой операции фазового спектра и полученного на приеме амплитудного спектра:

$$f_k(t_n) = Fu^{-1}[S_a(\omega_n), S_{fk}(\omega_n)].$$

4. Осуществляется преобразование в  $k+1$ -ю оценку сигнала  $f_{k+1}$  в соответствии с формулой (2).

**Модификация алгоритма Фиенупа для представления Хургина-Яковлева.** В полосовом вокодере на основе представления Хургина-Яковлева осуществляется передача спектральных отсчетов амплитудного и фазового спектров прореженных отсчетов сигнала и производной в пределах критических полос, важных для восприятия РС. Значения критических полос были получены в результате экспериментальных исследований [6].

В системах, использующих представление

Хургина-Яковлева, возможно использование модификации алгоритма Фиенупа для отсчетов децимированного сигнала и производной для восстановления исходного РС. В качестве начальной информации при восстановлении децимированного сигнала и производной служат полученные на приемной стороне отсчеты амплитудного и фазового спектров, соответственно децимированных сигнала и производной, аппроксимированные с использованием полиномов Лагранжа первой степени, а также значение СКО передаваемого сигнала. При этом необходимо передавать СКО для отсчетов сигнала и производной. Ограничения для каждой итерации алгоритма Фиенупа для отсчетов сигнала и производной имеют вид:

$$f_{k+1}(2n) = \begin{cases} f_k(2n) & \text{при } -\Delta_1 < f_k(2n) < \Delta_1 \\ \Delta_1 & \text{при } f_k(2n) > \Delta_1 \\ -\Delta_1 & \text{при } f_k(2n) < -\Delta_1; \end{cases} \quad (3)$$

$$f'_{k+1}(2n) = \begin{cases} f'_k(2n) & \text{при } -\Delta_2 < f'_k(2n) < \Delta_2 \\ \Delta_2 & \text{при } f'_k(2n) > \Delta_2 \\ -\Delta_2 & \text{при } f'_k(2n) < -\Delta_2, \end{cases}$$

где  $\Delta_1$ ,  $-\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $-\Delta_2$  – верхние и нижние границы децимированного РС и его децимированной производной, определяемые из статистических характеристик РС как  $\Delta = 4 \cdot \text{СКО}$ .

Наряду с рассмотренной модификацией алгоритма Фиенупа для отсчетов децимированного сигнала и производной, в системах с применением представления Хургина-Яковлева целесообразно применение модификации алгоритма Фиенупа, аналогичной той, которая применяется в алгоритмах спектрального кодирования на основе теоремы В.А. Котельникова. Подобная модификация используется для восстановленного после фильтров Хургина-Яковлева РС и использует сведения о динамическом диапазоне исходного сигнала. Ограничение для такой модификации будет иметь вид (2).

**Экспериментальные исследования.** В результате экспериментальных исследований получены графики зависимости качества восстановленной речи (Кр) от количества итераций алгоритма (N), которые приведены на рисунке 1. Как видно из приведенных зависимостей, для применения в полосовом вокодере на основе представления В.А. Котельникова необходимо 5-6 итераций алгоритма Фиенупа (кривая 1). Для полосового вокодера на основе представления Хургина-Яковлева достаточно 3 итераций данного алгоритма (кривая 2). Дальнейшее увеличение качества восстановленной речи является незначительным и практически не воспринимается на слух.

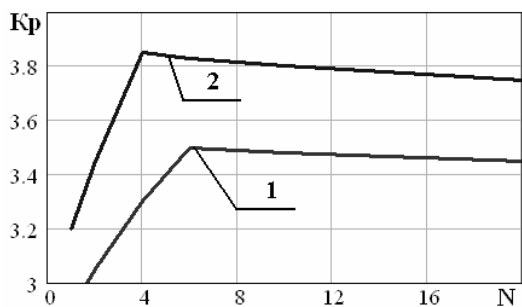
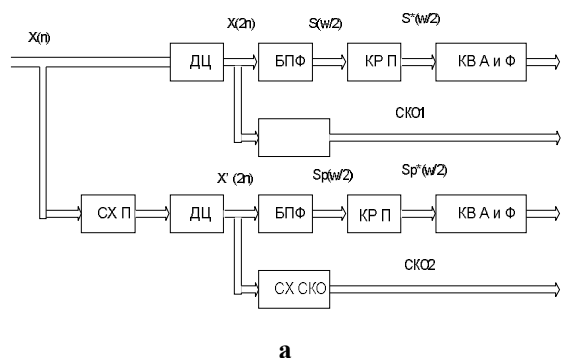
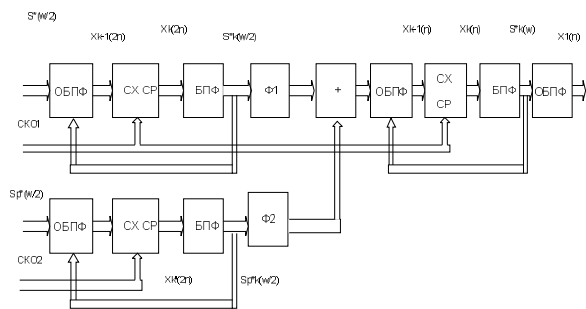


Рисунок 1

На рисунке 2 показана структурная схема реализации полосового вокодера (а – кодера, б – декодера) на основе предложенного итерационного алгоритма [7]. Блок-схема реализации данного алгоритма включает схему получения производной (СХ П), дециматора (ДЦ), осуществляющего децимацию отсчетов сигнала и производной, схему выделения критических полосок (КР П), квантователь отсчетов амплитудного и фазового спектра, схему сравнения (СХ СР), осуществляющую действие  $\mathcal{Q}_\Sigma$  алгоритма Фиенупа, а также первый и второй фильтры Хургина-Яковлева ( $\Phi_1, \Phi_2$ ).



а

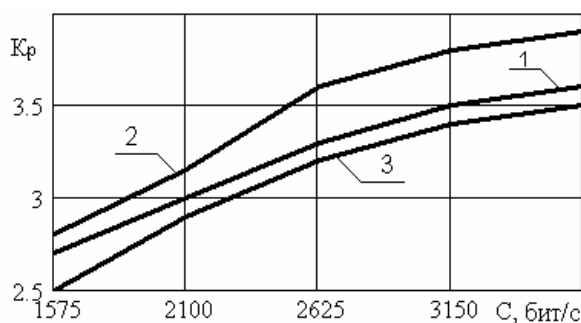


б

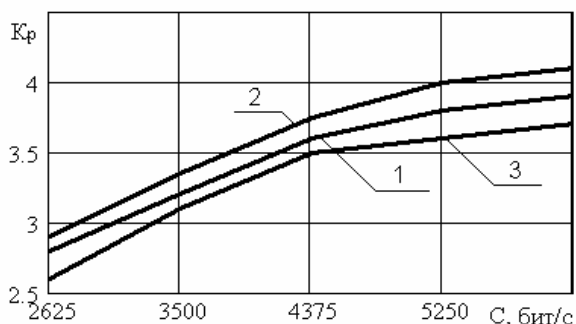
Рисунок 2

На рисунке 3 показаны зависимости качества восстановленного РС, построенные в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50840-95, от скорости передачи с отбросом пауз, составляющих по статистическим данным около 30 % речевого материала, с последующим восстановлением их на приемной стороне. Исследования производи-

лись для вокодера на основе представления Хургина-Яковлева без итерационного алгоритма - кривая 1, для алгоритма полосового вокодера на основе представления Хургина-Яковлева с использованием предложенной модификации алгоритма Фиенупа - кривая 2, а также для известного полосового вокодера на основе теоремы В.А. Котельникова - кривая 3. Зависимости приведены для совокупности дикторов, усредненные для 200 реализаций 10 дикторов, согласно ГОСТ Р 50840-95, при различном числе передаваемых спектральных отсчетов сигнала и производной (20 – рисунок 3, а и 12 – рисунок 3, б соответственно) и разрядности представления спектральных отсчетов, равной 3.



а



б

Рисунок 3

Как следует из приведенных зависимостей, применение предложенной модификации итерационного алгоритма Фиенупа позволяет получить выигрыш на 0,3 -0,4 балла согласно ГОСТ Р 50840-95 по сравнению с полосовым вокодером на основе представления Хургина-Яковлева и до 0,5 балла по сравнению с известным полосовым вокодером на основе теоремы В.А. Котельникова при скоростях передачи 2,1 – 4,8 кбит/с.

**Выводы.** Таким образом, предложена модификация алгоритма Фиенупа, позволяющая повысить качество в полосовом вокодеру на основе представления Хургина-Яковлева на 0,3-0,4 балла согласно ГОСТ Р 50840-95.

**Библиографический список**

1. *Василенко Г.И., Тараторин А.М.* Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986. - 304 с.
2. *Джайн А.К.* Успехи в области математических моделей для обработки изображений // ТИИЭР - Т69. № 5. - С.9-39.
3. *Светковский Р.Л.* Метод восстановления сигналов по модулю спектра // Радиотехника и электроника. 1995. - Т40. Вып.1. - С. 75-79.
4. *Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т.* Спектральные методы низкоскоростного кодирования речевых сигналов// Межвуз. сб. науч. тр. / Радиоэлектронные системы и устройства. Рязань: РГРТА, 1999. – С. 23-26.
5. *Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т.* Реализационные возможности и помехоустойчивость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина-Яковлева// Радиотехника. 2003. № 1. С. 73-75.
6. *Назаров М.В., Прохоров Ю.Н.* Методы цифровой обработки и передачи речевых сигналов. - М.: Радио и связь, 1985. - 176 с.
7. *Дмитриев В.Т.* Применение алгоритма Хургина-Яковлева в полосовом вокодере.// Межвуз. сб. науч. тр. / Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. Вып. 2. Рязань: РГРТА. 2003. – С. 115-118.