

## СЕГМЕНТАЦИЯ И ОБРАБОТКА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ УРОВНЕЙ

М. Н. Калимолдаев, О. Ж. Мамырбаев, Р. Р. Мусабаев, Ж. Н. Оразбеков

Институт проблем информатики и управления Министерства образования и науки  
Республики Казахстан, 050010, Алма-Ата, Казахстан

---

УДК 519.7

Для обнаружения изменения сигналов временные признаки более надежны, чем стандартная доменная методика вектора признаков. Представлен метод, основанный на средней частоте пересечения уровней, с целью выявления значительных временных изменений сигнала, представляющий интерес для специалистов в области слуховых моделей. В данной методике, распределяющей уровни, используется адаптационная схема распределения уровней в зависимости от отношения сигнал/шум. Проведено сравнение показателей сегментации с ручной фонетической сегментацией, а также с результатами, полученными на основании изучения сегментации максимальной вероятности для предложений. Метод средней частоты пересечения уровней соответствует наиболее приемлемым показателям сегментации без предварительного знания количества сегментов как в сегментации максимальной вероятности.

**Ключевые слова:** распознавание речи, средняя частота пересечения уровней, сегментация речи.

We explore new methods of determining automatically derived units for classification of speech into segments. For detecting signal changes, temporal features are more reliable than the standard feature vector domain methods. Motivated by auditory models, we have presented a method based on average level crossing rate (ALCR) of the signal, to detect significant temporal changes in the signal. An adaptive level allocation scheme has been used in this technique that allocates levels, depending on the signal. We compare the segmentation performance to manual phonemic segmentation and also that provided by Maximum Likelihood segmentation for sentences. The ALCR method matches the best segmentation performance without a priori knowledge of number of segments as in ML segmentation.

**Key words:** speech recognition, average frequency of level crossing, speech segmentation.

**Введение.** В 1960-х годах Д. Р. Редди [1] разработал схему речевой сегментации, используя изменение уровней интенсивности и число подсчетов перехода сигнала через нуль, при этом были получены другие программные параметры на основе визуального осмотра формы колебаний сигнала. В последнее время используются спектрограммы [2] иерархической акустической сегментации непрерывной речи. Ван Гемерт [3] использовал измерение внутрикадровой корреляции между спектральными признаками для получения однородных сегментов. Для сегментации также использовалось статистическое моделирование (AR, ARMA) [4] речи путем обнаружения последовательных резких изменений параметров модели. Автоматическая фонетическая сегментация, основанная на скрытой Марковской модели [5], требует данных углубленного обучения, однако они сообщили об очень высокой степени

точности сегментации. Общераспространенная методика на основе вектора признаков для речевой сегментации — это спектральное измерение перехода и сегментация максимальной вероятности [6]. Из спектральных доменных методов широко используется максимальная вероятность для сегментации телефонного уровня.

Вследствие коартикуляционных эффектов спектральный переход через границы некоторых фонем нечетко определен в сигнале, и начинают отчетливо появляться границы фонем в пределах предыдущих фонем. Вопрос, таким образом, заключается в том, не упускаем ли мы полезную временную информацию, когда работаем в спектральной области. Кроме того, остается нерешенным вопрос относительно того, до какой степени будут шумоустойчивы спектральные признаки. Было доказано, что максимальная концентрация свободных носителей служит в качестве набора помехоустойчивых параметров для речевой сегментации [7]. Мы хотели бы сравнить свой метод представления во временной области со спектральными доменными методами (используя максимальную концентрацию свободных носителей) для автоматической сегментации. Поскольку во временной области больше информации, исследован подход с представлением во временной области, который предусматривает использование признака, восприимчивого к изменениям как амплитуды, так и частоты сигнала. Частота пересечения уровней является таким признаком и обосновывается на основании анализа человеческого слуха. Считается, что нейтральное преобразование (трансдукция) на выходе передней части ушного лабиринта имеет форму детекторов пересечения уровней. Данный подход был использован Гитцей [8] для разработки шумоустойчивого препроцессора с целью распознавания речи. В его работе была предложена модель сводной поинтервальной гистограммы в качестве внутреннего представления, откуда извлекается спектральная информация. Хотя модель сводной поинтервальной гистограммы логически вытекает из подхода разделения полосы частот сигнала, мы будем использовать сигнал с полной полосой частот во временной области.

**Процесс образования речи.** Речь состоит из последовательности звуков. Звуки и переходы между ними служат символическим представлением информации. Порядок следования звуков определяется правилами языка. Изучение этих правил и их роли в общении между людьми составляет предмет лингвистики, анализ и классификация самих звуков речи — предмет фонетики. Таким образом, прежде чем подробно рассматривать математические модели речеобразования, уместно обсудить основные группы звуков речи.

Звуки речи могут быть разделены на три четко выраженные группы по типу возбуждения. Вокализованные звуки образуются проталкиванием воздуха через голосовую щель, при котором периодически напрягаются и расслабляются голосовые связки и возникает квазипериодическая последовательность импульсов потока воздуха, возбуждающая голосовой тракт. Фрикативные или невокализованные звуки генерируются при сужении голосового тракта в каком-либо месте и проталкивании воздуха через суженное место со скоростью, достаточно высокой для образования турбулентного воздушного потока. При произнесении взрывных звуков голосовой тракт полностью закрывается и смычкой возникает повышенное сжатие воздуха. Затем воздух внезапно высвобождается.

Гласные образуются при квазипериодическом возбуждении голосового тракта неизменной формы импульсами воздуха, возникающими вследствие колебания голосовых связок. Каждому гласному звуку может быть поставлена в соответствие форма голосового тракта, характерная для его произношения.

**Сегментация с использованием информации о средней частоте пересечения уровней.** Определим среднюю частоту пересечения уровней на точке, отобранной в каче-

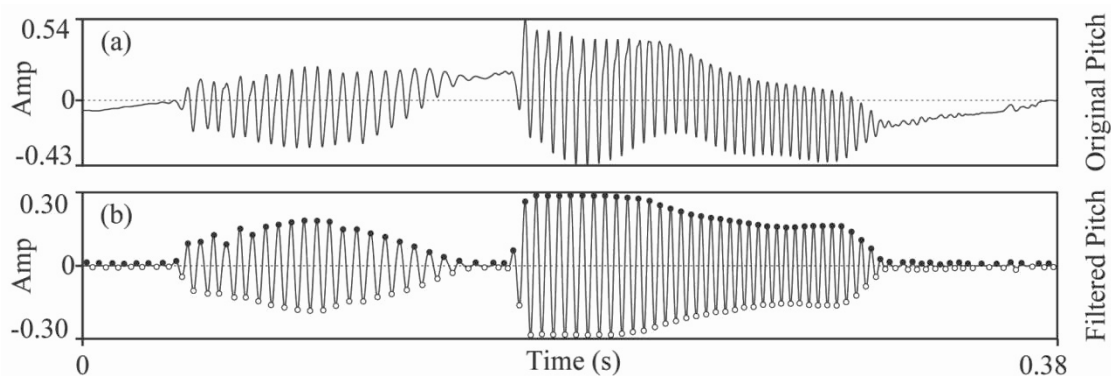


Рис. 1. Средняя частота пересечения уровней, нанесенная на форму сигнала, делает более заметными точки изменения сигнала

стве примера, и для определенного уровня как общей суммы всех уровневых пересечений, которые возникают в отношении данного уровня в течение короткого промежутка времени вокруг выбранной точки, поделенной на длительность промежутка времени (интервала). На основе информации 2D уровневой скорости перехода сигнала получаем среднюю частоту пересечения уровней на каждой точке за счет суммирования частоты пересечения на всех уровнях. Обоснование использования временной информации для сегментации заключается в том, что во время перехода от одной фонемы к следующей фонеме, в большинстве случаев отмечается заметное изменение в конфигурации речевого тракта. Предположим, данная точка изменения должна быть выражена через углубление в длину в кривой средней частоты пересечения уровней. Когда сигнал одной фонемы затихает для того, чтобы уступить место другому, данное изменение четко проявится благодаря значительному изменению как амплитуды, так и частоты, и кривая средней частоты пересечения уровней, восприимчивая к обоим указанным параметрам, сможет позволить отслеживать такие изменения. После расчета средней частоты пересечения уровней выравниваем ее, используя фильтр скользящего среднего значения для удобства определения границ сегментов. На рис. 1 показано, как средняя частота пересечения уровней позволяет описать изменения свойств формы сигнала.

Рассмотрим пример синтетического сигнала на рис. 1. Данный сигнал показывает изменения амплитуды и частоты. Отметив точки изменения кривой средней частоты пересечения уровней, а затем применив ограничения продолжительности (как выполняется для речевой сегментации), можно ясно различить границы сегментов, помеченные черным цветом.

**Общее представление о сегментации на основе средней частоты пересечения уровней.** Используем среднюю частоту пересечения уровней для обнаружения изменений модели сигнала. Для применения уровневого перехода на сигнале необходимо остановиться на распределении уровней. В проведенных экспериментах использовано как равномерное, так и неравномерное распределение уровней.

В целом, амплитуда речевого сигнала  $x[n]$  вытекает из лапласовского pdf-уровня, при этом изменения фонем отображаются в пределах определенного сигнала. На основе опыта отмечается, что в отношении сигнала амплитуда колеблется таким образом, что  $CDFP(X \leq x)$  находится в пределах  $[0, 90, 0, 99]$ ,  $[0, 01, 0, 10]$ , наиболее полезных для обнаружения изменений фонем. В pdf-зависимой схеме распределяем больше уровней в области увеличенных фонемных изменений для обнаружения более незначительных изменений сигнала. Помимо этого, средняя частота пересечения уровней будет восприимчива к шуму, и посредством

Таблица

Показатели сегментации при средней частоте пересечения уровней и другие доменные методы

Метод	SNR (дБ)	M (%)	I (%)	D (%)	S (%)
ML	36	80,8	18,8	19,2	50,8
STM	36	70,1	25,2	29,9	34,1
U-LCR	36	78,6	22,8	21,4	44,2
NU-LCR	36	79,8	24,2	20,2	44,5
NU-LCR1	36	84,4	33,2	15,6	45,0
ML	20	78,8	20,8	21,2	46,8
STM	20	68,1	27,1	31,9	31,5
U-LCR	20	72,0	22,9	28,0	40,2
NU-LCR	20	77,6	25,7	22,4	43,2
NU-LCR1	20	79,0	36,0	21,0	39,8
ML	10	73,3	23,8	26,7	41,6
STM	10	65,0	30,2	35,0	28,0
U-LCR	10	69,7	24,9	30,3	37,9
NU-LCR	10	74,2	29,9	25,8	42,4
NU-LCR1	10	77,9	51,0	22,1	27,8
ML	5	70,6	26,4	29,4	38,5
STM	5	63,1	32,2	36,9	27,4
U-LCR	5	67,1	30,7	32,9	36,9
NU-LCR	5	71,2	39,9	28,8	37,7
NU-LCR1	5	65,9	55,0	34,1	23,8

Примечание: SNR — отношение сигнал/шум; STM — спектральное измерение перехода; ML — максимальная вероятность; LCR — частота пересечения уровней; ULCR — метод средней частоты пересечения уровней с равномерным распределением уровней; NU-LCR — метод средней частоты пересечения уровней с неравномерным распределением уровней (оба метода предусматривают использование схемы шумоустойчивости); NU-LCR1 — метод NU-LCR без схемы шумоустойчивости

выполнения pdf-оценки сигнала и шума проведена попытка включить степень шумоустойчивости в предлагаемую методику. С целью подтверждения данного наблюдения выполнено сравнение схемы средней частоты пересечения уровней с включением и без включения шумоустойчивости, результаты сравнения приведены в таблице. После рассмотрения вопроса распределения уровней и вопроса шумоустойчивости, обнаруживаются пересечения уровней в пределах окна вокруг каждого образца и для всех уровней. Таким образом, выполняется преобразование информации временной области для пространства нового признака, представленного на каждой точке своей средней частоты пересечения уровней. Для сегментации необходимо собрать долины от кривой средней частоты пересечения уровней, которая имеет грубый контур. Для удаления ложных долин применяется среднее сглаживание на кривой средней частоты пересечения уровней.

**Алгоритм сегментации на основе средней частоты пересечения уровней.** Алгоритм сегментации можно описать следующим образом.

1. Входной сигнал:  $x[n]$ , нормализуемый для расположения в пределах  $[-1, 1]$ , а затем превращаемый в нулевое значение.

2. Уровни  $n_j (1 \leq j \leq J)$ , где  $J$  — общая сумма уровней, могут распределяться с использованием следующих схем:

а) равномерное распределение уровней для покрытия всего динамического диапазона сигнала;

б) pdf-зависимое, неравномерное распределение уровней.

Для неравномерного распределения уровней выбираем  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и  $\lambda_4$  на основе pdf эмпирического сигнала таким образом, что

$$F_s(\lambda_1) = 0,01, \quad F_s(\lambda_2) = 0,10, \quad F_s(\lambda_3) = 0,90, \quad F_s(\lambda_4) = 0,99.$$

Здесь  $F_s(x)$  означает CDF сигнал при значении  $x$ . Гистограмма речевых данных взята в виде приближенного значения pdf. Обычно отношение сигнал/шум речи оценивается путем использования шумового изменения областей паузы. Обозначим как  $min$  и  $max$  минимальные и максимальные значения сигнала соответственно. На основе предложений TIMIT установлено, что изменения фонем редко имеют место в сигнале диапазонов  $[\lambda_4, max]$  и  $[min, \lambda_1]$ . Следовательно, определяем меньшее количество уровней для данных диапазонов. Относительно взрывных согласных звуков изменения происходят в основном для значений, приближенных к нулю. Таким образом, изменения уровней в  $[\lambda_2, \lambda_3]$  имеют важное значение. Тем не менее, уровни в данном диапазоне также восприимчивы к шуму. Благодаря распределению большего количества уровней можно обнаружить все незначительные временные изменения за счет ложных вставок. Изменения сигнала наиболее заметны в диапазонах  $[\lambda_1, \lambda_2]$  и  $[\lambda_3, \lambda_4]$ , и таким образом распределяем здесь большее количество уровней. Кроме того, данные уровни более шумоустойчивы. На рис. 2 показано сравнение гистограмм сигнала и шума для определения диапазона амплитуд, в котором pdf шума является преобладающим.

Для отношения сигнал/шум, равного 10 дБ, распределяем 3, 20, 4, 20 и 3 уровня для данных диапазонов. Хотя не достигнуто оптимальное распределение уровней для определенного отношения сигнал/шум, предполагаем, что распределение уровней должно быть адаптационным в зависимости от отношения сигнал/шум. Для более низкого отношения сигнал/шум используем меньшее количество уровней для избегания ложных вставок за счет упущения некоторых временных изменений. Для более высокого отношения сигнал/шум сокращаем пространство уровней и распределяем больше уровней в  $[\lambda_1, \lambda_2]$  и  $[\lambda_3, \lambda_4]$  для обнаружения мелких изменений. Аналогичным образом, для схемы равномерного распределения может использоваться большее количество уровней при высоком отношении сигнал/шум для обнаружения мелких изменений. Для отношения сигнал/шум 5–10 дБ консервативно используются 13–25 уровней для снижения ошибок вставок за счет уменьшенного соответствия сегментов.

**Схема шумоустойчивости.** Находим pdf фоновой амплитуды на основе гистограммы сигнала, рассчитанного с учетом первоначальной части молчания.

Выбираем  $\varepsilon_1 (\leq 0)$  и  $\varepsilon_2 (\geq 0)$  таким образом, что

$$f_s(\varepsilon_1) = fn(\varepsilon_1), f_s(\varepsilon_2) = fn(\varepsilon_2).$$

Здесь  $fs(x)$  и  $fn(x)$  означают pdf сигнала и шума соответственно при значении  $x$ . Будем избегать уровней в диапазоне  $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$  для расчета средней частоты пересечения уровней.

3. Для каждой выборки  $x[n]$ , а также уровня  $n_j$ , пересечение уровня  $\ell(j, n)$  произошло между  $x[n-1]$  и  $x[n]$ , если  $(x[n] - n_j)(x[n-1] - n_j) < 0$ ;

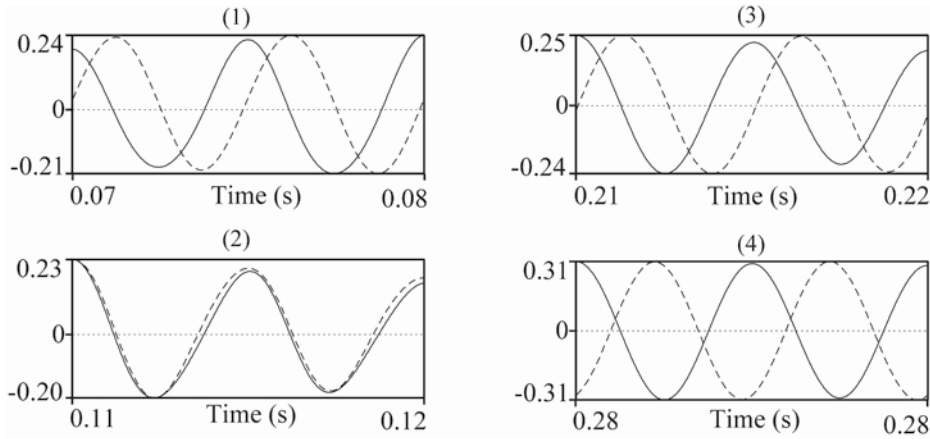


Рис. 2. Путем сравнения гистограмм сигнала и шума определяется диапазон амплитуд, в котором pdf шума является преобладающим

$$l(j, n) = \begin{cases} 1 & \text{если условие выполнено} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}.$$

4. Определяем частоту пересечения уровней  $L(j, n)$  для каждого уровня  $n_j$  при точке выборки  $n$  как

$$L(j, n) = \sum_{m=n-\Delta}^{n+\Delta} l(j, m). \quad (1)$$

Интервал  $\Delta$  выбран таким образом, что  $2\Delta$  приблизительно равно одному периоду тона и не требуется точной оценки тона. Высота тона женского голоса находится в диапазоне 200–300 дБ. В отношении сигнала, выбранного при 16 КГц, один период тона будет соответствовать 80–53 выборкам. Таким образом, рассчитаны пересечения уровней в интервале 100 выборок (более одного периода тона).

5. На основе 2D представления частоты пересечения уровней  $L(j, n)$  можно получить среднюю частоту пересечения уровней  $[n]$  для всех уровней:

$$E[n] = \sum_{j=1}^J L(j, n). \quad (2)$$

Можно выровнять среднюю частоту пересечения уровней, используя либо линейный, либо нелинейный фильтр. Простой фильтр скользящего среднего с учетом  $[n]$  можно определить как:

$$\mathbf{E}[n] = \sum_{m=-10o}^{10o} E[n - m]. \quad (3)$$

6. После получения вектора  $\mathbf{E}[n]$ , собираем его значительные длины и таким образом оцениваем количество сегментов. Для сбора длин используются следующие речевые свойства:

- а) минимальная продолжительность сегмента 12 мс;
- б) длина должна служить в качестве местного минимума в пределах интервала в 20 мс.

На основе участков  $\mathbf{E}[n]$  было отмечено, что фонемные изменения могут происходить в точках значительного изменения уклона  $\mathbf{E}[n]$ , который может не быть чистыми длинами. Устанавливаем предел допуска  $tol$  для смягчения критерия выбора длин.

Если  $\mathbf{E}[n] > (1 + tol)(\mathbf{E}[n_i])$ , то  $x[n]$  не является длиной. Здесь  $n_i$  является любой точкой в интервале 20 мс, имея  $n$  в виде своей центральной точки и используя  $tol=0,05$ . Более высокие значения  $tol$  станут причиной возникновения ложных ставок в одиночной области высокой энергии или высокой частоты, которая может иметь высокое значение  $\mathbf{E}[n]$  с некоторыми прерывистыми краями в кривой  $\mathbf{E}[n]$ .

**Эксперименты и результаты.** Параметры максимальной концентрации свободных носителей обеспечивают наиболее шумоустойчивый признак для сегментации [7]. Для расчета максимальной концентрации свободных носителей использовали длину окна анализа 20 мс и смещение окна 10 мс. Для сравнения показателей сегментации на основе средней частоты пересечения уровней выбраны два спектральных доменных метода:

- 1) сегментация максимальной вероятности с использованием максимальной концентрации свободных носителей с симметричным лифтером, предложенной в [7];
- 2) спектральное измерение перехода с использованием вектора признака и комбинации лифтера в (2).

Эксперименты проводились на 100 предложениях ( $Fs=16$  КГц) на основе базы данных ТИМТ из 10 женских голосов. Речевые данные имеют отношение сигнал/шум 36 дБ в среднем в отношении фонового шума в областях молчания. Повторяем эксперимент с шумовой речью с отношением сигнал/шум — 20, 10 и 5 дБ. Для сегментации максимальной вероятности (безо всякого ограничения продолжительности), используя максимальную концентрацию свободных носителей как векторов признака, допускаем то же самое количество сегментов, как предусмотрено базой данных ТИМТ. Спектральное измерение перехода требует глобального определения порога; для того, чтобы обойти данную проблему, нами использовано спектральное измерение перехода с тем же количеством сегментов, как предусмотрено ТИМТ, и только то количество наибольших пиков обнаружено для сегментации. Если полученная граница находится в пределах  $\pm 20$  мс границы ТИМТ, назовем это “соответствием” (M). В случае соответствия двух последовательных границ считаем это соответствием сегмента (S). Кроме того, отмечаются вставки (I) и удаления (D), сохраняя ограничения  $\pm 20$  мс.

Очевидно, что сегментационная точность метода средней частоты пересечения уровней выше спектрального измерения перехода, но ниже максимальной вероятности. Можно отметить, что методика средней частоты пересечения уровней не предусматривает использования количества информации о сегментах, в отличие от максимальной вероятности или спектрального измерения перехода, и, тем не менее, обеспечивает показатели, сравнимые с наиболее приемлемыми показателями, т. е. с максимальной вероятностью. Данные показатели устойчивы даже при низком отношении сигнал/шум в 5 дБ. Важность схемы шумоустойчивости очевидна при сравнении результатов NU-LCR и NU-LCR1. NU-LCR1 показывает более высокие ложные вставки, которые существенно увеличиваются при низком отношении сигнал/шум. Для более низкого отношения сигнал/шум, поскольку  $\mathbf{E}[n]$  увеличивается вследствие увеличенных пересечений уровней близко к нулю (как очевидно, на основе лапласовского pdf-сигнала, а также из-за шума), контуры  $\mathbf{E}[n]$  максимально повышаются даже при обнаружении в точках неотчетливого изменения фонем и ложных долин. При сравнении схем U-LCR и NU-LCR видно, что точность соответствия подходит больше для NU-LCR, но это происходит за счет более высоких ошибок, которые становятся более заметными при более низком отношении сигнал/шум. В NU-LCR распределяем больше уровней в диапазонах

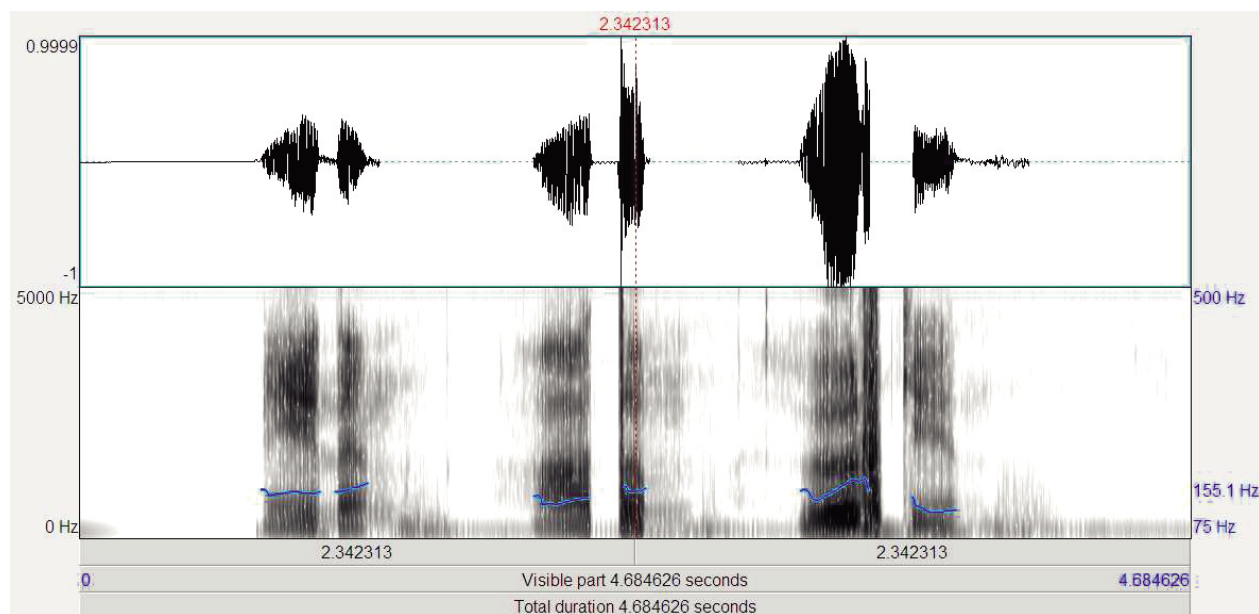


Рис. 3. Сравнение ручной границы (ручного управления) и границы средней частоты пересечения уровней сигнала

$[\lambda_1, \lambda_2]$  и  $[\lambda_3, \lambda_4]$ , и когда межуровневое пространство уменьшается, благодаря шуму можно обнаружить дополнительные пересечения уровней. В U-LCR, когда уровни размещаются везде равномерно, восприимчивость к шуму снижается.

Представляем спектрограмму и график сигнала во временной области (рис. 3, 4) ('sal.wav') наряду с  $E[n]$  сигнала, который именуется средневыровненной средней частотой пересечения уровней на графиках. На рисунках показан анализ для двух частей предложения: 1–2 с и 2–3 с отдельно. Каждый рисунок состоит из трех графиков, которые представлены следующим образом.

Временные изменения сигнала могут четко определяться посредством метода средней частоты пересечения уровней, а сегменты аналогичны тем, которые получены благодаря визуальной проверке формы сигнала. Гласные и дифтонги имеют высокую энергию, в то время как фрикативные согласные имеют более высокое содержание частоты. Назальные и взрывные согласные звуки имеют низкую энергию. Следовательно, с учетом средней частоты пересечения уровней данные фонемы можно легко сегментировать. Например, взрывные согласные звуки можно получить посредством метода средней частоты пересечения уровней (/d/ 1,05 с, /d/ 1,22 с, /k/ 1,49 с, /g/ 2,08 с). Благодаря схеме шумоустойчивости, пересечения уровней возле нуля не учитываются, таким образом упускается возможность обнаружения смычек (закрытий). Колебания сигнала в пределах фонемного сегмента могут вызывать ошибки вставки (/s/ 1,6 с, /s/ 2,3 с).

**Заключение.** Представленная методика сегментации слуховой обработки в обоснованной временной области действует так же успешно, как и самая приемлемая сегментация максимальной вероятности.

В данную методику была включена схема адаптивного распределения уровней и шумоустойчивости. Второй подход требуется для обнаружения тех границ фонем, которые не связаны с отмеченным изменением контура средней частоты пересечения уровней. Данная методика может дальше совершенствоваться с использованием методики нелинейной обработки, а именно со средним фильтрованием и 2D анализом информации о пересечении уровней.

## Список литературы

1. КАЛИМОЛДАЕВ М. Н., АЛИМНАН К., МУСАБАЕВ Р. Р., МАМЫРБАЕВ О. Ж. Один из методов сегментации речевого сигнала на слоги / Материалы 6-й Международной научно-методической конференции "ММ ИТОН". Алма-Ата, 2013. Т. 1. С. 171–176.
2. REDDY D. R. Segmentation of Speech Sounds // J. Acoust. Soc. Am. 1966. V. 40. N. 2. P. 307–312.
3. GLASS J. R., ZUE V. W. Multi-level acoustic segmentation of continuous speech // Proc. of ICASSP, 1988. P. 429–432.
4. НЕМЕРТ J. P. Automatic Segmentation of Speech // IEEE Trans. on Signal Proc., Apr. 1991. V. 39. N. 4. P. 1008–1012.
5. ANDRE-OBRECHT R. Automatic Segmentation of Continuous Speech Signals / Proc. of ICASSP. Tokyo, 1986. P. 2275–2278.
6. TOLEDANO D. T., HERNANDEZ GOMEZ L. A., GRANDE L. V. Automatic Phonetic Segmentation" // IEEE Trans. Speech and Audio Proc. Nov. 2003. V. 11. N. 6. P. 617–625.
7. SVENDSEN T., SOONG F. K. On the Automatic Segmentation of Speech Signals // Proc. of ICASSP. Dallas, 1987. P. 77–80.
8. SAIJAYRAM A. K. V., RAMASUBRAMANIAN V., SREENIVAS T. V. Robust parameters for automatic segmentation of speech // Proc. of ICASSP. May, 2002. P. 513–516.
9. GHITZA O. Auditory Models and Human Performance in Tasks Related to Speech Coding and Speech recognition // IEEE Trans. Speech and Audio Proc. Jan. 1994. V. 2. N.1. P. 115–132.

*Калимолдаев Максат Нурадилович — д-р физ.-мат. наук, проф.,  
директор Института проблем информатики и управления  
Министерства образования и науки Республики Казахстан;  
Мамырбаев Оркен Жумажанович — науч. сотр. Института  
проблем информатики и управления Министерства образования и науки  
Республики Казахстан; e-mail: torkenj@mail.ru;  
Мусабаев Рустам Рафикович — канд. техн. наук, зав.  
лабораторией Института проблем информатики и управления  
Министерства образования и науки Республики Казахстан;  
Оразбеков Жасулан Нурлесулы — науч. сотр. Института  
проблем информатики и управления Министерства  
образования и науки Республики Казахстан.*

Дата поступления — 29.11.2013