

УДК 534.782.001:621.39

В.С. Дидковский, д-р техн. наук, А.Н. Продеус, канд. техн. наук, Д.П. Рудь

О точности измерений функции распределения уровней речевого сигнала

Исследовано влияние шумовой и реверберационной помех на точность измерений функции распределения уровней речевого сигнала.

Influence of noise and reverberation disturbances on measuring exactness of speech signal levels distributing function has been investigated.

Введение

Одной из центральных проблем формантно-го метода оценивания разборчивости речи является формирование коэффициента восприятия $w(E)$, используемого для оценивания формантной разборчивости речи:

$$A = \sum_{k=1}^K p_k \cdot w_k(E_k), \quad (1)$$

где p_k – вероятность пребывания формант в k -той полосе частот:

$$p_k = F_1(f_{вк}) - F_1(f_{нк}), \quad (2)$$

$F_1(f)$ – функция распределения формант по частоте; $w(E_k)$ – коэффициент восприятия речи; E_k – отношение сигнал-шум в k -той частотной полосе.

Известно [1], что коэффициент восприятия $w(E)$ можно сформировать, располагая функцией распределения уровней речевого сигнала $F(x)$:

$$w(E) = 1 - F(-E).$$

Проблема состоит в том, что функцию $F(x)$ оценивают экспериментально, поэтому от точности ее измерений зависит, в конечном счете, точность измерений разборчивости речи. Очевидно, на точности измерений функции $F(x)$ должно сказаться влияние шумовой и реверберационной помех в помещении, где производятся измерения. Справедливость такого предположения можно продемонстрировать следующими примерами.

Сравним, например, оценки функций $F(x)$ для записей украинской речи в условиях заглушенного помещения, а также для записей с выхода звукового канала телевизионного (ТВ) приемника (рис. 1,а). Телевизионный вариант украинской речи соответствует реальным условиям работы в конференц-зале, заполненном

журналистами. Как следует из рис. 1,а, левая часть графика оценки $F(x)$ для ТВ записи (пунктирная линия) существенно выходит за границы 95%-ного доверительного интервала (сплошные линии) оценки функции $F(x)$, полученной в условиях заглушенного помещения. Вероятнее всего, указанный выход обусловлен различием условий записи.

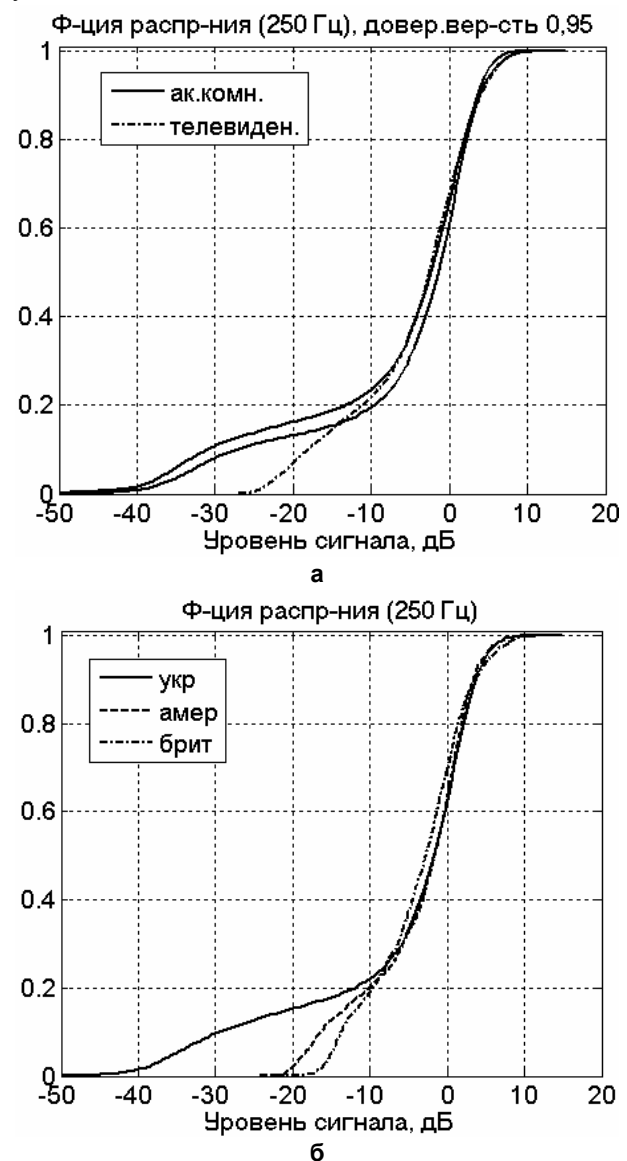


Рис. 1. Оценки $F(x)$ для украинского (а) и английского (б) языков

Пример сравнения оценок функций $F(x)$ для украинского языка и двух вариантов английского языка - американского и британского – представлен на рис. 1,б. Среднее значение оценок

функции $F(x)$ для украинской речи представлено на рис. 1,б сплошной линией (заглушенное помещение). Оба варианта английской речи записывались с выхода звукового канала ТВ приемника. Американский вариант английской речи соответствует условиям большого конференц-зала, заполненного журналистами, тогда как британский английский соответствует условиям телевизионной студии с двумя собеседниками. Вряд ли вызывает удивление различие оценок функций $F(x)$ для английского и украинского языков (рис. 1,б). Удивительно иное: заметно отличаются функции $F(x)$ для вариантов английского языка. Вероятнее всего, указанное различие обусловлено различием условий записи.

Приведенные выше примеры наглядно свидетельствуют, что измерения функций $F(x)$ должны выполняться в специальных заглушенных помещениях (акустических камерах) с низкими уровнями шумовой и реверберационной помех. Усиливая этот тезис, можно даже заявить, что в отечественных версиях формантного метода требуется знание коэффициентов восприятия с предельно достижимой точностью.

Между тем, в руках исследователей часто оказываются записи речевых сигналов, сделанные не в лабораторных, а в «полевых» условиях (как в приведенных выше примерах), когда влиянием шумовой и реверберационной помех пренебречь нельзя. В этой связи возникает естественный вопрос: каковы характер и степень влияния реверберационной и шумовой помех на точность измерений функций $F(x)$? Ответить на этот вопрос - значит, в определенной степени ответить и на другой вопрос: можно ли извлечь достоверную информацию о функции $F(x)$ из записей, сделанных не в лабораторных условиях?

К сожалению, в известной нам литературе отсутствуют ответы на эти вопросы. В данной работе мы попытаемся хотя бы частично восполнить указанный пробел.

1. Влияние шумовой помехи

Рассмотрим вначале ситуацию, когда преобладающее влияние на речевой сигнал оказывает шумовая помеха, так что вместо «чистого» речевого сигнала $s(t)$ наблюдается аддитивная смесь $y(t) = s(t) + n(t)$ сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$. Оценим характер и степень влияния шума $n(t)$ на результат измерений функции $F(x)$.

1.1. Аналитическое описание влияния шумовой помехи

Уровень речевого сигнала принято оценивать как скользящий средний квадрат, со временем интегрирования $T = 0,125$ с, речевого сигнала [1]. При наличии шумовой помехи, в силу статистической независимости сигнала и шума, оценка уровня речевого сигнала приобретает вид:

$$\begin{aligned} \xi(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t y^2(t) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [s^2(t) + 2s(t)n(t) + n^2(t)] dt \approx \quad (3) \\ &\approx \frac{1}{T} \int_{t-T}^t s^2(t) dt + \frac{1}{T} \int_{t-T}^t n^2(t) dt = \mathcal{D}_s(t) + \mathcal{D}_n(t), \end{aligned}$$

где $\mathcal{D}_s(t)$ и $\mathcal{D}_n(t)$ - оценки дисперсий сигнала и шума, соответственно.

В силу той же статистической независимости процессов $s(t)$ и $n(t)$, плотность распределения $W'_\xi(x')$ процесса $\xi(t)$ представляет собой свертку [2]:

$$W'_\xi(x') = \int_{-\infty}^{\infty} W'_{\mathcal{D}_n}(y') W'_{\mathcal{D}_s}(x' - y') dy', \quad (4)$$

где $W'_{\mathcal{D}_s}(x')$ и $W'_{\mathcal{D}_n}(x')$ - плотности распределения оценок $\mathcal{D}_s(t)$ и $\mathcal{D}_n(t)$, соответственно; $x' = \chi/x_0$ - нормированный, по своему среднему значению x_0 , уровень речевого сигнала χ .

Для функции распределения $F'_\xi(x')$ процесса $\xi(t)$ из (4) получаем:

$$\begin{aligned} F'_\xi(x') &= \int_{-\infty}^{x'} W'_\xi(\eta') d\eta' = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} W'_{\mathcal{D}_n}(y') F'_{\mathcal{D}_s}(x' - y') dy'. \end{aligned} \quad (5)$$

Подчеркнем, что соотношение (5) справедливо для линейной шкалы $x' = \chi/x_0$ нормированных уровней речевого сигнала. Поскольку в инженерных приложениях удобнее логарифмическая шкала уровней $x = 10 \lg x'$, проиллюстрируем графически (рис. 2), каким образом под воздействием шумовой помехи видоизменяется форма функции $F_{\mathcal{D}_s}(x)$, заданной на логарифмической шкале уровней x (рис. 2,а). На рис. 2,б показан вид соответствующей ей функции $F'_{\mathcal{D}_s}(x')$ в линейной шкале уровней x' сигнала. Связь между функциями $F_{\mathcal{D}_s}(x)$ и $F'_{\mathcal{D}_s}(x')$ определяется очевидным соотношением:

$F_{D_s}(x) = F_{D_s}(10 \lg x') = F'_{D_s}(x')$. На рис. 2,а и 2,б хорошо виден характер трансформации формы функции $F_{D_s}(x)$ при переходе от логарифмического масштаба уровней сигнала к линейному масштабу: левая ветвь графика ($0 \leq x' \leq 1$) неравномерно «сжимается», а правая ($x' > 1$) ветвь – неравномерно «растягивается».

Поскольку свертка (5) производится в линейном масштабе шкалы x' уровней сигнала, очевидно, что функция $W'_{D_n}(x')$ должна более заметно исказить левую, весьма крутую, часть графика $F'_{D_s}(x')$. Правая часть является весьма пологой, и потому не должна претерпеть существенных изменений.

При выполнении условия $\sigma[\tilde{D}'_n] \ll D'_n$ действие функции $W'_{D_n}(x')$ уподобляется действию δ -функции:

$$W'_{D_n}(x') \approx \delta(x' - D'_n),$$

т.е. функция $F'_{D_s}(x')$ смещается вправо на величину D'_n :

$$F'_\xi(x') \approx F'_{D_s}(x' - D'_n). \quad (6)$$

Если условие $\sigma[\tilde{D}'_n] \ll D'_n$ не выполняется, тогда к эффекту смещения добавляется эффект «размазывания». Поскольку величина D'_n представляет собой отношение шум-сигнал (в разгах по мощности), на логарифмической шкале уровней x (рис. 2,д) «левый край» функции $F_{D_s}(x)$ переместится из некоей точки x_1 в точку $x_2 \approx -SNR$, где SNR - отношение сигнал-шум, выраженное в дБ.

Последнее обстоятельство весьма полезно для инженерных приложений: если координата «левого края» оценки функции $F(x)$ примерно равна отношению сигнал-шум, взятому с обратным знаком, т.е. $x_2 \approx -SNR$, тогда оценку функции $F(x)$ следует признать недостоверной для некоторой окрестности точки $x_2 \approx -SNR$.

1.2. Модельные исследования

Цель модельных исследований состояла в анализе характера и степени изменений оценки функции $F(x)$, обусловленных наложением синтетического шума на речевой сигнал, записанный в акустической комнате Киевского научно-исследовательского института строительных конструкций (НИИСК). В данном помещении уровни шумовой и реверберационной помех на-

столько малы, что записанный речевой сигнал можно считать не искаженным помехами.

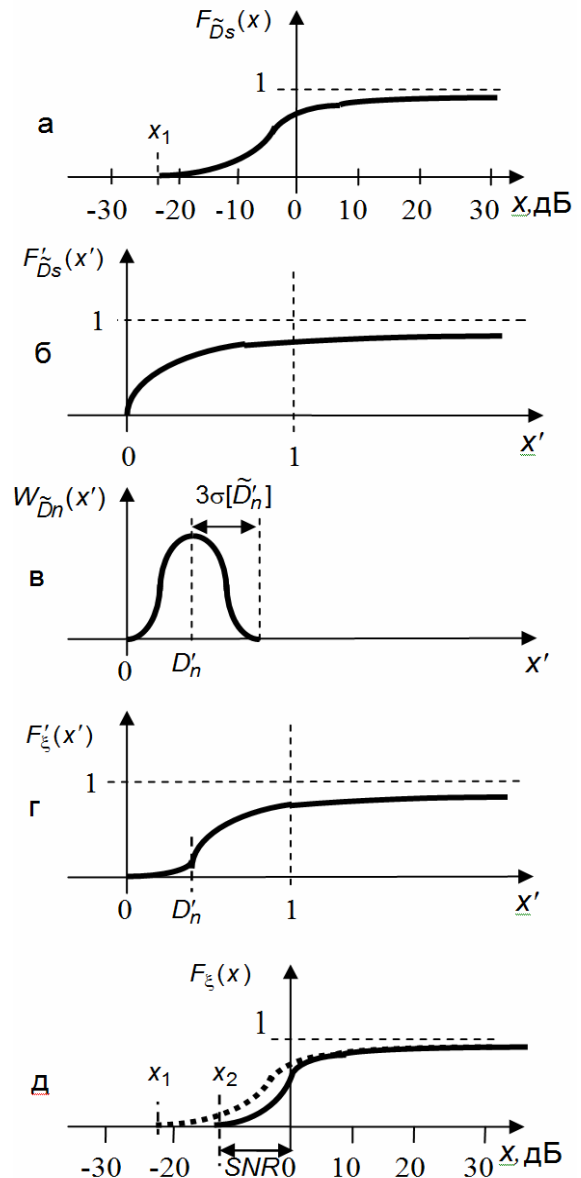


Рис. 2. Графическая иллюстрация соотношения (3)

Потребуем, чтобы, при наложении синтетического шума на речевой сигнал, в каждой полосе частот обеспечивалось отношение сигнал-шум $SNR_0 = 20$ дБ. С этой целью выполним следующую поэтапную обработку имеющихся записей речевых сигналов: 1) фильтрация речевого сигнала гребенкой из семи октавных фильтров; 2) фильтрация синтетического белого шума той же гребенкой из семи октавных фильтров; 3) формирование, для каждой из семи октавных полос частот, аддитивной смеси сигнала и шума с требуемым отношением сигнал-шум SNR_0 ; 4) оценивание функций $F'_\xi(x')$ для каждой из семи октавных полос частот; 5) сопоставление графиков функций $F'_\xi(x')$ и функций $F'_{D_s}(x')$.

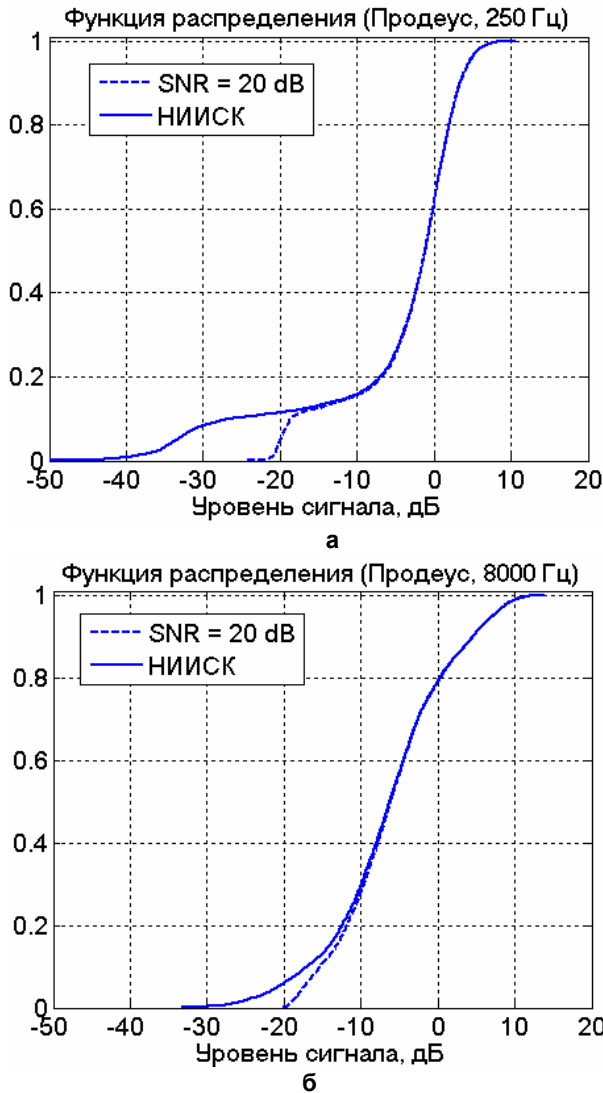


Рис. 3. Оценки функции $F(x)$ для $f_0=250$ Гц (а) и $f_0=8000$ Гц (б)

Фрагмент результатов выполнения этапов 4 и 5 представлен на рис. 3, где отчетливо наблюдается смещение «левой границы» функции $F(x)$ вправо до значения $x \approx -SNR_0 = -20$ дБ. Причина такого смещения объяснена в п. 1.1. Как следует из результатов проведенных модельных исследований, можно считать $F_{\xi}(x) \approx F_{D_s}(x)$, если $x \geq -SNR + 10$ дБ. Полученное правило весьма полезно для инженерных приложений.

2. Реверберационная помеха

Поскольку реверберационная помеха также оказывает существенное влияние на разборчивость речи, весьма полезной была бы оценка характера и степени влияния реверберационной помехи на точность измерений функции $F(x)$.

2.1 Аналитическое описание влияния реверберационной помехи

В качестве математической модели сигнала, искаженного реверберационной помехой, можно было бы выбрать соотношение свертки речевого сигнала $s(t)$ с импульсной характеристикой (ИХ) помещения $h(t)$:

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(v-t)h(v)dv . \quad (7)$$

Однако использование модели (7) весьма затрудняет вывод соотношения, описывающего трансформацию функции распределения уровня речевого сигнала из-за влияния реверберационной помехи.

В этом смысле альтернативой соотношению (7) может быть модель аддитивной смеси

$$z(t) = s(t) + d(t) \quad (8)$$

речевого сигнала $s(t)$ («прямой сигнал») и реверберационной помехи $d(t)$ (совокупность отраженных сигналов).

Процессы $d(t)$ и $s(t)$, вообще говоря, коррелированы. Однако для достаточно больших помещений, когда время прихода первого отражения в точку приема достаточно велико (не меньше средней длительности фоновой 0,1...0,2 с), процессы $s(t)$ и $d(t)$ можно считать некоррелированными в пределах временного интервала длительностью 0,1...0,2 с. Поэтому, аналогично соотношению (3) для шумовой помехи, оценку уровня сигнала $z(t)$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t z^2(t)dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [s^2(t) + 2s(t)d(t) + d^2(t)]dt \approx \quad (9) \\ &\approx \frac{1}{T} \int_{t-T}^t s^2(t)dt + \frac{1}{T} \int_{t-T}^t d^2(t)dt = \mathcal{D}_s(t) + \mathcal{D}_d(t), \end{aligned}$$

где $\mathcal{D}_s(t)$ и $\mathcal{D}_d(t)$ - оценки дисперсий сигнала и реверберационной помехи, соответственно. Соотношение (9) удобно тем, что позволяет аналитически описывать действие реверберационной помехи с помощью тех же соотношений, которые описывают действие шумовой помехи. Отличаться будут лишь плотности распределений помех. Поэтому, аналогично соотношению (5), получаем соотношение, описывающее трансформацию функции распределения речевого сигнала под влиянием реверберационной помехи:

$$F'_\zeta(x') = \int_{-\infty}^{\infty} W'_{Dd}(y') F'_{Ds}(x'-y') dy'. \quad (10)$$

Если ограничиться рассмотрением только первого отражения (что соответствует ситуации больших помещений с достаточно большим фондом звукопоглощения), тогда

$$W'_{Dd}(y') \approx W'_{Ds}(ay')$$

где a – отношение средних значений уровня сигнала и помехи (отношение сигнал-шум в разгах по мощности), и соотношение (10) приобретает вид:

$$F'_\zeta(x') = \int_{-\infty}^{\infty} W'_{Ds}(ay') F'_{Ds}(x'-y') dy'. \quad (11)$$

Значение a можно связать с индексом четкости C_{50} , характеризующим отношение энергий прямого и отраженного звука речевого сигнала [3]:

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_{-\infty}^{0,05} p^2(t) dt}{\int_{0,05}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \lg a = SNR, \quad (12)$$

где $p(t)$ – давление; 0,05 – значение фиксированного момента времени, выраженное в секундах; SNR – отношение сигнал-помеха, выраженное в дБ.

Полагая $p^2(t) = p \cdot e^{-\alpha t}$, получим:

$$C_{50} = 10 \lg(e^{0,05\alpha} - 1). \quad (13)$$

Поскольку $\alpha = \frac{13,8}{T_r}$, где T_r – время реверберации, из (12) с учетом (13) получаем:

$$a = e^{\frac{0,69}{T_r}} - 1.$$

Из приведенной в табл. 1 зависимости $a = a(T_r)$ следует, что при времени реверберации $T_r = 1$ с коэффициент $a \approx 1$ ($SNR \approx 0$ дБ), а при $T_r = 0,25$ с коэффициент $a \approx 15$ ($SNR \approx 12$ дБ). Применительно к соотношению (11) это означает, что при $SNR \approx 12$ дБ динамический диапазон значений аргумента функции $W'_{Ds}(ay')$ будет в 15 раз меньше, по сравнению с таковым для функции $F'_{Ds}(x')$, т.е. ре-

верберационная помеха мало повлияет на форму функции $F'_{Ds}(x')$. Напротив, при $SNR \approx 0$ дБ динамические диапазоны аргументов сворачиваемых функций одинаковы, и реверберация должна существенно сказаться на форме функции $F'_{Ds}(x')$.

2.2. Модельные исследования

Основываясь на соотношении (7), сформируем сигнал $z(t)$ путем свертки речевого сигнала, записанного в акустической комнате НИИСК, с ИХ $h(t)$ аудитории с достаточно большим временем реверберации. Затем измерим функцию распределения уровня $F_\zeta(x)$ сигнала $\zeta(t)$ и сопоставим ее с функцией распределения уровня $F_{Ds}(x)$ исходного речевого сигнала $s(t)$.

На рис. 4 показан вид ИХ $h(t)$ испытываемой аудитории (ауд. 412 корпуса 12 НТУУ «КПИ»). Функция $h(t)$ получена путем записи сигнала, полученного при выстреле из пневматического ружья для пейнтбола. Как следует из рис. 4, время реверберации в аудитории достаточно велико и близко 1 с. В п. 2.1 было показано, что в этом случае сигнал-шум весьма мало и близко 0 дБ, поэтому следует ожидать значительных изменений формы функции распределения речевого сигнала.

Приведенные на рис. 5 результаты подтверждают справедливость этого вывода. Из приведенных графиков следует, что характер действия реверберационной помехи подобен таковому для шумовой помехи, а именно: левая ветвь функции $F_\zeta(x)$ оказывается существенно сдвинутой вправо по отношению к левой ветви функции $F_{Ds}(x)$.

Вместе с тем, имеются и явные различия: «левый край» функции $F_{Ds}(x)$ сдвинулся значительно меньше, чем можно было бы ожидать при отношении сигнал-шум $SNR \approx 0$ дБ. Объяснение этого факта может быть предметом будущих исследований.

Таблица 1

T_r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,9
a	991,27	30,50	8,97	4,61	1,67	0,99	0,70	0,53	0,43

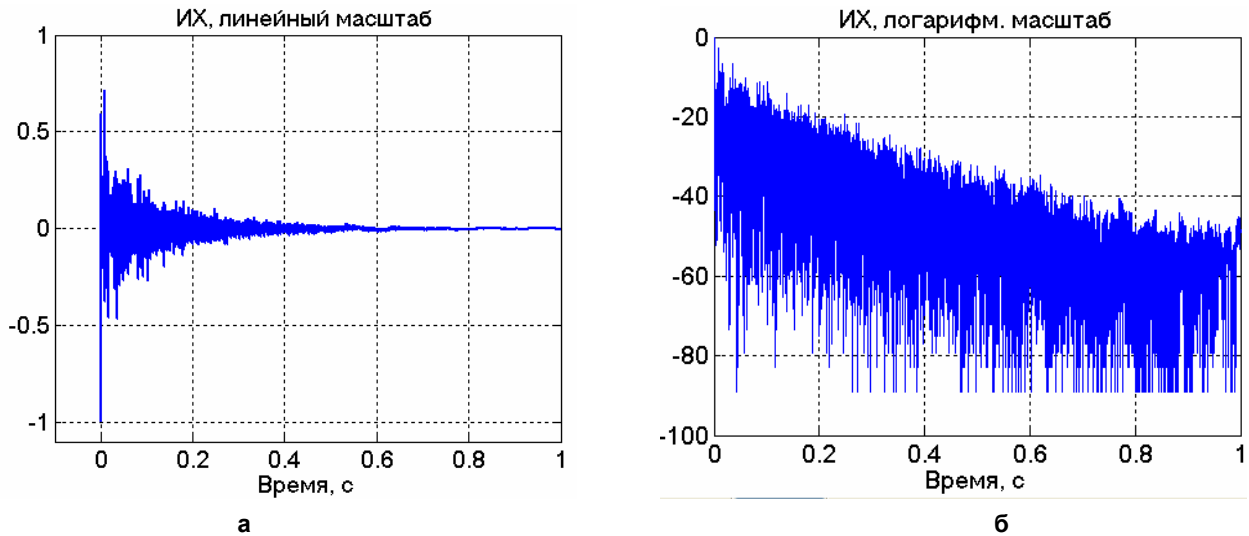


Рис. 4. ИХ в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах

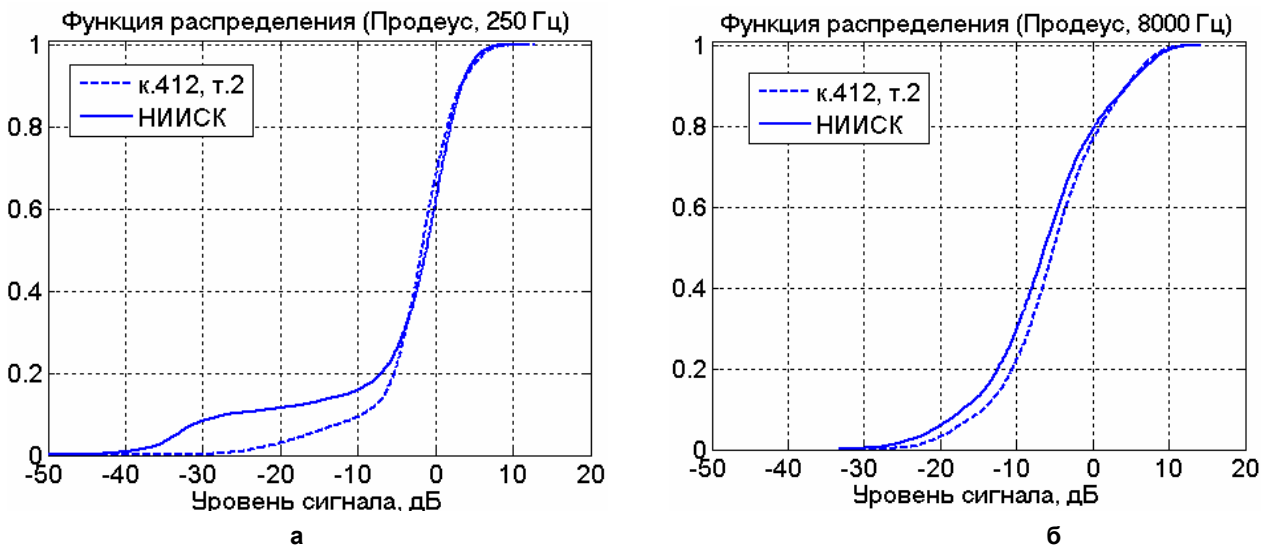


Рис. 5. Функции $F_{\xi}(x)$ для $f_0 = 250$ Гц (а) и $f_0 = 8000$ Гц (б)

3. Экспериментальные исследования

Приведенные выше результаты аналитических и модельных исследований помогают понять поведение приведенных на рис. 1 графиков и даже ориентировочно оценить отношение сигнал-шум в соответствующих ситуациях. Во всех рассмотренных случаях реверберационная помеха вряд ли играла существенную роль. В конференц-залах – из-за большого количества журналистов, в телевизионной студии – благодаря традиционно используемому в таких студиях специальному акустическому покрытию стен. Поэтому сдвиг вправо левого края штрихпунктирной линии на рис. 1,а можно объяснить преобладающим влиянием шумовой помехи, при этом отношение сигнал-шум, как следует из приведенного графика, было близким 25 дБ. Аналогичный сдвиг имеет место и на рис. 1,б, при этом

отношение сигнал-шум в случае американского английского было близким 21 дБ, британского английского – 17 дБ. Таким образом, приведенные примеры свидетельствуют, что при измерениях функции $F(x)$ по речевым сигналам, записанным с выхода ТВ, «левая ветвь» оценки функции $F(x)$, как правило, малодостоверна из-за высокого (и неконтролируемого) уровня шумовой помехи, а также из-за возможного влияния помех иной природы (реверберация, эхо, сигналы от динамиков системы звукоусиления и т.п.).

Перейдем теперь к краткому описанию еще одной серии опытов, проводившихся в условиях двух различных заглушенных помещений: акустической комнаты кафедры акустики и акустоэлектроники НТУУ «КПИ» и акустической комнаты НИИСК.

В акустической комнате КПИ проводились экспериментальные исследования речевых сиг-

налов 17 мужчин и 17 женщин. Цель этих исследований состояла в возможно более точной оценке функции $F(x)$, а также в сопоставлении оценок функций $F(x)$ не только для мужчин и женщин, но и для русского и украинского языков [4,5]. Между тем, имеются основания считать, что характеристики акустической комнаты КПИ существенно уступают таковым для акустической комнаты НИИСК. Поэтому было решено произвести запись и обработку речевых сигналов нескольких дикторов в условиях акустической комнаты НИИСК с тем, чтобы принять решение относительно качества оценок функций $F(x)$, полученных в условиях акустической комнаты КПИ.

В табл. 2 и 3 приведены значения парциальных отношений сигнал-шум (SNR, дБ) в каждой из семи октавных полосах частот, а также интегрального отношения сигнал-шум во всей полосе частот, для акустических комнат КПИ и НИИСК. Как видим, отношение сигнал-шум в НИИСК заметно выше в октавных полосах частот с центральными частотами 250, 500 и 2000 Гц. Однако в остальных октавных полосах частот картина практически одинакова. Поэтому интегральное отношение сигнал-шум в акустической комнате НИИСК оказывается не намного (всего на 2 дБ) выше, чем в акустической комнате КПИ.

Сопоставляя оценки $F(x)$ для обеих акустических комнат, соответствующие $f_0 = 250$ Гц (рис. 6,а,б), видим, что как для диктора-мужчины (рис. 6,а), так и для диктора женщины (рис. 6,б) «левые края» оценок $F(x)$ практически совпадают. Это хороший признак, свидетельствующий, что полученную в условиях акустической комнаты оценку $F(x)$ можно считать достоверной. Однако на тех же рис. 6,а,б обнаруживаем странное явление: левая ветвь оценки $F(x)$, со-

ответствующая акустической комнате НИИСК, принимает заметно меньшие значения по сравнению с таковой для акустической комнаты КПИ. В результате создается впечатление, что в целом левая ветвь оценки $F(x)$, соответствующая акустической комнате НИИСК, существенно сдвинута вправо. Как следует из приведенных выше результатов аналитических и модельных исследований, такой сдвиг мог бы иметь место, если бы акустическая комната НИИСК значительно уступала акустической комнате КПИ по уровню шумовой и реверберационной помех. Поскольку это явно не соответствует действительности, наблюдаемое явление следует объяснить иными причинами, например, изменением голоса диктора вследствие усталости или небольшой простуженности. Еще одна возможная причина – различие используемого оборудования, поскольку при записи сигналов в КПИ и НИИСК использовались различные микрофонные усилители. В данном случае вторая причина представляется более правдоподобной, поскольку вряд ли характеристики речевых сигналов двух дикторов могли одновременно одинаковым образом изменить свой характер.

Заметим, что аналогичное явление наблюдалось и для остальных полос частот, за исключением случая $f_0 = 8000$ Гц (рис. 6,в,г). Кстати, случай $f_0 = 8000$ Гц по-своему интересен для анализа, поскольку для $f_0 = 8000$ Гц отношение сигнал-шум принимает наименьшее значение, близкое 30 дБ. Ясно, что это обстоятельство негативно сказывается на достоверности оценки функции $F(x)$ в окрестности значения $x = 30$ дБ, где оценка функции $F(x)$ начинает свой рост. Как было показано в п. 1.2, в данном случае значения функции $F(x)$ следует считать недостоверными для $x < -20$ дБ.

Таблица 2. Характеристики сигнала и шума акустической комнаты КПИ

f_0 , Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Интегр
СКО сигнала, дБ	-30	-29	-32	-39	-43	-48	-52	-25
СКО шума, дБ	-71	-76	-84	-89	-83	-83	-82	-69
SNR, дБ	41	45	52	50	40	35	30	44

Таблица 3. Характеристики сигнала и шума акустической комнаты НИИСК

f_0 , Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Интегр
СКО сигнала, дБ	-27	-26	-28	-37	-44	-51	-51	-20
СКО шума, дБ	-68	-88	-90	-86	-91	-88	-84	-46
SNR, дБ	41	62	62	49	47	37	32	46

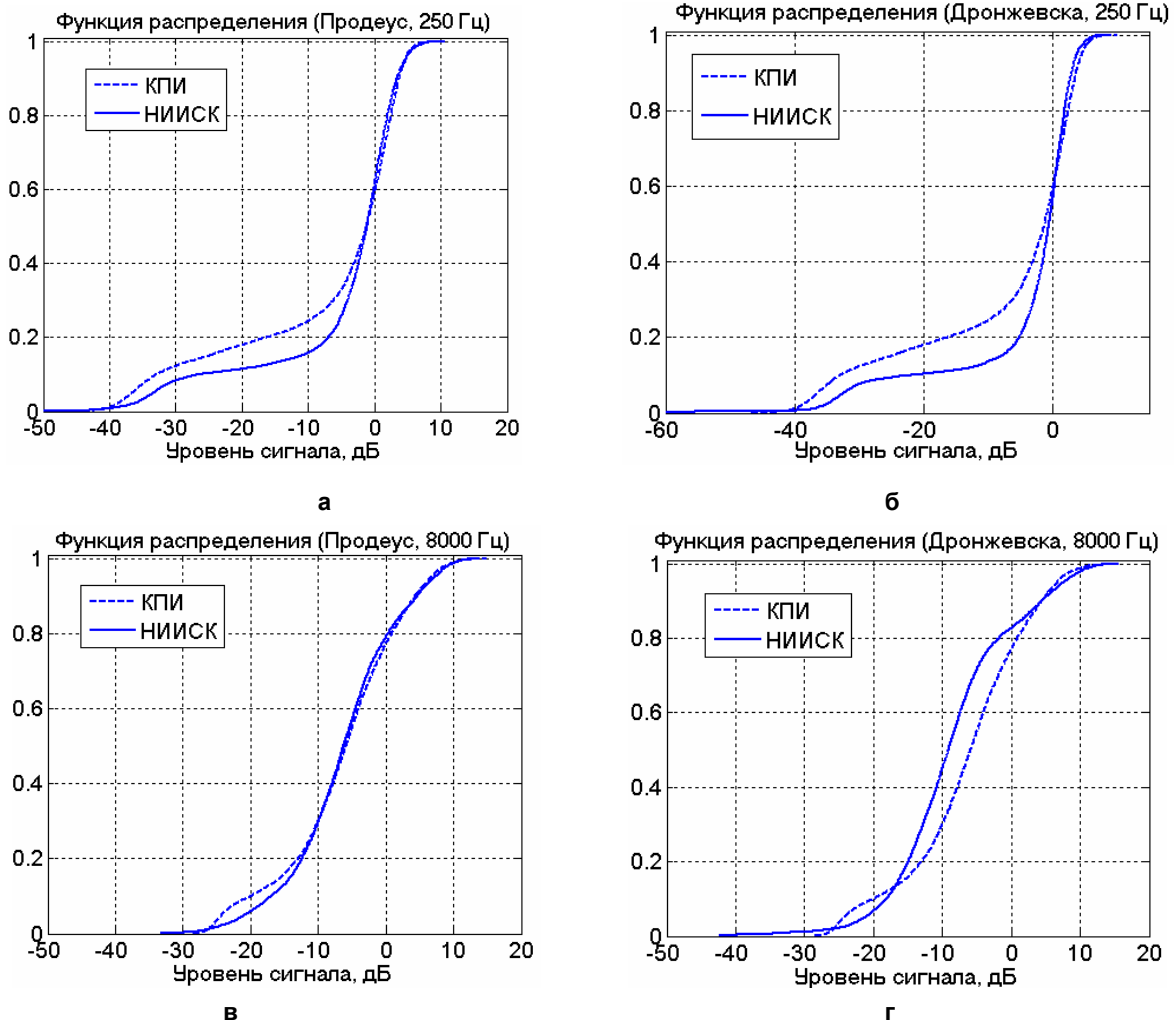


Рис. 6. Оценки функции $F_{D_{\xi}}(x)$ для $f_0=250$ Гц (а,б) и $f_0=8000$ Гц (в,г)

Выводы

Произведены аналитические, модельные и экспериментальные исследования влияния шумовой и реверберационной помех на точность измерений функции распределения уровней речевого сигнала.

Показано, что аналитически влияние помех обоих типов можно описать с помощью сходных соотношений свертки функции распределения речевого сигнала с плотностью распределения помехи. Модельные исследования свидетельствуют, что погрешность измерений функции распределения уровней речевого сигнала не превышает 1...2%, если уровень речевого сигнала превышает уровень шумовой помехи не менее чем на 10 дБ. Аналогичные количественные характеристики реверберационной помехи еще предстоит получить.

Полученные результаты весьма важны как для теории, так и для практики акустической экспертизы помещений и каналов связи, поскольку в отечественных версиях формантного

метода требуется знание коэффициентов восприятия с предельно достижимой точностью.

Литература

1. Дидковский В.С., Дидковская М.В., Продеус А.Н. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации. Монография. – К: Имэкс-ЛТД, 2008. – 420 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 575 с.
3. Дідковський В.С., Луньова С.А. Основи архітектурної та фізіологічної акустики. – К.: 2001. – 422 с.
4. Продеус А.Н. Об измерениях вероятностных свойств формант украинской и русской речи. - Сб. трудов Акустического симпозиума "Консонанс-2007", К., 2007, с.285-291.
5. Дидковский В.С., Продеус А.Н., Сопоставление формантных свойств украинской и русской речи. //Электроника и связь, тематический выпуск "Электроника и нанотехнологии", ч.2, 2009. №4-5. - С.88-94.