

2. Agrawal, R. Fast algorithm for mining association rules [Текст] – L.: Proc. 20th Int. Conf. Very Large Data Bases, 1994. – 487 p.
3. Classic [Электронный ресурс] / K. Readman. – Режим доступа: ftp://ftp.cs.cornell.edu/pub/smart/ – 7.11.2002 p. – Загол. з екрану.
8. Вапник, В. Н. Теория распознавания образов [Текст] / В. Н. Вапник, А. Я. Червоненкис. – М.: Наука, 1974. – 598 с.
9. Прикладна статистика: класифікація й зниження розмірності [Текст] / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Фінанси й статистика, 1989. – 457 с.

Запропонований інтегральний скалярний показник якості передачі мовних сигналів в пакетних мережах з втратами, заснований на пофонемному спектральному аналізі. На основі введеного показника досліджена залежність якості передачі мови від параметрів мережі

Ключові слова: пофонемний короткочасний спектральний аналіз мовних сигналів, мережевий емулятор

Предложен интегральный скалярный показатель качества передачи речевых сигналов в пакетных сетях с потерями, основанный на пофонемном спектральном анализе. На основе введенного показателя исследована зависимость качества передачи речи от параметров сети

Ключевые слова: пофонемный кратковременный спектральный анализ речевых сигналов, сетевой эмулятор

A proposed integrated scalar index of quality of voice signals over packet networks with losses, based on spectral analysis of speech signals

Through the introduction parameters the dependence of voice quality from the network properties has been researched

Keywords: spectral analysis of speech signals, the network emulator

УДК 621.391

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОФОНЕМНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЧЕВЫХ ФРАГМЕНТОВ В IP – СЕТЯХ

С.М. Бобрицкий

Заведующий лабораторией
Харьковский институт судебных экспертиз
им. засл. проф. Н.С. Бокариуса
ул. Золочевская, 8а, г. Харьков, Украина, 61177
Контактный тел.: (057) 777-67-33
E-mail: Bobriski@hniise.gov.ua

М.Ю. Ощепков

Доцент*
Контактный тел.: (057) 702-13-20
E-mail: Oshchepkov@kture.kharkov.ua

В.Е. Саваневич

Доктор технических наук, доцент, профессор*
*Кафедра телекоммуникационных систем
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166
Контактный тел.: (057) 702-55-92
E-mail: Domsv1@rambler.ru

1. Введение

Одним из основных составляющих трафика современных IP –сетей является передача речи в режиме

коммутации пакетов [1, 2, 3, 4]. При этом проблемным при организации передачи речи в реальном масштабе времени, является удовлетворение повышающихся со временем требований к качеству.

2. Постановка проблемы

Необходимо определить совокупность параметров частотного спектра речевых сигналов, на их основе предложить интегральный скалярный показатель качества передачи речи пакетными сетями. Дополнительно необходимо разработать натурный макет фрагмента сети передачи речевого трафика. В дальнейшем, на основе предложенного интегрального показателя, с использованием разработанного макета показать возможность проведения экспериментальных исследований зависимости качества передачи речи в пакетных сетях с потерями от коэффициента потерь пакетов, средней одноконцевой задержки, джиттера сетевых задержек.

3. Анализ современных исследований и публикаций

Существует достаточно большое количество наборов показателей качества передачи голоса. Это такие как QoS (Quality of Service), TOS, R-фактор и другие [5, 6, 7, 8]. Однако ни один из них не лишен недостатков. Вместе с тем в литературе мало внимания уделено анализу параметров частотного спектра речевых сигналов и их изменению при прохождении трактов передачи систем пакетной связи с потерями. Связано это, скорее всего, с необходимостью использования большого количества данных параметров.

Обычного преобразования Фурье речевых сигналов не существует [9]. Стандартное Фурье-представление, вполне пригодное для периодических, импульсных или стационарных случайных сигналов, неприменимо к речевому сигналу, спектральные характеристики которого меняются во времени [10, 11]. Данные изменения сравнительно медленные. Практически всегда истинным является предположение о том, что спектральные характеристики речевых сигналов даже можно считать постоянными на интервалах времени около 10–30 мс. Это предположение приводит к методам кратковременного (короткомасштабного) анализа, в котором сегменты речевого сигнала выделяются и обрабатываются так, как если бы они были короткими участками отдельных звуков (фонем) с отличающимися свойствами. Процедура повторяется так часто, как это требуется. Сегменты, которые называют окнами, обычно пересекаются. Результатом обработки на каждом интервале является число или совокупность чисел. Подобная обработка приводит к новой, зависящей от времени последовательности, которая может служить характеристикой речевого сигнала. Кратковременный Фурье-анализ описывается выражением:

$$\begin{aligned} \dot{S}_n(\omega) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \gamma(n-m)x(m)e^{-j\omega m} = \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \gamma(m)x(n-m)e^{-j\omega m}, \end{aligned}$$

где $\gamma(m)$ – функция временного окна;

$x(m)$ – цифровая последовательность, соответствующая речевому сигналу;

ω – циклическая (круговая) частота.

Цифровая последовательность, соответствующая речевому сигналу, умножается на последовательность

значений временного окна (веса функции), расположенную во времени в соответствии с индексом n . Результаты затем суммируются по всем ненулевым значениям. Обычно, не всегда, последовательность ненулевых значений временного окна имеет конечную протяженность. В любом случае функция временного окна выделяет часть входного сигнала в окрестности n -го момента времени.

Кратковременное преобразование Фурье можно интерпретировать как сглаженное преобразование Фурье для части сигнала, попавшего в окно и являющееся функцией времени и частоты.

В настоящее время известно большое количество разных типов временных окон спектрального оценивания. Каждое из них характеризуется большим перечнем параметров. В зависимости от приложения обычно выбирается тот или иной тип окна. Существует два наиболее часто используемых типа временных окон спектрального оценивания: прямоугольное и Хемминга. Формальное определение всех этих окон имеет следующий вид:

а) прямоугольное окно:

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

б) окно Хемминга:

$$\gamma(t) = \begin{cases} 0,54 - 0,46 \cos(2\pi t / T), & \text{если } -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Большинство исследователей предпочитают использовать временные окна, которые имеют малую скорость спада амплитуды ложных локальных максимумов, при предельно малых самых мощных ложных локальных максимумах (артефактах). Одним из таких окон является окно Хемминга, параметры которого подобраны так, что величина самого мощного бокового лепестка не превышает -43 дБ, но при этом скорость спада максимумов остальных лепестков пропорциональна ω^{-1} .

4. Параметры кратковременного частотного спектра речевых сигналов

Цифровую последовательность $x(n)$, представляющую голосовой сигнал, можно точно восстановить по кратковременному преобразованию Фурье, дискретизированному по времени и частоте. Это возможно, например, методом суммирования выходов гребенки N полосовых фильтров с центральными частотами

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N}, \quad k=0,1,\dots,N-1$$

и импульсными характеристиками

$$h_k(n) = \gamma_k(n)e^{j\omega_k n}$$

где $\gamma_k(n)$ – временное окно, используемое на частоте ω_k .

Выход k -го полосового фильтра $y_k(n)$ может быть представлен выражением:

$$\gamma_k(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n-m)h_k(m)$$

Амплитуда речевого сигнала существенно изменяется во времени. В частности, амплитуда невокализованных сегментов речевого сигнала значительно меньше амплитуды вокализованных сегментов. Подобные изменения амплитуды хорошо описываются с помощью функции кратковременной энергии

$$E_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (\gamma(n-m)x(m))^2,$$

где $\gamma(n)$ – функция временного окна.

Распределение энергии речевых сигналов по частотам также изменяется во времени и достаточно полно описывается совокупностью значений энергии сигналов на выходе описанных ранее полосовых фильтров:

$$E_{nk} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (x(n-m)h_k(m))^2.$$

Если полосы частот фильтров не пересекаются, полосовые фильтры идеальные, частота верхней границы предыдущего фильтра равна частоте нижней последующего фильтра, то сумма значений по всем k будет равна. Однако это не так. Поэтому для усреднения вместо энергии речевого сигнала на момент n (кратковременной энергии речевого сигнала в n -м временном окне) E_n используют приближенное значение E_{ncp} :

$$E_{ncp} = \sum_{k=1}^{N_k} E_{nk},$$

где N_k – количество полосовых фильтров в гребенке.

При вычислении интегральных признаков амплитудно-частотного спектра речи данные временного окна (спектрального среза) не используются, если оценка кратковременной энергии речевых сигналов в n -м временном окне меньше некоторого порога отбраковки E_{0cp} . Величина порога устанавливается исходя из распределения вероятностей энергий E_{ncp} на анализируемом речевом сигнале так, чтобы из распределения вероятностей E_{ncp} отбросить низкоэнергетические временные фрагменты.

Амплитудно-частотный спектр речи в ее цифровом представлении характеризуется также следующими параметрами.

Среднее значение энергии речевого сигнала в k -м частотном канале (k -м полосовом фильтре):

$$E_{fcp} = \frac{1}{N_{tw}} \sum_{k=1}^{N_k} E_{nk},$$

где N_{tw} – общее количество временных отсчетов (временных окон) на анализируемом отрезке временного сигнала.

Относительное среднее значение энергии речевого сигнала в k -м частотном канале (k -м полосовом фильтре):

$$\overline{E_{fk}} = \frac{E_{fcp}}{N_k}; \quad \left(\sum_{k=1}^{N_k} \overline{E_{fk}} = 1 \right).$$

Нормированное относительное среднее значение энергии речевого сигнала в k -м частотном канале (k -м полосовом фильтре):

$$\overline{E_{normfk}} = \frac{\overline{E_{fk}}}{dE_{fk}};$$

$$dE_{fk} = \overline{E_{fk-3}} + \overline{E_{fk-2}} + \overline{E_{fk-1}} + \overline{E_{fk}} + \overline{E_{fk+1}} + \overline{E_{fk+2}} + \overline{E_{fk+3}}.$$

При использовании гребенки, состоящей из полосового фильтра, для относительных средних значений энергии речевого сигнала в 1, 2, 3-м частотных каналах ($\overline{E_{f1}}, \overline{E_{f2}}, \overline{E_{f3}}$) используется сумма dE_{f4} , вычисленная для 4-го полосового фильтра. Для относительных средних значений энергии речевого сигнала в $N_{fk}-2, N_{fk}-1, N_{fk}$ -м частотных каналах ($\overline{E_{fN_{fk}-2}}, \overline{E_{fN_{fk}-1}}, \overline{E_{fN_{fk}}}$) используется сумма $dE_{fN_{fk}-2}$, вычисленная для $(N_{fk}-2)$ -го полосового фильтра. Нормировка значений признаков на dN_{fk} вводится для снижения их зависимости от линейных (частотных) искажений речевого сигнала при прохождении его через кодек и по трактам передачи сигналов.

Относительное время пребывания сигнала на частотах полосовых фильтров:

$$N_{totfk} = \frac{N_{\Delta tfk}}{N_{tfk}}$$

где $N_{\Delta tfk}$ – количество отсчетов времени (временных окон), при которых энергия E_{nk} в i -м частотном канале превышает медианное значение E_{fmedk} распределения энергии E_{nk} в i -м частотном канале на анализируемом участке голосового сигнала;

N_{tfk} – количество отсчетов времени (временных окон), при которых энергия E_{nk} в i -м частотном канале превышает порог отбраковки E_{0cp} на анализируемом участке голосового сигнала.

Нормированное время пребывания сигнала на частотах полосовых фильтров:

$$N_{thorfk} = \frac{N_{totfk}}{\sum_{m=1}^{N_k} N_{totfm}}; \quad \left(\sum_{k=1}^{N_k} N_{thorfk} = 1 \right).$$

Относительные медианные значения энергии речевых сигналов в k -м частотном канале:

$$E_{fmednormk} = \frac{E_{fmedk}}{\sum_{m=1}^{N_k} E_{fmedm}}; \quad \left(\sum_{k=1}^{N_k} N_{thorfk} = 1 \right).$$

Относительная мощность частотных компонент речи:

$$P_{otnfk} = \frac{P_{fk}}{dP_{fk}};$$

$$P_{fk} = E_{fmedk} N_{\Delta tfk};$$

$$dP_{fk} = P_{fk-3} + P_{fk-2} + P_{fk-1} + P_{fk} + P_{fk+1} + P_{fk+2} + P_{fk+3}.$$

Нормировка признаков частотной мощности вводится для снижения влияния линейных искажений в трактах передачи сигнала (как для признаков нормированного относительного среднего значения энергии

речевого сигнала в частотном канале). Вариации огибающих спектра речи k -го частотного канала определяются как отношение дисперсии энергии речевых сигналов на выходе k -го частотного канала при различных отсчетах времени к среднему значению энергии речевого сигнала в k -м частотном канале:

$$V_{fk} = \frac{D_{E_{fk}}}{E_{fkcp}};$$

$$D_{E_{fk}} = \frac{1}{N_{tk}} \sum_{n=1}^{N_{tk}} (E_{nk} - E_{fkcp})^2.$$

Нормированные вариации по времени огибающих спектра речи в k -м частотном канале:

$$V_{норм\ fk} = \frac{V_{fk}}{dV_{fk}};$$

$$dV_{fk} = V_{fk-3} + V_{fk-2} + V_{fk-1} + V_{fk} + V_{fk+1} + V_{fk+2} + V_{fk+3}.$$

Нормировка производится для снижения влияния частотных искажений на значения признаков.

Коэффициенты кросскорреляции между огибающими сигналами в i -м и j -м частотных каналах:

$$R = \frac{\frac{1}{N_{tw}} \sum_{n=1}^{N_{tw}} (E_{ni} - E_{ficp})(E_{nj} - E_{ficp})}{\sqrt{\frac{1}{N_{tw}-1} \sum_{n=1}^{N_{tw}} (E_{ni} - E_{ficp})^2} \sqrt{\frac{1}{N_{tw}-1} \sum_{n=1}^{N_{tw}} (E_{nj} - E_{ficp})^2}}$$

Отдельную группу акустических признаков речевого потока составляют признаки основного тона речи. Используется две подгруппы этих признаков. Первую подгруппу признаков составляют значения компонент гистограммы распределения вероятностей длительности периодов основного тона, вычисленных на произвольной фонеме речи говорящего. Признаки подгруппы предназначены для описания особенностей тонкой структуры распределения вероятностей значений длительности периодов основного тона речи говорящего в диапазоне от 2.7 мс до 12.1 мс. Признаками второй подгруппы являются значения компонент гистограммы распределения вероятностей частоты основного тона на том же отрезке речевого сигнала. Признаки подгруппы предназначены для описания особенностей распределения вероятностей значений основного тона речи говорящего в диапазоне от 80 до 350 Гц.

Для определения величины периодов и частоты основного тона по речевому потоку применяется следующий алгоритм. Из анализируемого отрезка речи с помощью экспериментально установленных порогов устроятся фрагменты, соответствующие низкоэнергетичным элементам речи, и участки, имеющие высокую частоту пересечения нулевого уровня сигнала (в основном, согласные звуки). Величины длительности периодов и частоты основного тона определяются посредством логической обработки результатов измерения основного тона с помощью либо кепстрального метода, основанного на анализе спектра речи, либо временного, основанного на определении периодов основного тона непосредственно во временной области. Первые интегральные признаки (нормированные относительные средние и относительные средние значения энергии речевого сигнала в частотных каналах, относительное время и нормированное время пре-

бывания сигнала на частотах полосовых фильтров, относительные медианные значения энергии речевых сигналов в частотных каналах, относительная мощность частотных компонент речи) отражают своеобразие формы спектра голосовых импульсов у различных лиц и особенности фильтрующих функций их речевых трактов.

Признаки вариаций огибающих спектра речи и нормированных вариаций огибающих спектра речи характеризуют особенности речевого потока, связанные с динамикой перестройки артикуляционных органов речи говорящего. Коэффициенты кросскорреляции являются интегральными характеристиками речевого потока, отражающими своеобразие взаимосвязи или синхронности движения артикуляционных органов речи говорящего.

Группа интегральных признаков основного тона характеризует индивидуальность статистических распределений вероятностей значений длительности периодов и частоты основного тона речи говорящего. Акустические индивидуализирующие признаки речевого потока вычислялись на отрезках речи длительностью 10 с.

В качестве интегрального скалярного показателя качества передачи речи пакетными сетями может быть использована вероятность правильной идентификации личности по речевому фрагменту, прошедшему через пакетную сеть связи. Для идентификации личности может быть использована совокупность описанных выше спектральных признаков фрагментов речевых сигналов [12]. Для этого было использовано решение классической задачи распознавания [13].

В дальнейшем при натурном моделировании был использован показатель информативности, как расстояние между многомерными распределениями спектральных признаков, полученными при условиях, что речевой фрагмент соответствует данному диктору и не принадлежит ему [13]. При этом информативность характеризует способность распознавания речевого фрагмента, которая утрачивается при снижении значения информативности ниже 148.

5. Описание эксперимента и его результаты

Для проведения экспериментальных исследований по оценке показателей качества передачи речи и вероятности идентификации личности по переданным речевым фрагментам был создан натурный макет фрагмента сети передачи речевого трафика (рис. 1).

Макет включает средства для воспроизведения и записи речевых фрагментов; адаптеры сопряжения стандартных звуковых входов и выходов компьютера с интерфейсом FXS VoIP-шлюзов; совокупность VoIP-шлюзов, образующих фрагмент сети и представляющих собой оконечное оборудование передачи речи; управляемый сетевой эмулятор, формирующий значения задержек и потерь, соответствующих наблюдаемым в реальной сети; средства сбора первичных сетевых параметров (задержки, потери пакетов) и их статистического анализа, также средства оценки качества передачи речевого трафика.

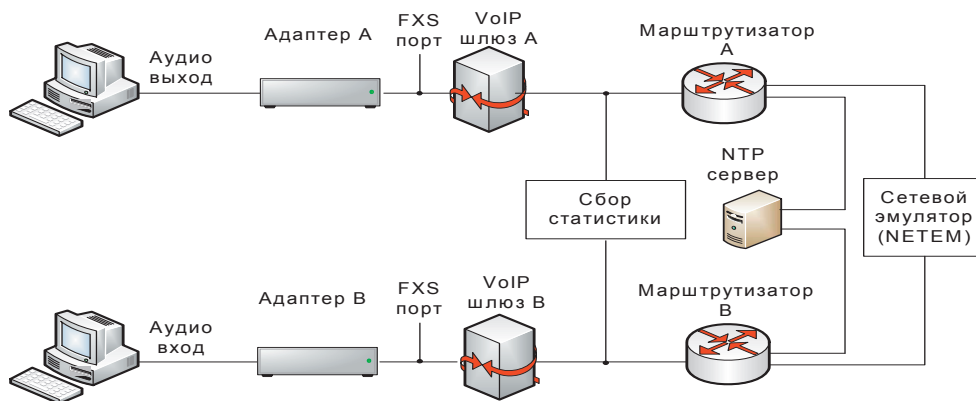


Рис. 1. Схема макета по исследованию характеристик передачи речевых фрагментов

Принцип функционирования макета следующий. Подготовленный речевой фрагмент воспроизводится на терминале А и через аудио выход подается на адаптер сопряжения интерфейса звуковой карты и FXS порта шлюза. Речевой трафик передается между VoIP шлюзами А и В через транзитные маршрутизаторы и сетевой эмулятор.

В качестве сетевого эмулятора использовался пакет NetEm [14, 15].

Сетевой эмулятор функционирует под управлением ОС Linux. Маршрутизаторы используются для сбора сетевой информации в виде последовательности передаваемых речевых пакетов.

При этом, для обеспечения оценки однопутевой задержки маршрутизаторы синхронизируются в соответствии с протоколом NTP. На приемной стороне выполняется запись речевого фрагмента в терминале В, который подключается к VoIP шлюзу с помощью адаптера В.

Для оценки параметров качества передачи речевого трафика возможно использовать как методы с анализом передаваемого контента (путем обработки wav файлов, исходного, передаваемого из терминала А и полученного в терминале В), так и методы анализа заголовков пакетов, собранных в транзитных маршрутизаторах (например, на основе методики E-model) [7, 8].

С использованием макета, включающего применяемые в современных украинских пакетных сетях VoIP-шлюзы D-Link DVS-7022, был проведен эксперимент по оценке показателей качества передачи речи и вероятности идентификации личности по переданным речевым фрагментам. Так же исследовалась зависимость указанной вероятности от таких сетевых характеристик как коэффициент потерь пакетов, средняя одноконцевая задержка, джиттер сетевых задержек.

В процессе проведения эксперимента исходный речевой фрагмент передавался через элементы макета и на приемной стороне фиксировался в виде wav-файла. Кроме того, в процессе передачи речевых пакетов собирались значения задержек и потерь, для чего транзитные шлюзы были синхронизированы между собой с помощью NTP-протокола с погрешностью не превышающей 10 мс.

В результате проведенного эксперимента были выявлены следующие закономерности влияния ха-

рактеристик пакетных каналов связи с потерями на качество передачи голосовых сигналов (рис. 2-4):

- отношение сигнал/шум в тракте существенно меняется с увеличением потерь и незначительно варьирует при джиттере и задержках;

- частотный диапазон речевых сигналов сужается (на 1,3, -1,4 кГц) во всех случаях прохождения сигнала

через тракт с потерями, задержками и джиттером;

- увеличение потерь существенно влияет на все параметры речи, кроме группы признаков основного тона, которая меняется не столь неуклонно (как бы не рвали речь, характеристики диктора остаются практически неизменными);

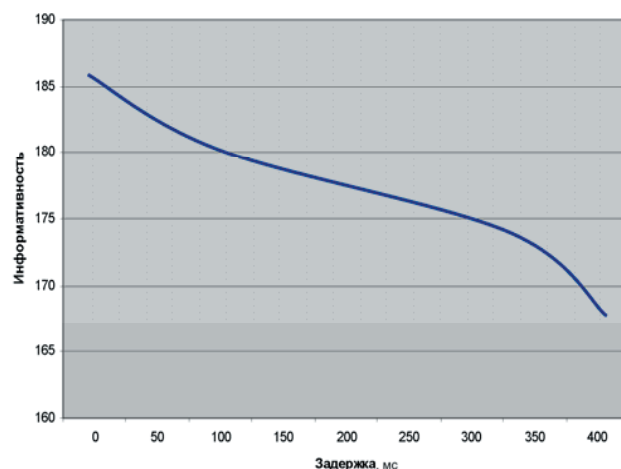


Рис. 2. Зависимость информативности данных от средней задержки в сети

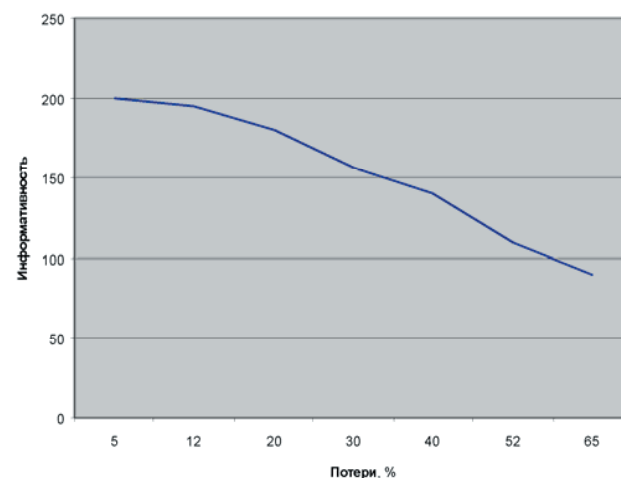


Рис. 3. Зависимость информативности данных от средних потерь в сети

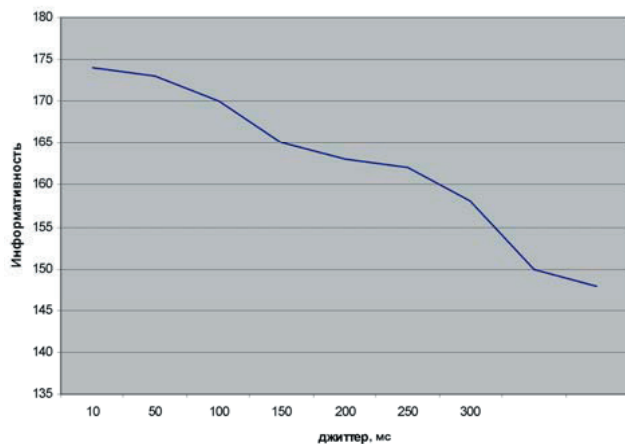


Рис. 4. Зависимость информативности данных от джиттера в сети

– с увеличением потерь увеличивается процент неправильного причисления голоса на исследуемой фонограмме к голосу «чужого» диктора, которого нет на обучающей фонограмме;

– задержки и джиттер не оказывают существенного влияния на снижение информативности групп признаков речи, они оказывают влияние на восприятие речи человеком (устройство информацию фиксирует, а человек, в реальных условиях, не в состоянии чётко воспроизвести все погрешности восприятия связанные с задержками и джиттером).

– при джиттере в 350 мс теряется способность распознавания речи.

6. Выводы

В работе определено понятие пофонемного спектрального анализа речевых сигналов, передаваемых сетями пакетной передачи данных с потерями, определена соответствующая совокупность спектральных характеристик речевых фрагментов и на основе последних предложен их интегральный спектральный показатель. Также разработан натурный макет фрагмента сети передачи речевого трафика. Показана возможность проведения экспериментальных исследований зависимости качества передачи речи от коэффициента потерь пакетов, средней одноконцевой задержки, джиттера сетевых задержек на основе введенного скалярного интегрального показателя. Выявлен ряд закономерностей зависимости качества передачи голосовых сигналов от характеристик пакетных каналов связи с потерями. Дальнейшие исследования целесообразно ориентировать на исследование зави-

симость вероятности идентификации личности по переданным речевым фрагментам от оценок показателей качества передачи речи, полученных в соответствии с методом E-model.

Литература

1. Б.С. Гольштейн, А.В. Пинчук, А.Л. Суховицкий. "IP-ТЕЛЕФОНИЯ". М.: Радио и связь, 2001.
2. H. M. Chong, H. S. Matthews, "Comparative Analysis of Traditional Telephone and Voice-over-Internet Protocol (VoIP) Systems", IEEE ISEE 2004.
3. B. Goode, "Voice Over Internet Protocol (VoIP)", IEEE Communication Magazine Sept. 2002.
4. "Voice over IP (VoIP)", Spirent Communications, P/N 340-1158-001 REV A, 8/01, 2001.
5. A. Lakaniemi, J. Rosti, V. I. Raisenen "Subjective VoIP speech quality evaluation based on network measurements", IEEE ICC 2001.
6. ITU-T Recommendation P.862, "Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ), an Objective Method for End-to-End Speech Quality Assessment of Narrowband Telephone Networks and Speech Codecs", Feb. 2001.
7. ITU-T Recommendation G.107, "The E-model, a computational model for use in transmission planning", Mar. 2005.
8. "The E-Model, R Factor and MOS, Overview", Psytechnics Dec. 2003.
9. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.
10. Рабинер Л., Шафер Р. Цифровая обработка речевых сигналов. — М.: Радио и связь, 1981. — 496 с.
11. Семенов В. Ю. Новый метод вычисления линейных спектральных частот речевых сигналов, основанный на универсальном алгоритме решения трансцендентных уравнений // Акуст. Вісн. — 2002. — 5. N 4. — С. 38-50.
12. Актуальные вопросы идентификации личности. Материалы научно-практической конференции 17 декабря 1998 г. СПб., 1999. С. 39-42, 98-115.
13. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 607 с.
14. Ощепков М.Ю. Методы моделирования речевого канала в сетях скоммутацией пакетов. Радиотехника, 2001, вып 123. стр. 68-75.
15. S. Hemminger. Network Emulation with NetEm. Proceedings of the 6th Australia's National Linux Conference (LCA2005), Canberra, Australia, April 2005.